

## **BAB II**

### **STUDI PUSTAKA**

#### **II.1 Aspal**

Aspal merupakan bahan yang larut dalam karbon disulfida yang mempunyai sifat tidak tembus air dan mempunyai sifat adhesi atau daya lekat sehingga umum digunakan dalam campuran perkerasan jalan dimana aspal sebagai bahan pengikatnya. Aspal merupakan material yang berwarna hitam sampai coklat tua dimana pada temperatur ruang berbentuk padat sampai semi padat. Jika temperatur tinggi aspal akan mencair dan pada saat temperatur menurun aspal akan kembali menjadi keras (padat) sehingga aspal merupakan material yang termoplastis. (Shuri, 2010).

Aspal dalam campuran perkerasan berfungsi sebagai bahan pengikat antara aspal dan agregat, mengisi rongga antara butir agregat dan pori-pori dalam butir agregat itu sendiri, serta berperan sebagai pelumas saat penghamparan di lapangan, sehingga memudahkan proses pemadatan. (Andi P ,2017)

Menurut Indra (2023) ada tiga tahap penting yang terjadi selama masa layanan dari aspal sebagai pengikat pada campuran aspal. Pertama untuk menyelimuti agregat, kedua sebagai pelumas pada saat penghamparan sehingga mudah dipadatkan, dan ketiga sebagai kinerja pelayanan dari lapis perkerasan dalam hubungan dengan kemampuan struktur perkerasan untuk menahan beban.

Berdasarkan cara memperolehnya aspal dapat dibedakan oleh aspal alam dan aspal buatan. Berikut beberapa jenis aspal yang dapat digunakan dalam pekerasan jalan:

##### **II.1.1 Aspal Alam**

Aspal alam adalah aspal yang tidak melalui proses pengolahan yang kompleks dan berasal langsung dari alam. Pulau Buton di Sulawesi Tenggara adalah tempat yang dapat ditemukan aspal alam dalam bentuk batuan. Danau Pitch di Republik Trinidad memiliki aspal plastis, sedangkan aspal asli ada di sekitar perairan segitiga

Bermuda. Aspal yang terdapat di Pulau Buton dan Danau Pitch adalah aspal yang tercampur dengan bahan lain, sehingga tidak murni.



**Gambar 2.1** Aspal Alam

**Sumber:** (Habib R, 2023)

### **II.1.2 Aspal Buatan**

Aspal buatan adalah aspal yang dibuat dari minyak bumi yang diproses dengan metode yang relatif kompleks. Jenis aspal buatan yang biasa digunakan di Indonesia adalah sebagai berikut:

1. Aspal Keras

Aspal keras adalah jenis aspal yang memiliki tingkat kekakuan atau kekerasan yang tinggi, biasanya digunakan saat membangun jalan, trotoar, landasan pacu bandara, dan proyek lainnya yang membutuhkan lapisan kuat yang tahan terhadap tekanan dan beban berat.

2. Aspal Cair

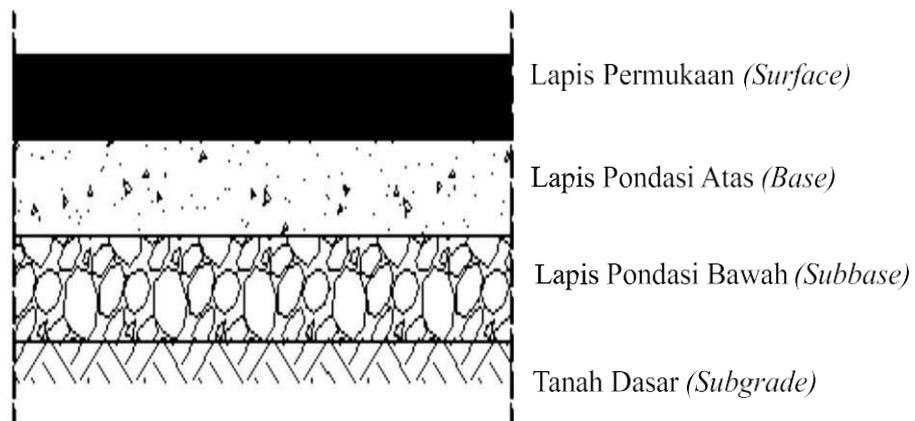
Aspal cair adalah jenis aspal yang tetap cair pada suhu ruangan dan biasanya digunakan untuk mengikat campuran aspal untuk pembuatan jalan.

3. Aspal Emulsi

Aspal emulsi dibuat dari campuran air, aspal, dan bahan tambahan lainnya yang membentuk emulsi homogen. Biasanya digunakan sebagai bahan pengikat saat membangun jalan, terutama untuk membuat lapisan tipis.

## II.2 Bahan Susun Lapis Perkerasan Lentur Jalan Raya

Perkerasan jalan raya terdiri dari tiga jenis perkerasan: perkerasan lentur, perkerasan kaku, dan perkerasan komposit. Perkerasan lentur menggunakan bahan pengikat aspal di bagian atas, sedangkan perkerasan kaku menggunakan lapisan beton. Lapisan pondasi jalan diperkuat dengan bahan yang kuat dan berkualitas tinggi untuk memastikan bahwa jalan memiliki daya dukung yang tinggi. Lapisan pondasi bawah, lapis pondasi atas, dan lapis permukaan adalah tiga lapis pondasi yang terdiri dari susunan lapis perkerasan lentur jalan raya.



**Gambar 2.2** Susunan Konstruksi Perkerasan Lentur

(Sumber : Sukirman, 1999.)

### II.2.1 Lapis Pondasi Bawah

Lapisan pondasi bawah, juga dikenal sebagai *Subbase Course*, adalah lapis perkerasan yang terletak di antara lapis pondasi dan tanah dasar. Fungsinya adalah sebagai berikut:

- a. Bagian dari struktur perkerasan yang digunakan untuk menyebarkan dan mendukung beban kendaraan kelapisan tanah dasar Lapis ini harus cukup stabil dan memiliki indeks plastis 10% dan CBR 20% atau lebih.
- b. Efisiensi menggunakan material yang relatif murah untuk mengurangi ketebalan lapisan di atasnya.
- c. Lapis peresap untuk mencegah air tanah berkumpul di pondasi

- d. Lapisan pertama untuk melindungi tanah dasar dari pengaruh cuaca atau lemahnya daya dukung tanah dasar untuk menahan roda alat berat agar pekerjaan dapat dilakukan dengan lancar dalam kondisi lapangan yang sulit.
- e. Lapisan filter untuk mencegah partikel halus dari tanah dasar naik ke atas lapisan pondasi.

### **II.2.2 Lapis Pondasi Atas**

Lapisan pondasi atas, juga dikenal sebagai *Base Course*, adalah lapis perkerasan yang terletak di antara lapis pondasi bawah dan lapis permukaan. Fungsinya adalah sebagai berikut:

- a. Lapisan pondasi atas menyebarkan beban secara merata ke lapisan di bawahnya untuk mencegah deformasi atau kerusakan struktural. Lapisan ini berfungsi untuk menahan beban lalu lintas yang diterapkan ke jalan.
- b. Untuk memastikan bahwa jalan memiliki daya tahan yang memadai terhadap retakan dan deformasi.
- c. Gesekan ban kendaraan dengan permukaan jalan dikurangi oleh lapisan pondasi atas. Material yang digunakan untuk lapisan ini harus tahan terhadap abrasi dan keausan.
- d. Mencegah genangan air yang dapat merusak lapis pondasi bawah.

### **II.2.3 Lapis Permukaan**

Lapisan permukaan, juga dikenal sebagai *Wearing Course* adalah lapis paling atas pada struktur perkerasan jalan. Fungsinya adalah sebagai berikut:

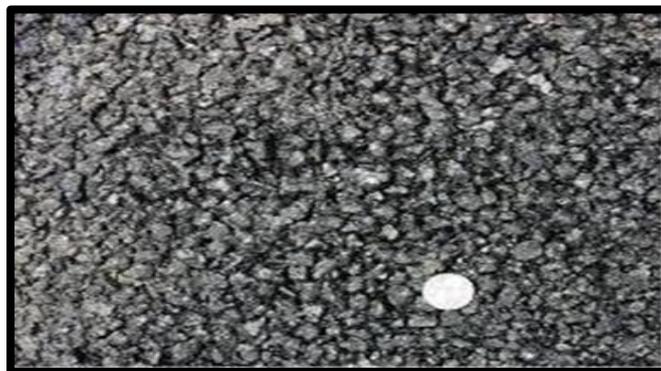
- a. Untuk memberikan kepadatan dan kekerasan yang diperlukan agar jalan dapat menahan beban lalu lintas dengan baik.
- b. Untuk memastikan bahwa kendaraan aman di jalan, dengan memberikan tingkat gesekan yang cukup.
- c. Untuk mencegah genangan air dan mengurangi risiko *aquaplaning*.
- d. Untuk mengurangi risiko deformasi dan retakan akibat pembebanan lalu lintas, perubahan suhu, dan faktor lingkungan lainnya.

### II. 3 Aspal Porus

Aspal porus, juga dikenal sebagai aspal berpori, adalah jenis perkerasan jalan yang dirancang untuk memungkinkan air hujan menembus permukaannya dan meresap ke dalam lapisan di bawahnya. Ini dicapai dengan menggunakan campuran aspal khusus yang memiliki kandungan agregat yang lebih sedikit dan ruang kosong yang lebih besar di antara partikel-partikelnya.

Fungsi utama dari aspal porus adalah untuk meningkatkan drainase permukaan jalan dan mengurangi genangan air. Dengan memungkinkan air hujan meresap ke dalam lapisan di bawahnya, aspal porus membantu mencegah terjadinya genangan air di permukaan jalan yang dapat menyebabkan aquaplaning, peningkatan risiko kecelakaan, dan kerusakan pada perkerasan.

Penggunaan aspal porus juga dapat mengurangi bahaya dari polutan untuk dapat masuk ke dalam tanah. Polutan tersebut dapat berasal dari hidrokarbon dari bahan-bahan aspal sendiri ataupun dari oli mobil. Aspal porus di Indonesia pertama kali diterapkan pada tahun 1997 oleh PT. Jasa Marga di lintasan Jagorawi sepanjang 250 meter. Uji coba tersebut dimaksudkan untuk menekan frekuensi kecelakaan akibat selip yang terjadi di Tol Jagorawi dan memberikan layanan yang lebih baik pada pengguna jalan. Di beberapa negara Eropa penerapan aspal porus untuk meningkatkan keselamatan telah lama diaplikasikan, lapisan aspal porus pertama kali dikembangkan di Amerika pada tahun 1950 dan dikenal dengan nama *Open Graded Friction course* (OGFC) (Falderika, 2017).



**Gambar 2.3** Aspal Porus

**Sumber:** (Hardiman, 2008.)

### II.3.1 Gradasi Aspal Porus

Campuran aspal porus menggunakan gradasi terbuka (*open graded*), sehingga campuran aspal porus disebut juga *open graded asphalt*. Gradasi terbuka terdiri dari agregat kasar yang banyak dan hanya mengandung sedikit agregat halus, sehingga terdapat banyak rongga/ruang. Campuran beraspal yang dibuat dengan gradasi ini bersifat porus atau memiliki permeabilitas yang tinggi, stabilitas yang rendah dan memiliki berat isi yang kecil (Habib R, 2023). Berikut ini gradasi agregat dan syarat campuran aspal porus yang dipakai pada penelitian ini yaitu spesifikasi Australia:

**Tabel 2. 1** Gradasi Agregat Aspal Porus Spesifikasi Australia

| Ukuran Ayakan (mm) | %Berat Yang Lolos |
|--------------------|-------------------|
|                    | Ag.Maks. 10mm     |
| 19.000             | 100               |
| 12.700             | 100               |
| 9.530              | 85- 100           |
| 4.760              | 20 – 45           |
| 2.380              | 10 – 20           |
| 1.190              | 6 – 14            |
| 0.595              | 5 – 10            |
| 0.297              | 4 – 8             |
| 0.149              | 3 – 7             |
| 0.074              | 2 – 5             |
| Total              | 100               |
| Kadar Aspal        | 5,0 – 6,0         |

Sumber : *Australian Asphalt Pavement Association, (2004)*

**Tabel 2. 2** Syarat Campuran Aspal Porus Spesifikasi Australia

| No | Kriteria Perencanaan         | Nilai     |
|----|------------------------------|-----------|
| 1  | Uji Cantabro Loss (%)        | Maks. 35  |
| 2  | Uji Aliran Aspal Kebawah (%) | Maks. 0,3 |
| 3  | Void in Material (VIM%)      | 18 -25    |
| 4  | Stabilitas Marshall (kg)     | Min. 500  |

|   |                           |           |
|---|---------------------------|-----------|
| 5 | Kelelahan Marshall (mm)   | 2 – 6     |
| 6 | Kekakuan Marshall (kg/mm) | Maks. 400 |
| 7 | Jumlah Tumbukan Perbidang | 50        |

**Sumber** : *Australian Asphalt Pavement Association, (2004)*

### II.3.2 Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan dan kekurangan dalam penggunaan aspal porus, yaitu:

1. Kelebihan penggunaan Aspal Porus menurut Herman (2017)
  - a. Mengurangi dampak genangan air apabila permukaan aspal terkena air hujan
  - b. Mengurangi efek percikan dan semprot (*splash and spray*) yang dihasilkan oleh kendaraan ketika melalui permukaan aspal.
  - c. Mengurangi efek silau dari pantulan cahaya.
  - d. Meningkatkan keselamatan berkendara sehingga tingkat kecelakaan yang tinggi dapat dikurangi.
  - e. Mengurangi kebisingan
2. Kekurangan penggunaan Aspal Porus menurut Mayuni (2020)
  - a. Campuran cenderung mengalami tekanan yang tinggi akibat kadar rongga yang tinggi, sehingga membuka peluang terjadinya (*rutting*) atau kerusakan struktural jalan.
  - b. Memiliki stabilitas rendah yang membuka peluang deformasi yang lebih besar.

### II.4 Pengujian Pada Aspal

Aspal adalah material yang sangat rentan akan temperatur, dimana ketika aspal berada pada suhu yang tinggi maka aspal akan melunak atau meleleh begitupun ketika suhu berada di titik rendah maka aspal akan mengeras. Menurut Sukirman (2003), Indeks penetrasi atau ( $PI = \textit{penetration index}$ ), adalah parameter yang digunakan untuk mengukur kepekaan aspal terhadap suhu. Kepekaan aspal terhadap suhu adalah faktor yang menentukan seberapa keras aspal seiring bertambah umurnya. Beberapa jenis aspal yang umum digunakan di Indonesia adalah aspal dengan penetrasi 60/70 (aspal pen 60/70) dan penetrasi 80/100 (aspal

pen 80/100) pada kebanyakan daerah (*Shell Bitumen, 1993*). Spesifikasi untuk aspal Pen 60/70 tercantum dalam **Tabel 2.3**.

**Tabel 2. 3** Spesifikasi Aspal Keras

| No | Jenis Pengujian             | Metode Pengujian    | Aspal PEN 60/70 |
|----|-----------------------------|---------------------|-----------------|
| 1  | Penetrasi 25° (dmm)         | SNI 06-2456-2011    | <b>60-70</b>    |
| 2  | Viskositas (cSt)            | SNI 06-6441-1991    | <b>&gt; 300</b> |
| 3  | Titik lembek, °C            | SNI-06-2434-2011    | <b>≥ 48</b>     |
| 4  | Indeks penetrasi            | -                   | <b>≥ -1,0</b>   |
| 5  | Daktalitas pada 25°C, (cm)  | SNI-06-2432-2011    | <b>≥ 100</b>    |
| 6  | Titik nyala (°C)            | SNI-06-2433-2011    | <b>≥ 232</b>    |
| 7  | Kelarutan dalam toluene (%) | RSNI M-04-2004      | <b>≥ 99</b>     |
| 8  | Berat jenis                 | SNI 2441:2011       | <b>≥ 1,0</b>    |
| 9  | Stabilitas penyimpanan (°C) | ASTMD 5976 part 6.1 | -               |

**Sumber:** Kementerian Pekerjaan Umum, (2018)

Berikut ini adalah penjelasan tentang pengujian aspal:

#### 1. Pengujian Penetrasi

Pengujian penetrasi, juga dikenal sebagai pengujian kekerasan aspal, dilakukan untuk mengukur kekuatan aspal dalam mengikat agregat. Ini dilakukan dengan menggunakan jarum standar berdiameter 1 mm pada suhu 25°C dan memberikan beban 100 gram selama 5 detik, yang ditunjukkan dalam 0,1 mm.



**Gambar 2. 4** Alat uji penetrasi

(**Sumber :** Penelitian di Laboratorium Universitas Negeri Yogyakarta)

## 2. Pengujian titik lembek aspal

Tujuan penentuan titik lembek adalah untuk mengetahui seberapa tahan aspal terhadap suhu tertinggi. Untuk menguji titik lembek, bola baja dengan berat tertentu diletakkan di atas lubang cincin yang telah diisi dengan aspal. Kemudian, suhu ditambahkan ke aspal sehingga bola baja jatuh di atas aspal untuk menentukan titik lembeknya.



**Gambar 2. 5** Alat Pengujian Titik Lembek Aspal

**Sumber:** (Adira, 2019)

## 3. Pengujian daktilitas

Pengujian daktilitas mengukur seberapa jauh aspal keras dapat ditarik antara dua cetakan sebelum putus dengan suhu dan kecepatan tertentu. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui sifat kohesi aspal.



**Gambar 2. 6** Alat uji daktilitas

**(Sumber :** (Agi Ferdiana, 2013)

4. Pengujian titik nyala dan titik bakar aspal

Pengujian titik nyala dan titik bakar berguna untuk mengetahui suhu maksimum, dimana aspal mulai menyala dan aspal mulai terbakar.

- a. Suhu titik nyala adalah suhu saat nyala singkat dipermukaan aspal berlangsung kurang dari 5 detik.
- b. Titik bakar adalah suhu di mana api terlihat selama setidaknya 5 detik pada permukaan aspal.



**Gambar 2. 7** Alat Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar

**Sumber:** (Modul Pengujian lab. Universitas Sebelas Maret, 2018)

5. Pengujian berat jenis

Berat jenis aspal atau ter diukur dengan mengganti berat air dengan berat aspal atau terdalam wadah yang sama pada suhu tertentu. Nilai penetrasi bitumen dan suhunya sangat memengaruhi berat jenis aspal. Tujuan dari pengujian berat jenis aspal ini adalah untuk mengetahui berat jenis aspal dengan menggunakan piknometer dan berdasarkan berat di udara dan berat di dalam air.



**Gambar 2. 8** Piknometer

**(Sumber :** Yanisman, 2020)

## 6. Pengujian viskositas

Tujuan dari pengujian viskositas ini adalah untuk menentukan suhu yang ideal untuk campuran dan pemadatan aspal, karena tingkat material aspal dan suhu yang digunakan sangat bergantung pada kekentalannya.



**Gambar 2. 9** Alat Pengujian Viskositas

Sumber : (Adira, 2019)

## II.5 Agregat

Agregat merupakan butir-butir batu pecah, kerikil, pasir atau mineral lain, baik yang berasal dari alam maupun batuan yang berbebtuk mineral padat berupa ukuran besar maupun kecil (Laswar 2021). Agregat dapat dibedakan jenisnya berdasarkan ukuran butirannya. Berikut adalah agregat yang dibedakan jenisnya berdasarkan ukuran butirannya.

1. Agregat kasar, yaitu merupakan batuan yang tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm), berfungsi untuk mengunci masing-masing partikel agregat kasar untuk memberikan stabilitas campuran. Ketentuan–ketentuan untuk agregat kasar dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 2. 4** Ketentuan Agregat Kasar Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2

| Pengujian                                 |                  |             | Metoda Pengujian | Nilai     |
|---|------------------|-------------|------------------|-----------|
| Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan | Natrium sulfat   |             | SNI 3407-2008    | Maks. 12% |
|   | Magnesium sulfat |             |                  | Maks. 18% |
|   |                  | 100 putaran | SNI 2417-2008    | Maks. 6%  |

|                                  |  |             |                                |           |
|----------------------------------|--|-------------|--------------------------------|-----------|
| Abrasi dengan mesin Los Angeles  | Campuran AC Modifikasi dan SMA                   | 500 putaran |                                | Maks. 30% |
|                                  | Semua jenis campuran beraspal bergradasi lainnya | 100 putaran |                                | Maks. 8%  |
|                                  |  | 500 putaran |                                | Maks. 40% |
| Kelekatan agregat terhadap aspal |  |             | SNI 2439-2011                  | Maks. 95% |
| Butir Pecah pada Agregat Kasar   | SMA  |             | SNI 7619-2012                  | 100/90*)  |
|                                  | Lainnya  |             |                                | 95/90 **) |
| Partikel Pipih dan Lonjong       | SMA  |             | SNI 8287:2016 Perbandingan 1:5 | Maks. 5%  |
|                                  | Lainnya  |             |                                | Maks. 10% |
| Material lolos Ayakan No.200     |  |             | SNI ASTM C117:2012             | Maks1%    |

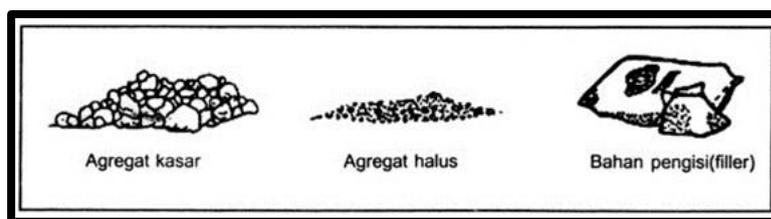
2. Agregat halus adalah batuan yang lolos saringan No. 8 (2,36 mm) dan tertahan di saringan No. 200 (0,075 mm). Agregat halus berfungsi untuk campuran dengan meningkatkan stabilitas campuran dengan memperkuat sifat saling mengunci agregat kasar.

**Tabel 2. 5** Ketentuan Agregat Halus Spesifikasi Bina Marga 2018 Rev 2

| Pengujian   | Metode Pengujian   | Nilai     |
|---|--------------------|-----------|
| Nilai Setara Pasir  | SNI 03-4428-1997   | Min. 2,5% |
| Uji Rongga Tanpa Pemadatan                                | SNI 03-6877-2002   | Maks.3%   |
| Gumpalan Lempng dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat | SNI 03-4141-1996   | Maks. 1%  |
| Lolos ayakan No.200                                       | SNI ASTM C117:2012 | Maks. 10% |

3. Agregat Filler adalah bahan yang lolos saringan No. 100 100% dan No. 200 paling kurang 75% yang digunakan sebagai pengisi dalam lapisan aspal. Fungsi

filler yaitu untuk mengisi rongga antar agregat kasar dan halus yang dapat diperoleh dari pemecahan batuan alami atau buatan. Adanya bahan pengisi bertujuan untuk meningkatkan kekentalan bahan bitumen dan mengurangi rentannya terhadap temperatur. Selain itu, karena bahan pengisi banyak terserap dalam bahan bitumen, maka bahan pengisi akan meningkatkan volumenya. Selain itu bahan pengisi (*filler*) dapat mengurangi volume pori-pori atau rongga sehingga dapat meningkatkan kepadatan dan dapat menurunkan permeabilitas campuran aspal (Hamzah dkk, 2016).



**Gambar 2. 10** Perbandingan Jenis Agregat

Sumber: (Sukirman,2003)

### II.5.1 Jenis – Jenis Agregat

Terdapat banyak jenis agregat, dan masing-masing dibedakan berdasarkan proses pembuatan, pengolahan, dan ukuran butirannya. Berikut ini adalah beberapa klasifikasi agregat berdasarkan proses, pengolahan, dan ukurannya:

1. Agregat Beku (*igneous rock*)

Agregat beku berasal dari magma yang membeku dan mendingin. Ada dua jenis agregat beku: agregat halus dan agregat kasar. Agregat halus terdiri dari batu apung, andesit, obsidian, basalt, dan pumice, sedangkan agregat kasar terdiri dari diorite, syenit, dan gabboro.

2. Agregat Sedimen (*sedimentary rock*)

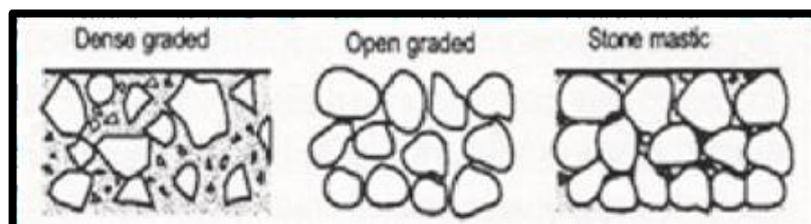
Agregat sedimen adalah agregat yang berasal dari campuran partikel mineral, sisa hewan, dan tanaman yang membeku. Menurut (Sukirman 2016), agregat sedimen dibagi menjadi tiga berdasarkan pembentukannya, yaitu:

- a. Agregat sedimen yang dibentuk dengan proses mekanik seperti breksi, konglomerat, batu pasir, batu lempung. Agregat ini banyak mengandung silika.
- b. Agregat sedimen yang dibentuk dengan proses organis, seperti batu gamping, batu bara dan opal.

- c. Agregat sedimen yang dibentuk dengan proses kimiawi seperti batu gamping, garam, *gips*, dan *flint*.
3. Agregat Metamorfik (*metamorphic rock*)  
Agregat metamorfik adalah agregat sedimen yang mengalami perubahan bentuk sebagai akibat dari perubahan tekanan dan suhu di Bumi. Ada dua jenis agregat metamorf: agregat metamorf yang masif (marmer dan kwarsit) dan agregat metamorf yang berfoliasi (batu sabak, sekis, dan filit).
4. Agregat Siap Pakai  
Agregat yang siap pakai terbentuk melalui proses erosi dan degradasi dan dapat digunakan dalam proses perkerasan jalan dengan bentuk dan ukuran yang diambil langsung dari alam tanpa diproses terlebih dahulu.
5. Agregat yang Perlu Diolah  
Agregat ini adalah agregat yang diperoleh dari bukit, gunung, atau sungai. Agregat di bukit dan gunung biasanya dalam bentuk masif, sehingga perlu dilakukan proses pemecahan dahulu sebelum dapat diangkut ke mesin pemecah batu. Di musim hujan, sungai biasanya mengangkut agregat berukuran besar, sehingga tidak memenuhi standar ukuran.

### II.5.2 Gradasi Agregat

Pembagian butir agregat, juga dikenal sebagai gradasi, adalah pembagian butir agregat dengan ukuran tertentu yang diperoleh dari hasil analisis saringan dengan menggunakan satu set saringan. Hasil analisis ini ditunjukkan dalam persentase lolos, atau persentase tertahan, yang dihitung berdasarkan berat agregat. Sifat-sifat campuran aspal panas dipengaruhi oleh gradasi. Ini termasuk kekakuan, stabilitas, durabilitas, permeabilitas, workabilitas, kekesatan, dan ketahanan terhadap kerusakan.



**Gambar 2. 11** Gradasi Agregat

(Sumber: AAPA 2004).

Jenis gradasi agregat ditentukan oleh distribusi butiran agregat dengan ukuran tertentu yang dimiliki oleh suatu campuran. Gradasi menentukan besarnya rongga atau pori yang mungkin terjadi dalam campuran agregat. Gradasi agregat dapat dikelompokkan dalam 3 jenis, yaitu:

1. Gradasi seragam (*uniform graded*)

Gradasi seragam, juga disebut gradasi terbuka, adalah gradasi agregat dengan ukuran butir yang hampir sama yang mengandung sedikit agregat halus sehingga terdapat banyak rongga antar agregat.

2. Gradasi rapat (*dense graded*)

Gradasi rapat, juga disebut sebagai gradasi menerus atau gradasi baik (*well graded*), adalah gradasi agregat di mana terdapat butiran dari agregat kasar sampai halus.

3. Gradasi senjang (*gap graded*).

Gradasi senjang adalah gradasi yang memiliki rentang ukuran butiran agregat yang sangat kecil atau hampir tidak ada sama sekali.

### **II.5.3 Karakteristik Campuran Agregat**

Menurut Sukirman (2003), terdapat 7 karakteristik campuran yang harus dimiliki oleh beton aspal yaitu stabilitas, keawetan, kelenturan atau fleksibilitas, ketahanan terhadap gesekan, ketahanan terhadap kelelahan, kedap air dan kemudahan pelaksanaan. Berikut adalah penjelasan mengenai ketujuh karakteristik tersebut:

1. Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas perkerasan jalan adalah kemampuan lapisan perkerasan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur maupun bleeding. Parameter dari stabilitas adalah nilai stabilitas campuran, nilai kelelahan (flow) yang diperoleh dari pengujian Marshall dan kepadatan campuran.

2. Keawetan/daya tahan (*Durability*)

Durabilitas atau keawetan dari suatu perkerasan lentur merupakan kemampuan untuk menahan keausan akibat pengaruh suhu, cuaca, air ataupun keausan akibat gesekan roda kendaraan. Parameter durabilitas adalah VIM (*Void In Mix*) dan VMA (*Void In Mineral Aggregate*)

3. Kelenturan (*Flexibility*)

Fleksibilitas adalah kemampuan dari suatu perkerasan lentur untuk mengikuti deformasi yang berulang akibat beban lalu lintas tanpa terjadi keretakan. Parameter fleksibilitas adalah MQ (*Marshall Quotient*) yang merupakan hasil perbandingan antara stabilitas dan *flow*.

4. Ketahanan terhadap kelelahan (*Fatigue Resistance*)

Ketahanan terhadap kelelahan adalah kemampuan lapis aspal beton menerima beban berulang tanpa terjadi kelelahan berupa retak dan alur (*rutting*). Karakteristik ini dipengaruhi oleh VIM, VMA dan VFB (*Void Filled with Bitument*).

5. Kekesatan/tahanan geser (*Skid Resistance*)

Tahanan geser adalah kemampuan permukaan beton aspal memberikan gaya gesek pada roda kendaraan untuk menghindari terjadinya slip atau tergelincir, baik di waktu hujan atau basah maupun di waktu kering.

6. Kedap air (*Impermeability*)

Kedap air atau impermeabilitas adalah kemampuan beton aspal untuk tidak dapat dimasuki air ataupun udara ke dalam lapisan beton aspal.

7. Kemudahan Pelaksanaan (*Workability*)

Kemudahan dalam pelaksanaan adalah kemampuan campuran beton aspal untuk mudah dihamparkan dan dipadatkan sehingga diperoleh hasil yang memenuhi kepadatan yang diharapkan. Karakteristik ini dipengaruhi oleh gradasi agregat dan kandungan bahan pengisi.

Dalam merancang ketebalan perkerasan jalan, sangat penting untuk memperhatikan tujuh sifat utama campuran beton aspal. Untuk jalan yang digunakan oleh lalu lintas ringan, seperti mobil penumpang, sebaiknya memilih beton aspal yang memiliki durabilitas dan fleksibilitas tinggi dibandingkan dengan beton aspal yang memiliki stabilitas tinggi.

## II.6 Bahan pengisi (Filler)

Frakasi debu mineral yang lolos saringan no. 200 (0.075 mm) dan tidak kurang dari 75% beratnya disebut filler atau bahan pengisi. Ini dapat berupa debu kapur, debu dolomit, atau semen *Portland*. *Filler* harus dalam keadaan kering dan kadar air

tidak boleh melebihi 3% dari berat total agregat. Fungsi *Filler* dalam campuran yaitu untuk memodifikasi agregat halus sehingga meningkatkan berat jenis campuran dan mengurangi jumlah aspal yang diperlukan untuk mengisi rongga. Selain itu, saat dicampur dengan aspal, *filler* membentuk bahan pengikat yang konsisten tinggi yang mengikat secara bersama-sama butiran agregat.

## II.7 Nano SiO<sub>2</sub>

Silicon dioksida (SiO<sub>2</sub>) adalah komponen utama mineral silika (SiO<sub>2</sub>). Silika tersusun dari dua unsur yaitu terdiri dari silikon (Si) dan oksigen (O<sub>2</sub>) dimana keduanya merupakan unsur yang paling banyak ditemukan di alam.



**Gambar 2. 12** Nano Silika (SiO<sub>2</sub>)

**Sumber:** (Tanzadeh & Shahrezagamasaei, 2017)

Salah satu cara untuk memperoleh silika dari suatu bahan alam adalah dengan menggunakan metode ekstraksi. SiO<sub>2</sub> memiliki sifat konduktor, memiliki ketahanan terhadap oksidasi dan degresi termal yang baik, biasanya SiO<sub>2</sub> ini digunakan sebagai bahan pembuatan keramik. Secara teoritis, unsur SiO<sub>2</sub> mempunyai sifat menambah kekuatan lentur adonan keramik dan produk keramik. Akibat adanya proses penguapan dari proses pembakaran maka dengan leburan SiO<sub>2</sub> rongga kosong menjadi lebih rapat (Nura Y, 2019).

## II.8 Kinerja Perkerasan

Kinerja perkerasan jalan adalah merupakan fungsi dari kemampuan relatif dari perkerasan untuk melayani lalu lintas dalam suatu periode tertentu. Kinerja

perkerasan jalan ditentukan berdasarkan persyaratan kondisi fungsional dan kondisi struktural. (Sasuwuk dkk., 2019)

### 1. Kinerja Fungsional

Kinerja fungsional menyangkut kerataan, kekesatan permukaan perkerasa. Kinerja perkerasan lentur secara fungsional dapat dinyatakan dalam Indeks Permukaan (IP) / *Present Serviceability Index* dan Indeks kondisi jalan (RCI) / *Road Condition Index* (Sasuwuk dkk, 2019).

### 2. Kinerja Struktural

Kondisi struktural menyangkut kekuatan atau daya dukung perkerasan, sedangkan dalam melayani beban dan volume lalu lintas digunakan untuk membantu dalam penentuan penanganan dalam kegiatan penyelenggaraan jalan (Hicks and Mahoney, 1981) (dalam (Sasuwuk dkk,2019).

Perbedaan kinerja struktural dan fungsional perkerasan jalan mencakup berbagai aspek. Kinerja struktural terkait dengan keamanan atau kekuatan perkerasan yang dinilai dari kerusakan, seperti kerusakan pada struktur perkerasan atau gangguan pada satu atau lebih komponen penting yang menyebabkan ketidakmampuan perkerasan menopang beban di atasnya. Sementara itu, kinerja fungsional perkerasan diukur menggunakan indeks permukaan (IP) atau *present serviceability index* dan indeks kondisi jalan (RCI). Kinerja fungsional menunjukkan ketidakmampuan perkerasan untuk berfungsi dengan baik tanpa menyebabkan ketidaknyamanan bagi penumpang atau tekanan tinggi pada kendaraan yang melintas, yang berkaitan dengan kekasaran permukaan jalan.

## **II.9 Pengujian Marshall**

Pengujian *Marshall* atau *Marshall Test* merupakan pengujian yang bertujuan menentukan ketahanan (stabilitas) terhadap kelelahan plastis (*flow*) dari suatu campuran aspal. Pengujian *Marshall* dilakukan agar dapat mengetahui hasil kepadatan dan pori dari campuran padat yang terbentuk agar kemudian bisa di analisa lebih lanjut.

Dalam hal ini benda uji atau briket beton aspal padat dibentuk dari gradasi agregat campuran tertentu sesuai dengan spesifikasi campuran yang ada. Sebelum membuat briket campuran perkerasan maka perkiraan kadar aspal optimumnya (KAO) dicari dengan menggunakan rumus pendekatan. Dalam pengujian Marshall di butuhkan alat Marshall itu sendiri yang merupakan alat tekan yang dilengkapi dengan proving ring (cincin penguji) berkapasitas 22.2 KN (5000 lbs) dan *flowmeter*. Proving ring digunakan untuk mengukur nilai stabilitas, dan *flowmeter* untuk mengukur kelelahan plastis atau flow. Benda uji *Marshall* berbentuk silinder dengan diameter 4 inchi (10.2 cm) dan tinggi 2.5 inchi (6.35 cm).

Dalam pengujian *Marshall* ini meliputi beberapa tahapan pengujian seperti persiapan benda uji, penentuan berat jenis bulk dari benda uji, pemeriksaan nilai stabilitas dan *flow* dan perhitungan sifat volumetrik benda uji. Berikut beberapa hal-hal yang perlu diperhatikan dalam persiapan benda uji:

1. Jumlah benda uji yang disiapkan (ditentukan dari tujuan dilakukannya pengujian tersebut).
2. Persiapan agregat yang akan digunakan
3. Penentuan temperatur pencampuran dan pemadatan
4. Persiapan campuran aspal
5. Pemadatan benda uji
6. Persiapan untuk pengujian *marshall*



**Gambar 2. 13** Alat Uji Marshall

**Sumber:** Yanisman (2020)

Jumlah benda uji yang disiapkan ditentukan dari tujuan dilakukannya uji *Marshall* tersebut. AASHTO menetapkan minimal 3 buah benda uji untuk setiap kadar aspal yang digunakan. Agregat yang akan digunakan dalam campuran dikeringkan di dalam oven pada temperatur 105-110°C. Setelah dikeringkan agregat dipisahpisahkan sesuai fraksi ukurannya dengan menggunakan saringan. Temperatur pencampuran bahan aspal dengan agregat adalah temperatur pada saat aspal mempunyai viskositas kinematis sebesar  $170 \pm 20$  centistokes, dan temperature pemadatan adalah temperatur pada saat aspal mempunyai nilai viskositas kinematis sebesar  $280 \pm 30$  centistokes.

## II.10 Pengujian Cantabro Loss

Pengujian *Cantabro Loss* bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan campuran dalam mempertahankan bentuk dan beratnya dari keausan akibat repetisi beban, yang diuji menggunakan mesin *Los Angeles*. Pengujian ini juga merupakan salah satu parameter untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) pada aspal berpori, sesuai dengan persyaratan *Australian Asphalt Pavement Association* (2004), yaitu kurang dari 35%. (Nashir, 2013).



**Gambar 2. 14** Mesin Los Angeles

**Sumber :** (Penelitian di Laboratorium Universitas Diponegoro,2022)

## II. 11 Pengujian Asphalt Drain Down

Uji *drain down* ini digunakan untuk menentukan jumlah *drain down* campuran beraspal yang sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Pengujian ini

dilakukan pada campuran dengan kandungan agregat kasar yang tinggi (rongga udara campuran lebih besar, sehingga *drain down* lebih besar). Uji yang dikembangkan oleh AASHTO, yaitu AASHTO T305, merupakan antisipasi terhadap kondisi yang mungkin terjadi saat proses produksi, penyimpanan, pengangkutan, dan penghamparan campuran. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengevaluasi potensi *drain down* campuran beraspal selama desain campuran dan/atau selama produksi di lapangan. Uji *drain down* dilakukan pada campuran dengan kadar aspal optimum untuk memastikan bahwa pengaliran aspal yang terjadi pada campuran sesuai dengan spesifikasi yang ada. (Fatha Abdillah dkk, 2018).



**Gambar 2. 15** Drain Down Basket

**Sumber :** (Fatha Abdillah dkk., 2018)

## II.12 Pengujian *Particle Size Analyzer* (PSA)

- a. Pengujian Ukuran dan Distribusi Partikel Menggunakan Alat *Particle Size Analyzer* (PSA) Secara Otomatis
  - Sebelum digunakan, alat PSA dipanaskan terlebih dahulu selama  $\pm 20$  menit.
  - Setelah itu, perangkat komputer yang terhubung dengan alat dinyalakan.
  - Kemudian mulai dilakukan pengaturan pada alat. Untuk pertama kali digunakan cara otomatis dengan bentuk grafik distribusi *standard*.

- Larutan standar 20 kali pengenceran dikocok menggunakan *vortex mixer* selama  $\pm 1$  menit.
- Kemudian dimasukkan ke dalam *cuvet* bersih hingga terisi  $2/3$  *cuvet*.
- Setelah itu *cuvet* yang berisi larutan standar di masukkan kedalam alat dan ditutup dengan sebuah sensor.
- Sebelum diukur, suhu dikondisikan terlebih dahulu pada 25 o C dengan menekan menu “Temp.Panel”.
- Standar mulai diukur dengan menekan menu “Auto1”. Maka secara otomatis alat akan mengukur besarnya ukuran partikel sebanyak enam kali pengukuran.
- Prosedur yang sama dilakukan terhadap larutan standar 200 kali pengenceran dan 2000 kali pengenceran. Prosedur selanjutnya menggunakan cara otomatis dengan bentuk distribusi *sharp*.
- Prosedur dilakukan sama dengan pada metode otomatis pertama, tetapi pengaturan grafik distribusi diganti dengan bentuk *sharp*.

b. Pengujian Ukuran dan Distribusi Partikel Menggunakan Alat *Particle Size Analyzer* (PSA) Secara Manual

Variasi selanjutnya adalah pengukuran menggunakan cara manual.

- Pertama, metode manual dengan bentuk distribusi grafik *standard*. Larutan standar 20 kali pengenceran dikocok menggunakan *vortex mixer* selama  $\pm 1$  menit.
- Kemudian dimasukkan ke dalam *cuvet* bersih hingga terisi  $2/3$  *cuvet*.
- Setelah itu *cuvet* yang berisi larutan standar di masukkan kedalam alat dan ditutup dengan sebuah sensor.
- Sebelum diukur, suhu dikondisikan terlebih dahulu pada 25<sup>o</sup> C dengan menekan menu “Temp.Panel”.
- Standar mulai diukur dengan menekan menu “Meas.Panel”. Maka alat akan mengukur sebanyak satu kali pengukuran.
- Selanjutnya *cuvet* dikeluarkan dan larutan standar dimasukkan kembali ke dalam *vial*. Selang beberapa menit standar diukur kembali dengan prosedur yang sama. Begitu seterusnya sampai enam kali pengukuran.

- Prosedur yang sama dilakukan terhadap larutan standar 200 kali pengenceran dan 2000 kali pengenceran.
- Kedua, cara manual dengan bentuk distribusi grafik *sharp*. Prosedur dilakukan sama dengan pada metode manual pertama, tetapi pengaturan gravik distribusi diganti dengan bentuk *sharp*. (Nuraeni et al., 2013)

### **II.13 Pengujian *Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDS)**

Prinsip kerja alat ini adalah sumber elektron dari filament yang terbuat dari *tungsten* memancarkan berkas elektron. Jika elektron tersebut berinteraksi dengan bahan (*specimen*) maka akan menghasilkan elektron sekunder dan sinar-X karakteristik. *Scanning* pada permukaan bahan yang dikehendaki dapat dilakukan dengan mengatur *scanning generator* dan *scanning coils*. Elektron sekunder hasil interaksi antara elektron dengan permukaan *specimen* ditangkap oleh detektor SE (*Secondary 24 Electron*) yang kemudian diolah dan diperkuat oleh *amplifier* dan kemudian divisualisasikan dalam monitor sinar katoda (CRT) (Smallman & Bishop, 1999). Setiap jumlah sinar yang dihasilkan dari CRT dihubungkan dengan jumlah target, jika terkena berkas elektron berenergi tinggi dan menembus permukaan target, karena terjadi ionisasi atom dari cuplikan padatan. Elektron bebas ini tersebar keluar dari aliran sinar utama, sehingga tercipta lebih banyak elektron bebas, dengan demikian energinya habis lalu melepaskan diri dari target. Elektron ini kemudian dialirkan ke unit demagnifikasi dan dideteksi oleh detektor dan selanjutnya dicatat sebagai suatu foto (Wagiyo, 1997).

### **II.14 Studi Terdahulu**

Studi terdahulu adalah beberapa temuan penelitian yang digunakan untuk mempelajari lebih lanjut dan berkaitan dengan topik skripsi ini. Dibawah ini adalah studi terdahulu yang diambil diantaranya:

- 1. Evaluasi Kinerja Fungsional Campuran Porous Asphalt Dengan Substitusi Material SIO<sub>2</sub> Sebagai Filler Berdasarkan Gradasi Jepang** (Putri, 2023)  
 Penelitian ini menguji tiga variasi persentase penambahan SiO<sub>2</sub>, yaitu 0%, 2%, dan 3%, dalam campuran aspal pen 60/70. Parameter yang diuji meliputi Uji

Marshall, Permeabilitas, Cantabro Loss, dan Asphalt Flow Down. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 2% SiO<sub>2</sub> sebagai filler pada campuran aspal porus meningkatkan nilai stabilitas campuran hingga 635,8 kg. Pengujian Cantabro Loss dan Asphalt Flow Down menunjukkan bahwa penambahan 2% SiO<sub>2</sub> mampu mengikat aspal dan agregat dengan baik dibandingkan dengan variasi 0% dan 3%. Penambahan SiO<sub>2</sub> juga menyebabkan penurunan nilai Void In Mix (VIM) dan permeabilitas, namun masih dalam batas spesifikasi yang diinginkan, sehingga kinerja fungsional campuran tetap tercapai. Kesimpulan dari penelitian ini adalah penggunaan SiO<sub>2</sub> sebagai filler pada campuran aspal porus efektif meningkatkan kualitas perkerasan jalan. Disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi persentase yang berbeda dan mempertimbangkan penggunaan SiO<sub>2</sub> pada campuran aspal konvensional. Temuan ini berpotensi meningkatkan kualitas perkerasan jalan.

**2. Sustainable asphalt mixtures: enhancing environmental impact by partial fine aggregate substitution with rubber powder and bitumen modification using Nano-SiO<sub>2</sub> (Alizadeh dkk., 2023)**

Dalam penelitian ini menguji bahwa penggunaan campuran aspal yang dimodifikasi dengan 1,2% Nano-SiO<sub>2</sub> dan 3% bubuk karet bekas sebagai pengganti agregat halus dapat meningkatkan kualitas dan kinerja mekanik campuran aspal. Modifikasi ini tidak hanya mengurangi penggunaan agregat alami dan biaya produksi, tetapi juga memanfaatkan limbah karet, sehingga memberikan manfaat lingkungan. Campuran ini menunjukkan peningkatan ketahanan lelah sekitar 5% dan ketahanan alur sekitar 17% lebih tinggi dibandingkan dengan campuran tanpa bahan tambahan, menjadikannya solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk perkerasan jalan.

**3. Resilient modulus prediction of nano-silica modified porous asphalt using Finite Element Analysis (Al-Akhshar dkk., 2021)**

Penelitian ini adalah bahwa penambahan partikel Nano-silika (NS) dalam campuran aspal berpori (PA) secara signifikan meningkatkan modulus resilien, kekuatan, dan kualitas campuran. Penelitian ini menunjukkan bahwa PA yang

dimodifikasi dengan 2% NS memiliki modulus ketahanan sebesar 4357 Mpa, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan PA yang tidak dimodifikasi, yang hanya mencapai 3001 Mpa. Dengan demikian, Nano-silika direkomendasikan sebagai bahan aditif yang efektif untuk meningkatkan performa PA di bawah kondisi lalu lintas padat.

**4. Moisture susceptibility of porous asphalt mixture with Nano silica modified asphalt binder** (Masri et al., 2019)

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan nanosilika (NS) sebagai bahan aditif dalam campuran aspal berpori (PA) dapat meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan akibat kelembaban. Dengan persentase NS sebesar 2%, nilai TSR (Tensile Strength Ratio) maksimum yang diperoleh adalah 91%, dibandingkan dengan 74% pada PA konvensional tanpa NS. Hal ini menunjukkan bahwa nanosilika efektif dalam meningkatkan kekuatan dan daya tahan PA terhadap kelembaban, dengan konsentrasi optimal 2% untuk mengatasi kerusakan akibat kelembaban.

**5. Improving strength of porous: a nano material experimental approach** (Pradoto dkk., 2019)

Penelitian ini menguji bahwa aspal berpori (PA) yang dimodifikasi dengan nano fly ash (FA) kelas F yang telah diolah menunjukkan peningkatan stabilitas dan penurunan permeabilitas dibandingkan dengan PA konvensional dan PA yang menggunakan FA alami. Penggunaan nano FA yang diolah sebagai bahan pengisi alternatif dalam campuran aspal berpotensi meningkatkan kekuatan dan daya tahan PA. Untuk mencapai hasil optimal, jumlah nano FA yang diolah yang ditambahkan ke dalam campuran aspal sebaiknya kurang dari 200 gram.

**6. Application of Nanotechnology to improve the performance of asphalt materials** (Abdelaleemabou dkk., 2016)

Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa pencampuran nanosilika dan tanah liat dengan aspal pada persentase yang berbeda menunjukkan variasi signifikan dalam sifat viskositas, penetrasi, titik pelunakan, titik nyala, dan stabilisasi Marshall dari aspal yang dimodifikasi. Pengujian menunjukkan

bahwa perbedaan ini sangat dipengaruhi oleh jenis aspal, jenis bahan nano, dan persentase bahan tambahan. Dari hasil percobaan, dapat disimpulkan bahwa baik nanosilika maupun tanah liat berpengaruh positif terhadap peningkatan sifat mekanik aspal, dengan perbedaan yang mencolok tergantung pada jenis dan persentase bahan yang digunakan. Penelitian ini memberikan wawasan tentang pengaruh spesifik dari masing-masing bahan nano terhadap kinerja aspal, yang dapat membantu dalam pengembangan campuran aspal yang lebih tahan lama dan efisien.

**7. Mechanical properties of porous asphalt with nanosilica modified binder**  
(Azman M dkk., 2016)

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan nanosilika (NS) dengan ukuran rata-rata 10 hingga 15 nanometer dapat meningkatkan kinerja aspal berpori (PA). Pengujian menunjukkan bahwa 4% NS efektif dalam mengurangi kerugian abrasi dan pengurasan bahan pengikat. NS-PA dengan 2% NS mencapai nilai modulus resilien maksimum 4362 MPa dan TSR 91%, jauh lebih baik dibandingkan PA konvensional tanpa NS yang memiliki nilai modulus resilien 3036 MPa dan TSR 74%. Dengan demikian, penambahan 2% NS dalam campuran PA secara signifikan meningkatkan sifat fisik dan reologi pengikat aspal, serta meningkatkan keseluruhan kinerja PA.

**Tabel 2. 6** Resume Jurnal Penelitian Terdahulu

| No | Tahun | Judul Penelitian   | Metode       | Hasil Penelitian   | Gap Penelitian   |   |
|----|-------|--|--------------|--|--|---|
|    |       |  |              |  | Bahan Tambah   | Penelitian penulis  |
| 1  | 2023  | Evaluasi Kinerja Fungsional Campuran Porous Asphalt Dengan Subtitusi Material SIO2 Sebagai Filler Berdasarkan Gradasi Jepang | Uji Marshall | Nilai persentase optimum pada campuran aspal porus dengan penambahan SiO2 sebagai filler yaitu variasi 2%  | Penggunaan SiO2 sebesar 0%, 2%, 3%                               | Bahan tambah yang digunakan yaitu silika ukuran nano dengan gradasi Australia |
| 2  | 2023  | Sustainable asphalt mixtures: enhancing environmental impact by partial fine aggregate                                       | Uji Marshall | Campuran aspal yang mengandung 3% bubuk karet dan 1,2% Nano SiO2 dianggap sebagai kombinasi paling optimal untuk mengatasi masalah bekas roda dan kelelahan. | Campuran aspal yang mengandung 3% bubuk karet dan 1,2% Nano SiO2 |   |

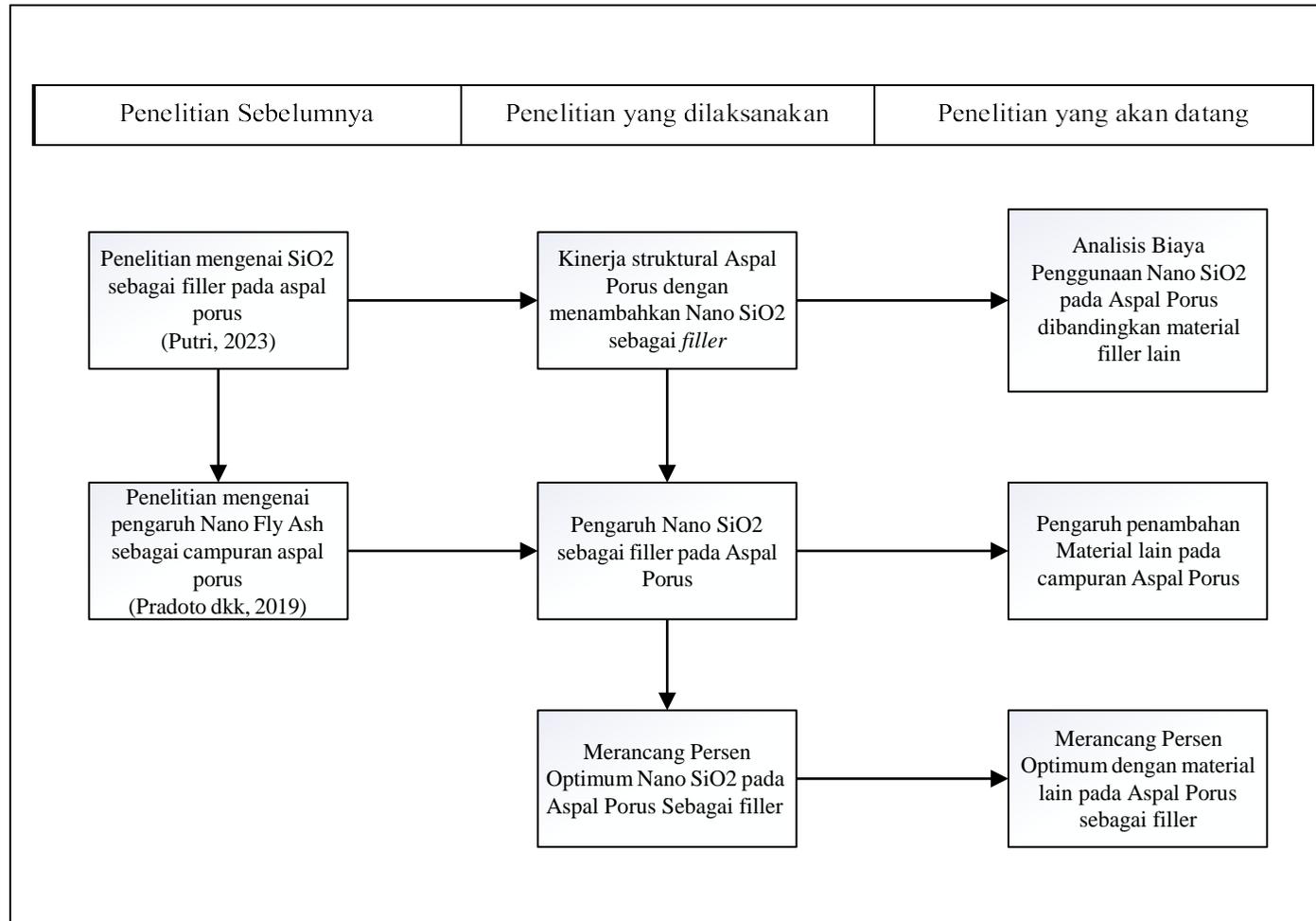
|   |      |   |   |   |   |   |
|---|------|---|---|---|---|---|
|   |      | substitution with rubber powder and bitumen modification using Nano-SiO <sub>2</sub>              |   |   |   |   |
| 3 | 2021 | Resilient modulus prediction of nano-silica modified porous asphalt using Finite Element Analysis | Modeling di aplikasi                        | Modifikasi aspal berpori (PA) dengan 2% nanosilika (NS) secara signifikan meningkatkan modulus ketahanan dibandingkan dengan PA yang tidak dimodifikasi | Modifikasi aspal berpori (PA) dengan 2% nanosilika (NS) | Bahan tambah yang digunakan yaitu silika ukuran nano dengan gradasi Australia |
| 4 | 2019 | Moisture susceptibility of porous asphalt mixture with  | Uji ITS (Tarik Tidak Langsung), Uji Lottman | Jumlah optimal Nano SiO <sub>2</sub> yang diperlukan dalam aspal porus untuk menahan  | Penggunaan 0% - 6% Nano SiO <sub>2</sub>                |   |

|   |      |   |  |   |   |   |
|---|------|---|--|---|---|---|
|   |      | Nano silica modified asphalt binder   |  | kerusakan akibat kelembaban adalah 2%.  |   |   |
| 5 | 2019 | Improving strength of porous: a nano material experimental approach           | Uji Marshall, Uji Cantabro Loss, Uji Permeabilitas | Studi ini menunjukkan bahwa nilai stabilitas dan penurunan permeabilitas lebih tinggi pada campuran dengan kandungan bahan filler nano fly ash yang dimodifikasi dibandingkan dengan campuran standar dan campuran yang menggunakan fly ash alami, meskipun kadar aspal optimal (KAO) tetap sama. | Penggunaan Nano Fly Ash 18% (kelas F) dan Fly Ash 3.6% yang telah digiling. | Bahan tambah yang digunakan yaitu silika ukuran nano dengan gradasi Australia |
| 6 | 2016 | Application of Nanotechnology to improve the performance of asphalt materials | Uji Marshall                                       | Viskositas aspal meningkat setelah ditambahkan nano SiO <sub>2</sub> dan nano tanah liat. Penetrasi aspal meningkat setelah penambahan nano SiO <sub>2</sub> , namun menurun setelah penambahan jenis nano clay. Titik pelunakan aspal  | Membandingkan bahan aditif nano SiO <sub>2</sub> dan nano clay              |   |

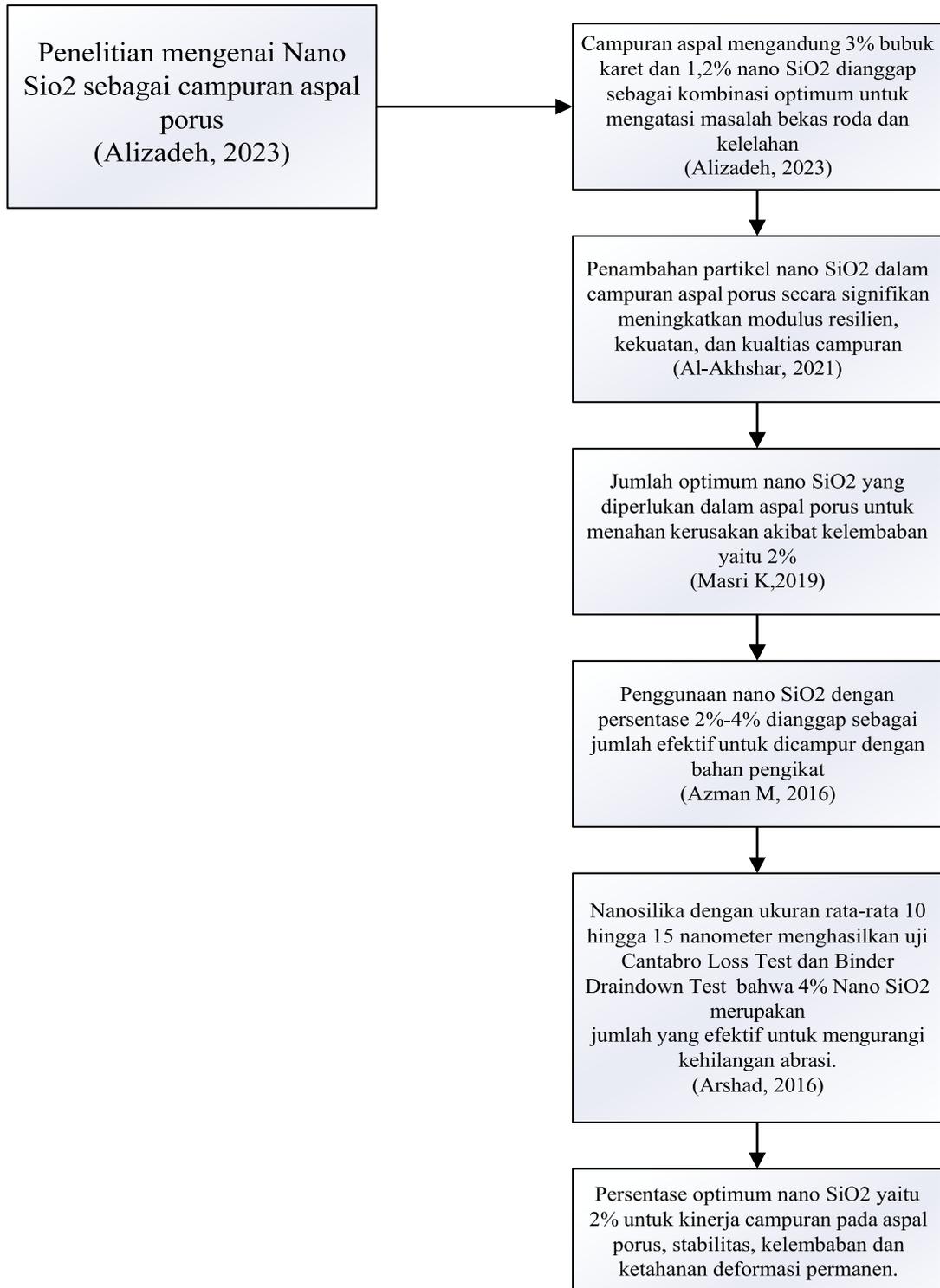
|   |      |   |                                   |  |                               |   |
|---|------|---|-----------------------------------|--|-------------------------------|---|
|   |      |   |                                   | meningkat setelah ditambahkan nano SiO <sub>2</sub> tetapi tidak berubah dengan penambahan nano tanah liat. Stabilitas campuran aspal juga meningkat setelah penambahan nano SiO <sub>2</sub> dan nano tanah liat. |                               | Bahan tambah yang digunakan yaitu silika ukuran nano dengan gradasi Australia |
| 7 | 2016 | Mechanical properties of porous asphalt with nanosilica modified binder | Marshall Test, Cantabro Loss test | Empat pengujian membuktikan bahwa 2%-4% nano SiO <sub>2</sub> dianggap sebagai jumlah yang efektif untuk dicampur dengan bahan pengikat.   | 2% - 4% nano SiO <sub>2</sub> |   |

## II.15 Road Map Penelitian

Tabel 2. 7 Tabel Roadmap Penelitian



## II.16 Hubungan Penelitian Nano SiO<sub>2</sub>



**Gambar 2. 16** Hubungan Penelitian Nano SiO<sub>2</sub> dengan Aspal Porus