

BAB II

STUDI PUSTAKA

II.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan adalah struktur yang diletakkan di atas tanah dasar (*subgrade*). Lapisan perkerasan berfungsi untuk mendistribusikan beban roda agar tanah dasar tidak mengalami deformasi selama masa pakai perencanaan, serta melindungi tanah dasar dan lapisan-lapisan perkerasan dari kerusakan akibat beban lalu lintas. (Mahisza et al., 2013). Berdasarkan jenis perkerasan, struktur perkerasan jalan dapat dibedakan menjadi 3 yaitu :

1. Konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*) adalah jenis perkerasan yang biasanya terdiri dari lapisan permukaan aspal, lapisan pondasi, dan lapisan pondasi bawah yang granular, semuanya diletakkan di atas tanah dasar.



Gambar II. 1 Struktur perkerasan lentur pada tanah asli



Gambar II. 2 Struktur perkerasan lentur pada timbunan



Gambar II. 3 Struktur perkerasan lentur pada galian

Sumber : Brilliant Gery (2020)

2. Konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*) adalah jenis perkerasan yang terdiri dari lapisan permukaan yang biasanya berupa pelat beton, baik yang bertulang maupun tidak, serta dilengkapi dengan pondasi atas dan pondasi bawah. Perkerasan ini cocok digunakan untuk jalan raya dengan volume lalu lintas yang tinggi.



Gambar II. 4 Struktur perkerasan kaku pada tanah asli



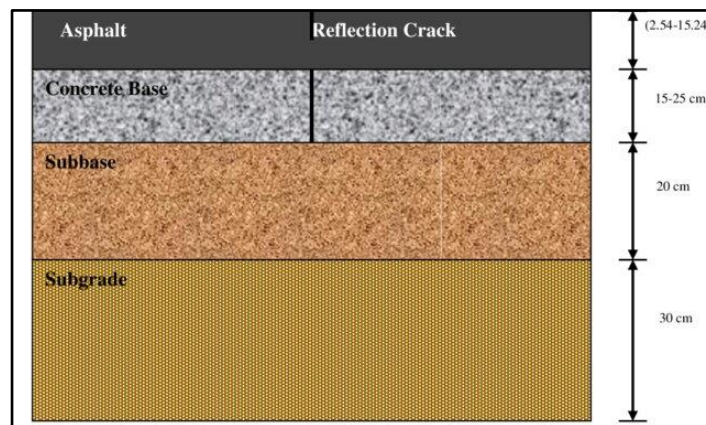
Gambar II. 5 Struktur perkerasan kaku pada timbunan



Gambar II. 6 Struktur perkerasan kaku pada galian

Sumber : Manual Desain Perkerasan Jalan (2013)

3. Konstruksi perkerasan komposit (*composite pavement*) adalah jenis perkerasan yang menggabungkan perkerasan kaku dan perkerasan lentur. Ini melibatkan lapisan aspal beton serta lapisan pondasi yang menggunakan bahan perawatan dari aspal atau semen.



Gambar II. 7 Susunan Lapisan Perkerasan Komposit

Sumber : Zinab Ahmed (2009)

II.2 Aspal

Aspal adalah bahan padat atau setengah padat berwarna hitam hingga coklat gelap, yang bersifat perekat (*cementitious*) dan akan melunak serta meleleh saat dipanaskan. Aspal terutama terdiri dari bitumen, yang dapat berupa bentuk padat atau setengah padat yang ditemukan di alam atau hasil pemurnian minyak bumi, atau campuran dari bitumen dengan minyak bumi atau turunannya. (ASTM, 1994). Aspal memiliki sifat termoplastis, berupa padat hingga agak padat pada suhu ruang dan akan membeku saat suhu turun. Dalam perkerasan, penggunaan aspal hanya sekitar 4-10% berdasarkan berat dan 10-15% berdasarkan volume..

II.2.1 Fungsi Aspal

Fungsi utama aspal adalah sebagai bahan pengikat dalam campuran, sebagai lapisan pelindung pada permukaan untuk mencegah gesekan langsung dengan agregat, dan sebagai bahan elastis dalam perkerasan lentur. (H.W Santoso, 2003). Aspal yang digunakan sebagai material perkerasan jalan berfungsi sebagai :

- Sebagai bahan pengisi, mengisi rongga antar butir-butir agregat dan pori-pori yang ada dari agregat itu sendiri.
- Sebagai bahan pengikat antara agregat maupun antara aspal itu sendiri.

Dengan menambahkan aspal ke dalam campuran, diharapkan lapisan perkerasan menjadi kedap air dan mampu mendukung arus lalu lintas selama masa pakainya.

Oleh karena itu, aspal harus tahan terhadap kondisi cuaca dan tidak mudah mengalami kerusakan.

II.2.2 Sifat-Sifat Aspal

Untuk dapat memenuhi fungsi aspal dengan baik, maka aspal haruslah memiliki sifat sebagai berikut :

1. Kohesi dan Adhesi

Kohesi adalah kemampuan aspal untuk menjaga agregat tetap di tempatnya setelah proses pengikatan, sedangkan adhesi adalah kemampuan aspal untuk mengikat agregat sehingga menciptakan ikatan yang kuat antara agregat dan aspal.

2. Daya Tahan (*Durability*)

Daya tahan (*durability*) adalah kemampuan aspal untuk menahan keausan yang disebabkan oleh faktor cuaca, air, perubahan suhu, serta keausan akibat gesekan roda kendaraan.

3. Kekerasan Aspal

Selama proses pencampuran, aspal dipanaskan dan dicampur dengan agregat sehingga aspal panas dituangkan ke atas agregat yang telah dipersiapkan. Proses pemanasan ini menyebabkan pengerasan aspal, yang mengakibatkan perapuhan terus berlanjut bahkan setelah perkerasan selesai.

4. Kepekaan terhadap Suhu

Aspal adalah bahan termoplastis, yang berarti ia akan mengeras atau menjadi kental saat suhu menurun dan akan melunak atau menjadi lebih cair saat suhu meningkat.

II.2.3 Jenis Aspal

Perkerasan jalan dapat menggunakan berbagai jenis aspal, yaitu:

1. Aspal Alam

Aspal alam dapat ditemukan di berbagai lokasi, seperti dari gunung-gunung di Pulau Buton dan dari danau-danau seperti di Trinidad. Aspal alam terbesar di dunia adalah aspal dari Danau Trinidad (*Trinidad Lake Asphalt*). Di Pulau

Buton, aspal alam dari gunung dikenal sebagai Asbuton (Aspal Batu Buton), yaitu batu yang mengandung aspal (C. Yutomo, 2019). Asbuton terdiri dari dua komponen utama, yaitu bitumen dan mineral, dengan kandungan mineral sekitar 70-85% dan bitumen sekitar 15-30%. Penggunaan Asbuton sebagai bahan aditif dalam pembuatan jalan (aspal) dapat mempengaruhi kualitas campuran, yang terlihat dari peningkatan nilai fleksibilitas, stabilitas, dan daya tahan (*durability*) campuran. (Rucita et al., 2024).



Gambar II. 8 Aspal Buton

Sumber : Direktorat Jendral Bina Konstruksi (2021)

2. Aspal Buatan

Aspal buatan diperoleh melalui proses distilasi minyak bumi, di mana pemanasan dilakukan pada suhu 350°C di bawah tekanan atmosfer untuk memisahkan fraksi-fraksi ringan seperti bensin, minyak tanah, dan gas oil. Proses distilasi ini menghasilkan tiga jenis aspal dari minyak tanah mentah. (Suryadharma, 2008), yaitu:

- a. Aspal emulsi (emulsion asphalt)
- b. Aspal dingin/cair (cutback asphalt)
- c. Aspal keras/panas (asphalt cement, AC)

Jenis aspal yang paling umum digunakan adalah aspal keras (AC). Jenis aspal ini berbentuk padat pada suhu antara 25°C hingga 30°C . Di Indonesia AC terdiri dari beberapa jenis, yaitu:

- a. AC pen 40/50
- b. AC pen 60/70
- c. AC pen 80/100
- d. AC pen 120/150
- e. AC pen 200/300

Di Indonesia, umumnya digunakan aspal AC pen 60/70 atau AC pen 80/100. Persyaratan umum untuk aspal AC adalah berasal dari distilasi minyak bumi, memiliki sifat yang seragam, kandungan parafinnya tidak lebih dari 2%, dan tidak boleh mengandung air atau busa pada suhu 175°C. (Setiobudi, 2017)

II.2.4 Campuran Aspal

- 1) Komposisi Umum Campuran Campuran beraspal dapat terdiri dari agregat, bahan aditif, dan aspal,
- 2) Kadar Aspal dalam Campuran Presentase aspal yang actual ditambahkan ke dalam campuran di tentukan berdasarkan percobaan labratorium dan lapangan sebagaimana tertuang rencana campuran kerja (JMF) dengan mempertahankan penyerapan agregat yang digunakan.
- 3) Prosedur Rancangan Campuran
 - a. Sebelum diizinkan untuk menyebarkan campuran beraspal dalam pekerjaan, penyedia jasa harus menunjukkan semua usulan agregat dan campuran yang sesuai. Ini meliputi pembuatan dan pengujian campuran percobaan di laboratorium, serta penghamparan campuran percobaan di fasilitas pencampuran aspal.
 - b. Pengujian yang diperlukan meliputi analisis ayakan, berat jenis, penyerapan air, dan semua jenis pengujian lainnya yang diatur dalam bagian ini untuk semua agregat, aspal, dan bahan pengisi (*filler*) yang digunakan. Pengujian pada campuran beraspal percobaan akan meliputi penentuan berat jenis maksimum campuran beraspal (SNI 03- 6893-2002), pengujian sifat-sifat marshall (SNI 06-2489-1990). Untuk pengujian *draindown* mengikuti dalam ketentuan AASHTO T 305-97.

- c. Contoh agregat untuk rancangan campuran harus diambil dari pemasok dingin (*cold bin*) dan penampung panas (*hot bin*). Rumusan campuran yang ditentukan di laboratorium dianggap sementara hingga dikonfirmasi oleh hasil percobaan di fasilitas pencampuran aspal serta percobaan penghamparan dan pemadatan di lapangan.
- d. Pengujian percobaan penghamparan dan pemadatan lapangan harus dilaksanakan dalam tiga langkah dasar sebagai berikut:
 - Penentuan proporsi takaran agregat dari pemasok dilakukan untuk menghasilkan komposisi yang optimal. Perhitungan proporsi takaran agregat dari bahan tumpukan yang optimal harus digunakan untuk menentukan bukaan awal pada pemasok dingin. Setelah itu, proporsi takaran pada pemasok panas dapat ditetapkan. Rumusan campuran rancangan *Design Mix Formula* (DMF) kemudian akan ditentukan berdasarkan prosedur Marshall.
 - DMF, beserta data dan grafik dari percobaan campuran di laboratorium, harus diserahkan kepada direksi pekerjaan untuk mendapatkan persetujuan. Direksi pekerjaan kemudian akan memutuskan apakah akan menyetujui atau menolak usulan DMF tersebut.

II.2.5 Pengujian Pada Aspal

Aspal adalah material yang sangat sensitif terhadap suhu; pada suhu tinggi, aspal akan melunak atau meleleh, sedangkan pada suhu rendah, aspal akan mengeras. Menurut Sukirman (2003), sensitivitas aspal terhadap suhu mempengaruhi umur aspal menjadi keras. Parameter yang digunakan untuk mengukur sensitivitas aspal terhadap suhu adalah indeks penetrasi (PI = *penetration index*). Berikut ini penjelasan mengenai pengujian terhadap aspal antara lain:

1. Pengujian Penetrasi

Uji penetrasi atau kekerasan aspal perlu dilakukan untuk mengukur kekuatan aspal dalam mengikat agregat. Penetrasi adalah kedalaman yang dicapai oleh

jarum berdiameter 1 mm pada suhu 25°C dengan beban 100 gram selama 5 detik, diukur dalam satuan 0,1 mm..



Gambar II. 9 Alat Uji Penetrasi

Sumber : Dokumentasi Pribadi

2. Pengujian Titik Lembek Aspal

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



Gambar II. 10 Alat Uji Titik Lembek Aspal

Sumber : Dokumentasi Pribadi

3. Pengujian Daktilitas

Pengujian daktilitas menggunakan suhu dan kecepatan tertentu untuk mengukur jarak terpanjang yang dapat ditarik antara dua cetakan yang terisi aspal keras sebelum putus untuk mengetahui sifat kohesi aspal.



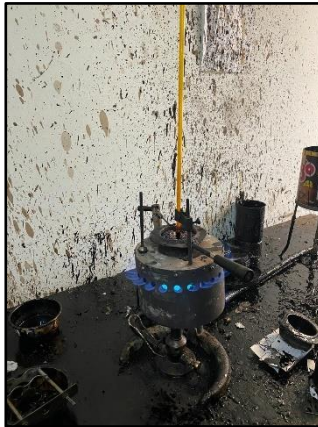
Gambar II. 11 Alat Uji Daktilitas

Sumber : Dokumentasi Pribadi

4. Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

Pengujian titik nyala dan titik bakar pada aspal dapat membantu menentukan suhu di mana aspal mulai menyala dan terbakar.

- a. Titik nyala adalah suhu pada saat terlihat nyala singkat kurang dari 5 detik di permukaan aspal.
- b. Titik bakar adalah suhu pada saat terlihat nyala sekurang-kurangnya 5 detik pada permukaan aspal.



Gambar II. 12 Alat Uji Titik Nyala dan Titik Bakar

Sumber : Dokumentasi Pribadi

5. Pengujian Berat Jenis

Berat jenis aspal didefinisikan sebagai perbandingan berat aspal atau ter dengan berat air suling dengan isi yang sama pada suhu tertentu. Dalam hal ini, berat air diganti dengan berat aspal atau ter dalam wadah yang sama. Nilai penetrasi dan suhu bitumen sangat mempengaruhi berat jenis aspal. Tujuan dari pengujian berat jenis aspal ini adalah untuk mengetahui berat jenis aspal dengan menggunakan piknometer dan dengan mempertimbangkan berat diudara dan berat di dalam air.



Gambar II. 13 Alat Benda Uji Berat Jenis

Sumber : Dokumentasi Pribadi

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 II. 14 Alat Uji Viskositas

Sumber : Dokumentasi Pribadi

II.3 Agregat

Agregat adalah bahan penting yang digunakan untuk konstruksi jalan raya dan digunakan sebagai bahan campuran beraspal, mortar atau beton. Menurut ukuran butiran, agregat digolongkan menjadi dua yaitu, agregat kasar dan agregat halus. Agregat adalah salah satu komponen utama pada perkerasan jalan yang menentukan daya dukung, mutu, kualitas dan keawetan suatu perkerasan. Maka dari itu diperlukan pengujian terhadap bahan agregat (Rahmawati, dkk 2021). Berikut agregat yang digolongkan menurut ukuran butirannya.

1. Agregat kasar

Agregat kasar merupakan batuan yang tertahan pada saringan No. 8 (2,36 mm), yang berfungsi untuk memberikan stabilitas campuran dengan mengunci masing-masing artikel agregat kasar.



Gambar II. 15 Agregat Kasar

Sumber : Adriyan & Januarti (2021)

2. Agregat Halus

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



Gambar II. 16 Agregat Halus

Sumber : Adriyan & Januarti (2021)

II.3.1 Jenis Jenis Agregat

Jenis agregat berbeda berdasarkan proses pembuatan, pengolahan, dan ukuran butirnya. Ada dua kategori agregat, agregat bergradasi baik dan agregat bergradasi buruk. Berikut adalah penjelasannya dari kedua gradasi:

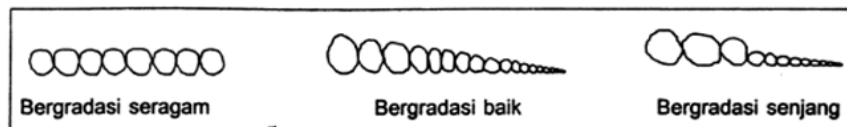
1. Agregat bergradasi baik

Agregat bergradasi baik juga disebut agregat bergradasi rapat adalah agregat yang ukurannya terdistribusi secara merata dalam rentang ukuran butirnya. Agregat bergradasi baik memiliki pori yang sedikit, stabilitas yang tinggi, dan mudah dipadatkan. Agregat bergradasi baik dibedakan atas, agregat bergradasi kasar adalah agregat yang memiliki susunan ukuran yang menerus dari kasar hingga halus, tetapi dominan berukuran kasar. Agregat bergradasi halus adalah agregat yang memiliki susunan ukuran yang menerus dari kasar hingga halus, tetapi dominan berukuran halus (Sukirman 2003).

2. Agregat bergradasi buruk

Agregat yang tidak memenuhi syarat untuk gradasi yang baik disebut agregat bergradasi buruk. Beberapa jenis gradasi agregat yang dapat dikategorikan ke dalam kategori ini adalah:

- a. Agregat bergradasi seragam, adalah agregat yang memiliki ukuran yang sama. Campuran agregat ini mempunyai pori antar butir yang cukup besar, sehingga sering dinamakan juga agregat bergradasi terbuka.
- b. Agregat bergradasi terbuka, adalah agregat yang hampir sama dengan agregat bergradasi seragam. Dimana memiliki pori yang cukup besar sehingga campuran tidak terisi dengan baik.
- c. Agregat bergradasi senjang, adalah agregat yang memiliki ukuran sama, namun distribusi ukuran butirnya tidak menerus, sehingga ada bagian ukuran-ukuran yang tidak ada.



Gambar II. 17 Rentang ukuran untuk berbagai gradasi

Sumber : Sukirman (2003)

Agregat bergradasi baik maupun buruk dapat diperiksa dengan menggunakan rumus Fuller:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,45} \quad (\text{II.1})$$

Dimana:

P = Persen lolos saringan dengan bukaan saringan d (mm)

D = Ukuran agregat yang diperiksa (mm)

D = Ukuran maksimum agregat yang terdapat dalam campuran (mm)

II.3.2 Pengujian Agregat

Pengujian agregat merupakan serangkaian tes yang bertujuan untuk menilai sifat fisik dan mekanik agregat. Berikut adalah beberapa pengujian utama yang dilakukan pada agregat:

1. Pengujian Berat Jenis Agregat

Berat jenis agregat adalah rasio antara berat volume agregat dengan berat volume air. Berat jenis agregat sangat penting dalam perhitungan desain campuran perkerasan jalan. Agregat dengan berat jenis kecil memiliki volume besar dan bobot ringan.

2. Pengujian Analisa Saringan

Uji analisa saringan agregat adalah metode yang digunakan untuk menentukan distribusi ukuran partikel dalam suatu sampel agregat. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa agregat memiliki gradasi yang sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan.

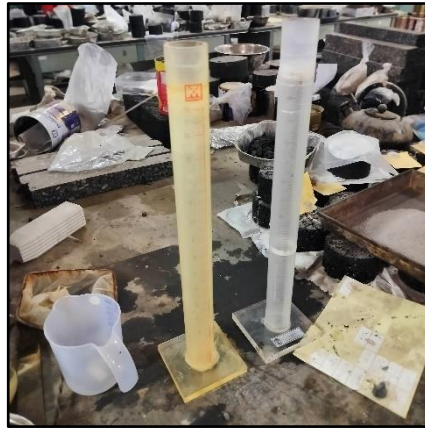


Gambar II. 18 Alat Uji Analisa Saringan

Sumber : UMY Repository (2020)

3. Pengujian *Sand Equivalent*

Pemeriksaan ini bertujuan untuk menentukan kadar debu atau bahan yang mempunyai lempung pada tanah atau agregat halus, adanya lumpur dapat mengakibatkan kembang susut yang besar dan mempengaruhi lekatan tanah agregat.



Gambar II. 19 Alat Uji *Sand Equivalent*

Sumber : Dokumentasi Pribadi

4. Pengujian Keausan atau Abrasi Agregat

Pengujian keausan agregat adalah metode yang digunakan untuk mengukur ketahanan agregat terhadap abrasi dan keausan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa agregat mampu menahan beban dan gesekan yang terjadi selama penggunaan.



Gambar II. 20 Mesin *Los Angeles*

Sumber : Dokumentasi Pribadi

5. Pengujian Kepipihan dan Kelonjongan

Pemeriksaan kepipihan dan kelonjongan agregat adalah metode yang digunakan untuk menentukan bentuk partikel agregat yang mungkin mempengaruhi sifat mekanik dan kinerja campuran aspal. Bentuk partikel yang pipih atau lonjong dapat mempengaruhi kepadatan, kekuatan, dan stabilitas campuran.

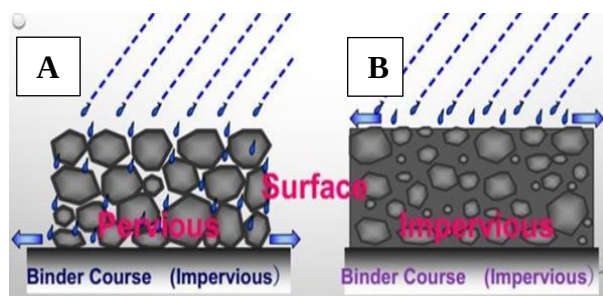


Gambar II. 21 lat Uji Kepipihan dan Kelonjongan

Sumber : Dokumentasi Pribadi

II.4 Aspal Porus

Aspal Porus adalah aspal yang dicampur dengan agregat tertentu yang setelah dipadatkan mempunyai 20 % pori-pori udara. Aspal porus umumnya memiliki nilai stabilitas marshall yang lebih rendah dari aspal beton yang menggunakan gradasi rapat, stabilitas marshall akan meningkat bila gradasi terbuka yang digunakan lebih banyak fraksi halus. Perkembangan selanjutnya aspal porus layak untuk meningkatkan kontak roda kendaraan dengan permukaan jalan. Aspal porus juga mengeliminasi pengkabutan di belakang kendaraan dan mengurangi kesilauan dari permukaan jalan pada siang dan malam hari, sehingga permukaan jalan lebih jelas kelihatannya (Falderika, 2017).



Gambar II. 22 Gradasi terbuka (A) ; Gradasi tertutup (B)

Aspal porus merupakan salah satu jenis campuran yang memiliki agregat kasar berkisar 70-85%, agregat halus berkisar 15- 30%. Aspal porus ini dikembangkan untuk konstruksi lapis permukaan menggunakan gradasi terbuka. Keunggulan dari campuran aspal porus adalah memiliki kekesatan permukaan (*skid resistance*) untuk menghindari slip pada roda kendaraan dan dapat mencegah terjadinya aquaplaning (Ayun, 2021).

II.4.1 Kelebihan dan Kekurangan

Dalam perkembangan teknologi perkerasan aspal porus, pasti memiliki kelebihan dan kekurangan dalam penggunaan aspal porus, antara lain:

1. Kelebihan penggunaan Aspal Porus menurut Herman (2017)
 - a. Mengurangi efek akibat genangan air apabila permukaan aspal terkena hujan.
 - b. Mengurangi efek percikan dan semprot (*splash and spray*) ketika kendaraan melewati permukaan aspal.
 - c. Mengurangi efek silau.
 - d. Pengurangan kebisingan
 - e. Memperkecil masalah dengan es pada saat musim hujan.
2. Kekurangan penggunaan Aspal Porus menurut Mayuni (2020)
 - a. Memiliki stabilitas rendah yang membuka peluang deformasi yang lebih besar.
 - b. Campuran cenderung mengalami tekanan yang tinggi akibat dari kadar rongga yang tinggi, sehingga membuka peluang terjadinya *rutting*.

II.4.2 Gradasi Aspal Porus

Campuran aspal porus menggunakan gradasi terbuka (*open graded*), sehingga campuran aspal porus disebut juga open graded asphalt. Campuran beraspal yang dibuat dengan gradasi ini bersifat porus atau memiliki permeabilitas yang tinggi, stabilitas yang rendah dan memiliki berat isi yang kecil. Gradasi agregat dan syarat campuran aspal porus yang digunakan dalam penelitian ini disesuaikan dengan spesifikasi Australia:

Tabel II. 1 Gradasi Campuran Aspal Porus Spesifikasi Australia

Saringan		Spesifikasi Lolos (%)		Tertahan
mm	#	Min	Max	(%)
19.000	3/4"	100		0
9.530	3/8"	85	100	7.5
4.760	No 4	20	45	60
2.380	No 8	10	20	17.5
1.190	No 16	6	14	5
0.595	No 30	5	10	2.5
0.279	No 50	4	8	1.5
0.149	No 100	3	7	1
0.074	No 200	2	5	1.5
PAN			0	3.5
TOTAL				100

Sumber : *Australian Asphalt Pavement Association (AAPA)*. (2004)

II.4.3 Kriteria Perencanaan Aspal Porus

Kriteria dalam merencanakan aspal porus mengacu pada spesifikasi *Australian Asphalt Pavement Association (AAPA)* tahun 2004.

Tabel II. 2 Gradasi Campuran Aspal Porus Spesifikasi Australia

No	Kriteria Perencanaan	Nilai
1	Koefisien Permeabilitas	0.1 - 0.5 cm/s
2	Kadar Rongga di Dalam Campuran (VIM %)	18 - 25
3	Stabilitas Marshall (kg)	Min. 500
4	Kelelehan Marshall (mm)	2 - 6
5	Marshall Question (mm)	Maks. 400
6	Jumlah Tumbukan Perbidang	50

Sumber : *Australian Asphalt Pavement Association (AAPA)*. 2004

II.5 Filler

Filler atau bahan pengisi diartikan sebagai fraksi debu mineral yang mampu melewati saringan no. 200 (0.075 mm) dengan berat tidak kurang dari 75%. Jenisnya bisa berupa debu kapur, debu dolomit, atau semen Portland. *Filler* harus dalam keadaan kering dengan kadar air maksimum 3% dari berat total agregat. Dalam campuran, *filler* berperan untuk memodifikasi agregat halus sehingga

meningkatkan berat jenis campuran dan mengurangi jumlah aspal yang diperlukan untuk mengisi rongga. Saat dicampur dengan aspal, *filler* akan membentuk bahan pengikat dengan konsistensi tinggi yang mengikat butiran agregat bersama-sama. Penambahan *filler* pada aspal akan meningkatkan konsistensinya.

II.5.1 Nano SiO₂

Nanomaterial adalah material yang komponennya telah diperkecil hingga rentang 1–100 nm atau mengandung setidaknya satu dimensi di dalam rentang skala nano ini dalam ruang tiga dimensi. Bahan berstruktur nano dan komponen berstruktur nano adalah dua sub kategori utama bahan nano. Meskipun komponen berstruktur nano memiliki setidaknya satu komponen struktural dengan dimensi luar di dalam rentang nanometer, material berstruktur nano dibedakan karena memiliki dimensi struktural yang berada dalam rentang skala nano. Kategorisasi ini didasarkan pada dimensi eksternal elemen struktur material. Nanomaterial memiliki karakteristik unik yang membedakannya dari material konvensional (AlTawaiha et al., 2023).

Silika (SiO₂) adalah suatu mineral yang penyusun utamanya berupa silikon dioksida (SiO₂). Silika tersusun dari dua unsur yang terdiri dari silikon (Si) dan oksigen (O₂) dimana keduanya merupakan unsur yang paling banyak di Alam. Diperkirakan 60% dari kerak bumi ini tersusun dari silika. Silika yang ada di bumi ini biasanya ditemukan dalam bentuk silikat. Silika terdiri dari berbagai bentuk yaitu silika kristalin, silika mikrokristalin, *silica vitreous*, dan *silika amorf*. Berdasarkan struktur molekulnya dibagi menjadi dua bagian yaitu silika kristalin dan silika amorf. Silika kristalin adalah silika yang susunan molekulnya membentuk pola tertentu, sedangkan silika amorf adalah silika yang susunan molekulnya tidak teratur (Makaminan, 2019). Material Nano SiO₂ yang digunakan dalam penelitian berasal dari Balai Keramik di Jl. A. Yani No.392, Kebonwaru, Kec. Batununggal, Kota Bandung, Jawa Barat.



Gambar II. 23 Nano SiO₂

Sumber : Dokumentasi Pribadi

II.5.2 Pengujian Nano SiO₂ sebagai Filler

Pengujian Nano SiO₂ sebagai filler dalam campuran aspal dilakukan untuk memastikan bahwa ukuran Nano SiO₂ sesuai dengan kebutuhan. Berikut pengujian Nano SiO₂ yang dilakukan:

1. Pengujian *Particle Size Analyzer* (PSA)

Untuk mengetahui ukuran partikel suatu material dan distribusinya, dengan seiring berkembangnya ilmu pengetahuan yang lebih mengarah ke era nanoteknologi, para peneliti mulai menggunakan *Laser Ablation Spectroscopy* (LAS). Metode ini dinilai lebih akurat bila dibandingkan dengan metode analisa gambar maupun metode ayakan, terutama untuk sampel-sampel dalam orde nanometer (Lusi, 2011). Contoh alat yang menggunakan metode LAS adalah *Particle Size Analyzer* (PSA). *Particle Size Analyzer* (PSA) merupakan salah satu alat yang dapat digunakan untuk pengujian distribusi ukuran partikel berukuran nanometer. Kebenaran dan keabsahan hasil pengujian sangat tergantung pada kebenaran dan ketelitian alat ukur dan alat uji yang memenuhi sistem mutu sesuai dengan standar internasional ISO/IEC 17025 : 2008. Data yang dihasilkan haruslah berasal

dari pengujian dengan metode yang telah divalidasi atau diverifikasi dari metode standar (Nuraeni et al., 2013).



Gambar II. 24 Alat Uji Particle Size Analyzer

Sumber : Buku Nano Silika (2023)

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

Untuk melakukan karakterisasi material yang heterogen pada permukaan bahan pada skala mikrometer atau bahan sub mikrometer serta menentukan komposisi unsur sampel secara kualitatif maupun kuantitatif dapat dilakukan dengan menggunakan satu perangkat alat SEM (*Scanning Electron Microscope*) yang dirangkaikan dengan EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*). Pada SEM dapat diamati karakteristik bentuk, struktur, serta distribusi pori pada permukaan bahan, sedangkan komposisi serta kadar unsur yang terkandung dalam sampel dapat dianalisis dengan menggunakan EDS (Amrulloh, 2014). Pengujian SEM-EDS adalah metode yang sangat efektif untuk memeriksa morfologi, struktur, dan komposisi elemen dari partikel Nano SiO₂. Teknik *X-Ray Diffraction* (XRD) berperan penting dalam proses analisis padatan kristalin. XRD adalah metode karakterisasi yang digunakan untuk mengetahui ciri utama Kristal, seperti parameter kisi dan tipe struktur. Selain itu, juga dimanfaatkan untuk mengetahui rincian lain seperti susunan berbagai jenis atom dalam Kristal, kehadiran cacat, orientasi, dan cacat Kristal (Smallman, 1999).



Gambar II. 21 Alat Uji SEM-EDS

Sumber: Buku Nano Silika (2023)

II.6 Kinerja Fungsional

Perkerasan aspal porus memiliki dua fungsi utama, yaitu untuk mengelola limpasan air hujan dan mendukung beban lalu lintas (Padilha et al., 2018). Kinerja fungsional campuran aspal porus dinilai berdasarkan waktu yang dibutuhkan untuk penyerapan air, yang diukur melalui pengujian permeabilitas. Permeabilitas adalah parameter empiris yang digunakan untuk mengukur kemampuan campuran aspal porus dalam mengalirkan air. Pengaliran air yang efektif diharapkan dapat mencegah genangan di permukaan jalan, sehingga meningkatkan keamanan bagi pengguna jalan.

Pengaliran air yang efisien merupakan salah satu karakteristik utama dari aspal porus. Struktur berpori aspal porus memungkinkan air dengan cepat terserap ke dalam permukaan, sehingga mengurangi genangan dan meningkatkan sistem drainase. Kandungan aspal yang sesuai dalam campuran sangat penting untuk memastikan adhesi yang baik antar agregat dan membentuk matriks yang stabil. Selain itu, ukuran dan gradasi agregat juga memengaruhi kemampuan aliran air; agregat yang lebih kasar dapat menciptakan ruang lebih luas antar partikel, memungkinkan air meresap dengan lebih cepat.

II.7 Pengujian Marshall

Pengujian Marshall dilakukan untuk mengetahui nilai stabilitas dan kelelahan (flow), serta untuk mempelajari kepadatan dan pori dari campuran padat yang

terbentuk. Dalam skenario ini, benda uji atau briket beton aspal padat dibuat dari gradasi agregat campuran tertentu yang sesuai dengan spesifikasi campuran. Sebelum membuat briket campuran aspal, rumus pendekatan digunakan untuk menemukan perkiraan kadar aspal yang ideal.

Pengujian Marshall untuk menentukan stabilitas dan kelelahan (flow) sampel dilakukan sesuai dengan prosedur SNI 06-2489-1991 AASHTO T245-90. Stabilitas mengacu pada kemampuan campuran aspal untuk menahan beban hingga terjadi deformasi plastis, yang diukur dalam kilogram atau pound. Nilai stabilitas ini diperoleh dengan mengalikan pembacaan jarum pada alat penunjuk stabilitas di alat uji Marshall dengan faktor kalibrasi alat dan faktor korelasi sampel uji. Nilai yang diperoleh ini akan menunjukkan kekuatan struktural campuran aspal yang dipengaruhi oleh kandungan aspal, susunan gradasi, dan kualitas agregat dalam campuran. Kelelahan adalah perubahan bentuk campuran aspal yang terjadi akibat beban hingga mencapai batas runtuh, diukur dalam mm atau 0,01 inci. Pengukuran kelelahan plastis dilakukan bersamaan dengan pengukuran stabilitas, di mana nilai kelelahan dibaca pada arloji saat benda uji mengalami keruntuhan.

Dalam pengujian Marshall, diperlukan alat Marshall yang merupakan alat tekan yang dilengkapi dengan proving ring berkapasitas 22,2 KN (5000 lbs) dan flowmeter. Proving ring digunakan untuk mengukur nilai stabilitas, sementara flowmeter digunakan untuk mengukur kelelahan plastis atau flow. Benda uji Marshall berbentuk silinder dengan diameter 4 inci (10,2 cm) dan tinggi 2,5 inci (6,35 cm).



Gambar II. 25 Alat Uji Marshall

Sumber : Dokumentasi Pribadi

Parameter Marshall yang dihitung meliputi VIM, VMA, VFA, berat volume, dan parameter lain sesuai dengan spesifikasi campuran. Setelah semua parameter briket diperoleh, grafik hubungan antara kadar aspal dan parameternya dibuat untuk menentukan kadar aspal optimum. Secara umum, pengujian Marshall meliputi: persiapan benda uji, penentuan berat jenis bulk benda uji, pemeriksaan nilai stabilitas dan flow, serta perhitungan sifat volumetrik benda uji. Dalam persiapan benda uji, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain:

1. Jumlah benda uji yang disiapkan.
2. Persiapan agregat yang akan digunakan.
3. Penentuan temperatur pencampuran dan pemadatan.
4. Persiapan campuran aspal beton.
5. Pemadatan benda uji.
6. Persiapan untuk pengujian Marshall.

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 dipisahkan sesuai fraksi ukurannya dengan menggunakan saringan. Temperatur pencampuran bahan aspal dengan agregat adalah temperatur pada saat aspal mempunyai viskositas kinematis sebesar 170 ± 20 centistokes, dan temperatur

pemadatan adalah temperatur pada saat aspal mempunyai nilai viskositas kinematis sebesar 280 ± 30 centistokes.

II.8 Pengujian Permeabilitas

Pengujian permeabilitas merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengetahui besaran nilai kecepatan aliran air secara vertikal pada benda uji Marshall campuran beraspal porus. Nilai dari permeabilitas sendiri merupakan perbandingan antara tinggi air yang melalui benda uji dengan lamanya waktu pengaliran.



Gambar II. 26 Water Permeability Test

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Permeabilitas memiliki tujuan dimana suatu campuran beraspal porus mempunyai kemampuan menyerap dan mengalirkan air (Sihombing et al., 2022). Nilai permeabilitas dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$K = 2,3 \frac{aL}{At} \times \text{Log}\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (\text{II.2})$$

Di mana :

K = Koefisien permeabilitas air (cm/s),

A = Luas potongan melintang tabung (cm²)

L = Tebal spesimen (cm)

a = Luas potongan spesimen (cm²)

t = Waktu yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari h₁ ke h₂ (s)

h₁ = Tinggi batas air paling atas pada tabung (cm)

h₂ = Tinggi batas air paling bawah pada tabung (cm)

II.9 Pengujian *Drain Down*

Uji *drain down* ini bertujuan untuk menentukan jumlah *drain down* campuran beraspal yang memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan. Pengujian dilakukan pada campuran dengan kandungan agregat kasar yang tinggi (yang memiliki rongga udara lebih besar, sehingga *drain down* lebih tinggi). Metode pengujian ini dikembangkan oleh AASHTO, dengan standar AASHTO T305, sebagai langkah antisipasi terhadap kondisi yang mungkin terjadi selama proses produksi, penyimpanan, pengangkutan, dan penghamparan campuran. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi potensi *drain down* campuran beraspal selama tahap desain campuran dan/atau produksi di lapangan. Uji *drain down* dilakukan pada campuran dengan kadar aspal optimum untuk memastikan bahwa pengaliran aspal pada campuran sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan.



Gambar II. 27 Alat Uji *Drain Down*

Sumber : Dokumentasi Pribadi

Roberts et al. (1996) menyatakan bahwa *drain down* adalah kondisi ketika agregat dan aspal memisahkan diri dari suatu campuran secara keseluruhan dan mengalir ke bawah campuran tersebut (pengaliran aspal). Uji *drain down* lebih signifikan untuk campuran SMA yang padat dan dinilai konvensional. 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), seperti Stone Matrix Asphalt dan Campuran Beraspal Poros (gradasi terbuka) (Abdillah, 2018).

II.10 Kadar Aspal Optimum

Kadar Aspal Optimum (KAO) adalah nilai tengah dari rentan kadar aspal yang memenuhi semua spesifikasi campuran. Menurut spesifikasi umum Bina Marga dalam perencanaan perkerasan jalan disyaratkan agar perkerasan yang dihasilkan kemudahan dalam pelaksanaan. memiliki stabilitas yang cukup baik tanpa mengabaikan fleksibilitas, durability dan kemudahan dalam pelaksanaan.

II.11 Studi Terdahulu

Penelitian sebelumnya merupakan sejumlah hasil riset yang digunakan untuk mempelajari lebih lanjut serta terkait dengan pembahasan dalam skripsi ini. Berikut adalah beberapa penelitian sebelumnya yang diambil, di antaranya:

1. The Usage of Additives on Porous Asphalt (Nataadmadja, dkk 2024)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan bahan aditif terhadap kekuatan, permeabilitas, dan porositas aspal berpori. Tiga jenis bahan aditif yang diteliti adalah 0,5%, 1%, 1,5% Crumb Rubber (CR), 2%, 4%, 6% nano silika (NS), dan 0,3%, 0,4%, 0,5% Wetbond-SP. Beberapa uji laboratorium telah dilakukan terhadap benda uji yang telah disiapkan, yaitu uji Marshall, Cantabro Loss, dan uji permeabilitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 4% NS pada benda uji mampu meningkatkan nilai stabilitas aspal berpori (optimum), sedangkan penambahan CR dan Wetbond-SP tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap parameter stabilitas.

2. Evaluasi Kinerja Fungsional Campuran Porous Asphalt Dengan Substitusi Material SiO₂ Sebagai Filler Berdasarkan Gradasi Jepang (Putri, 2023)

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja fungsional aspal porus terhadap penambahan filler SiO₂ berdasarkan gradasi Jepang. Persentase SiO₂ yang digunakan adalah 0%, 2%, 3% dengan melakukan pengujian marshall, pengujian cantabro loss, pengujian *Asphalt Flow Down*, pengujian permeabilitas. Hasil pengujian dan analisis didapat nilai stabilitas yang tinggi pada variasi 2%, nilai VIM tinggi yaitu pada variasi 0% sebesar 16.995%, Nilai permeabilitas tertinggi yaitu pada variasi 0%, hasil analisis pengujian

Asphalt Flow Down dengan 2% SiO₂ mendapatkan hasil yang baik, dan pada hasil pengujian Cantabro Loss dengan 2% SiO₂ memiliki hasil yang baik dalam mengikat antar agregat.

3. Moisture Susceptibility Of Porous Asphalt Mixture with Nano Silica Modified Asphalt Binder (Masri, dkk 2019)

Nanopartikel yang digunakan dalam penelitian ini adalah Nanosilika dengan ukuran rata-rata 10 hingga 15 nanometer. Selain itu, Suseptibilitas Kelembaban NS-PA dievaluasi menggunakan Uji Kekuatan Tarik Tidak Langsung, berdasarkan Uji Lottman yang Dimodifikasi. Dari hasil tersebut diperoleh nilai TSR maksimum pada NS-PA 2% yaitu sebesar 91%. Sedangkan untuk PA konvensional (0% NS), nilai TSR hanya sebesar 74%. Dari hasil ini, disimpulkan bahwa jumlah NS optimum yang dibutuhkan PA untuk menahan kerusakan akibat kelembapan adalah 2%.

4. Improving Strenght Of Porous Asphalt: Utilizing Fly Ash Into Nanomaterials In Experimental Approach (Rani, dkk 2019)

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan fly ash (FA) kelas F pada campuran aspal berpori (PA) sebagai pengganti gradasi agregat dan kinerja sebagai filler. Pemanfaatan fly ash menjadi material nano merupakan salah satu metode penelitian ini. Pendekatan material untuk material nano diusulkan dengan memecah partikel yang lebih besar dengan proses fisik seperti penggilingan atau penggilingan. Ini disebut aktivasi mekanis. Karena aspal pena 60/70 sebagian besar merupakan bahan pengikat di Indonesia, maka aspal pena ini digunakan sebagai standar untuk semua sampel dalam percobaan ini. Kadar aspal optimum (OBC) ditentukan untuk semua campuran dengan desain campuran Marshall. Mengingat pendekatan bahan nano, sampel kemudian disiapkan untuk kandungan aspal optimal yang sama (5,85%) dengan menggunakan standar PA Bina-Marga dalam campuran kontrol serta FA alami dan FA termodifikasi sebagai bahan pengisi alternatif dalam campuran termodifikasi. FA modifikasi sendiri telah digiling menggunakan mesin transversal ball mill selama 3 hingga 6 jam. Studi eksperimental ini menunjukkan nilai stabilitas dan penurunan permeabilitas yang lebih tinggi dengan OBC yang sama untuk campuran yang memiliki

kandungan pengisi FA termodifikasi dibandingkan dengan campuran standar dan campuran FA alami. Semua sampel sesuai dengan Spesifikasi aspal berpori Indonesia.

5. Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures

Pada penelitian ini dengan modifikasi bahan pengikat aspal sebesar 4,5 persen styrene butadiene styrene (SBS) dan sejumlah 2 dan 4 persen Nano silika serta dengan menambahkan 0,5 dan 1 persen bubuk kapur dan serat sintetis hybrid ke dalamnya. 0,4 dan 0,5 persen berat campuran aspal sebagai jenis pengisi, untuk meningkatkan sifat kinerja campuran aspal berpori yang dimodifikasi, sehingga mengurangi kehilangan berat pengikat aspal dan juga meningkatkan kekuatan tarik dan ketahanan terhadap alur. Kombinasi 0,1 dan 0,2 persen serat kaca dengan 0,3 persen serat polipropilen, didefinisikan sebagai jenis serat hibrida. Selain itu, tingkat kegagalan alur yang paling sedikit terjadi pada aspal berpori bertulang, yang menggunakan kombinasi 0,2 persen serat kaca dan 0,3 persen polipropilen. Selain itu konsumsi bahan pengikat aspal yang paling tepat untuk mengurangi drain down juga sebesar 4,5 persen, yaitu sebesar 4 persen Nano silika didalamnya. Selain itu, dengan penambahan kadar bubuk kapur yang digunakan pada benda uji dari 0,5 persen menjadi 1 persen, nilai kuat tarik dapat ditingkatkan sebesar 16,5 persen untuk aspal berpori bertulang yang mengandung bahan pengikat aspal sebesar 4,5 persen.

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

Dalam penelitian ini pengujian eksperimental: Nano silika dengan tiga persentase 2%, 4%, dan 6% berat aspal dicampur dalam pengikat aspal pada suhu tinggi untuk mengelupas Nano silika di dalam aspal. Tiga jenis tanah liat Nano dengan perbandingan aluminium oksida (A, B, C) yang berbeda yaitu 2% dan 4% berat aspal dicampur dalam bahan pengikat aspal pada suhu tinggi untuk mengelupas tanah liat Nano di dalam aspal. Ini menunjukkan perbedaan Viskositas aspal yang dimodifikasi, Penetrasi, Pelunakan, titik nyala dan Stabilisasi Marshall ditunjukkan pada grafik. Perbedaan ini bergantung pada jenis aspal, jenis bahan Nano, dan persentase bahan

tambahan. Dengan menggunakan hasil percobaan tersebut untuk membuat perbandingan antara penggunaan Nanosilica dan penggunaan Nano-clay dengan persentase yang berbeda-beda, diperoleh pengaruh masing-masing jenis dan setiap persen bahan Nano terhadap sifat aspal asli sehingga sifat campuran aspal tersebut.

Tabel II. 3 Studi Terdahulu

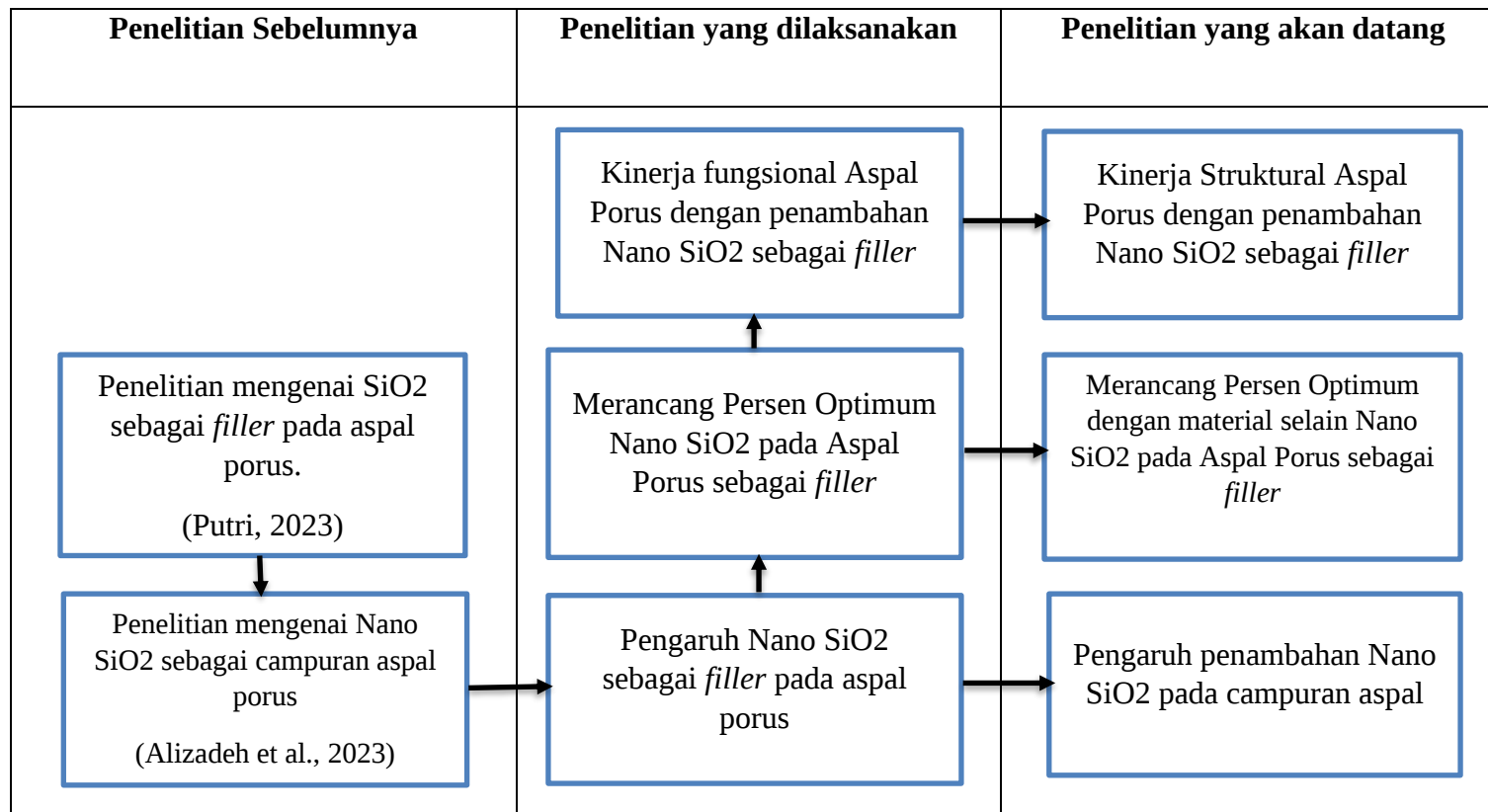
No	Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil Penelitian	GAP	
					Bahan Tambah	Penelitian Penulis
1	2024	The Usage of Additives on Porous Asphalt	Uji Marshall, Uji Permeabilitas, Uji Cantabro Loss	Konsentrasi optimum penambahan Nano SiO ₂ sebesar 4% dari berat kadar aspal	Penggunaan Nano SiO ₂ sebesar 2%,4%,6%	
2	2023	Evaluasi Kinerja Fungsional Campuran Porous Asphalt Dengan Substitusi Material SiO ₂ Sebagai Filler Berdasarkan Gradasi Jepang	Uji marshall. Uji Cantabro Loss, Uji Permeabilitas, Uji <i>Asphalt Flow Down</i>	Nilai persentase optimum pada campuran Aspal Porus dengan penambahan SiO ₂ sebagai filler yaitu variasi 2%	Penggunaan SiO ₂ sebesar 0% , 2%, 3%	
3	2019	Moisture susceptibility of porous asphalt mixture with Nano silica modified asphalt binder	Uji Kekuatan Tarik tidak Langsung (ITS), Uji Lottman	Jumlah Nano SiO ₂ optimum yang dibutuhkan Aspal Porus untuk menahan kerusakan akibat kelembaban adalah 2%.	Penggunaan 0% - 6% Nano SiO ₂	

4	2019	Improving Strenght Of Porous Asphalt: Utilizing Fly Ash Into Nanomaterials In Experimental Approach	Uji Marshall, Uji Cantabro Loss, Uji Drain Down	Studi eksperimental ini menunjukkan nilai stabilitas dan penurunan permeabilitas yang lebih tinggi dengan OBC yang sama untuk campuran yang memiliki kandungan bahan pengisi Fly Ash yang dimodifikasi dibandingkan dengan campuran standar dan campuran Fly Ash alami.	Penggunaan Nano Fly Ash 18% (kelas F) dan Fly Ash 3.6% yang telah digiling.	Bahan tambahan yang digunakan adalah 2%,3%,4% Nano SiO2
5	2017	Laboratory Assessment of Hybrid Fiber and Nano-silica on Reinforced Porous Asphalt Mixtures	Uji Drain Down, Uji Loaded Wheel Tracker (LWT), Indirect tensile repeated load test	Jumlah Nano SiO2 yang paling tepat digunakan untuk mereduksi drain down adalah sebesar 0,4 %. Dengan demikian, penggunaan 4 % Nano SiO2 pada spesimen dengan bahan pengikat aspal 4,5 persen dapat menurunkan nilai alur hingga 4%.	Penggunaan 2%-4%. Nano SiO2.	

6	2016	Application of Nanotechnology to improve the performance of asphalt materials	Uji Marshall, Uji Viskositas, Uji Penetration, Uji Titik Lembek, Uji Titik Nyala	Viskositas aspal meningkat setelah penambahan Nano SiO ₂ atau Nano tanah liat. Penetrasi aspal meningkat setelah penambahan Nano SiO ₂ namun menurun setelah penambahan tiga jenis Nano clay. Pelunakan aspal meningkat setelah penambahan Nano SiO ₂ tetapi tidak terpengaruh dengan penambahan Nano clay. Titik nyala aspal tidak terpengaruh dalam dua kasus. Stabilisasi campuran aspal Marshall juga meningkat setelah penambahan Nano SiO ₂ atau Nano tanah liat.	menggunakan dan membandingkan aditif Nano SiO ₂ dan nano clay	
---	------	---	--	---	--	--

II.12 Roadmap Penelitian

Tabel II. 4 Roadmap Penelitian

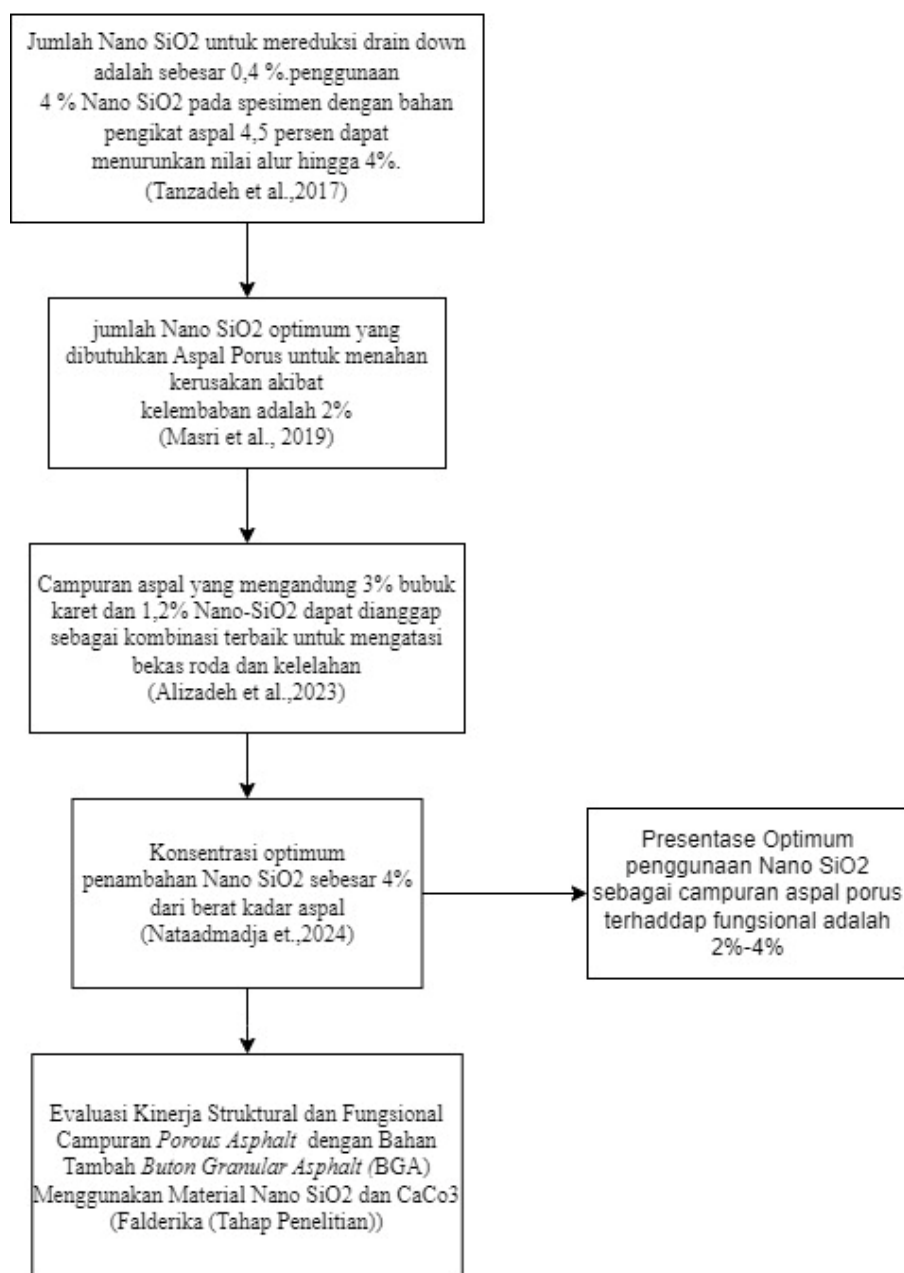


II.13 Penelitian Aspal Porus dan Nano SiO₂

Tabel II. 5 Posisi Penelitian Aspal Porus

Pendekatan Penelitian	Aspal Porus dan Nano SiO₂	Penelitian yang Dilakukan
Permeabilitas	Nataadmadja, dkk(2024) Rani, dkk (2019) Falderika (penelitian)	Pengaruh Gradasi Australia Pada Aspal Porus Dengan Penambahan Nano SiO ₂ Sebagai <i>Filler</i> Terhadap Kinerja Fungsional.
Kelembapan	Masri, dkk (2019)	

II.14 Penelitian Nano SiO₂



Gambar II. 28 Penelitian Nano SiO₂