

BAB II TINJAUAN PUSAKA

2.1 Aspal Porus

2.1.1 Pengertian Aspal Porus

Aspal porus merupakan salah satu jenis campuran beraspal dengan gradasi agregat terbuka (*open graded asphalt mixture*) yang dirancang memiliki kadar rongga udara tinggi, yaitu sekitar 18-25%. Karakteristik ini memungkinkan air hujan meresap ke dalam lapisan perkerasan sehingga mengurangi genangan di permukaan jalan dan meminimalisasi risiko *aquaplaning* yang sering terjadi pada jalan beraspal konvensional. Selain itu, sifat drainase yang baik menjadikan aspal porus lebih ramah lingkungan karena mampu mengurangi aliran limpasan permukaan (*surface runoff*) yang berpotensi menyebabkan banjir di daerah perkotaan (Putra & Lase, 2019).

Berbeda dengan aspal padat bergradasi rapat, aspal porus memiliki rongga antar agregat yang cukup besar sehingga air dapat mengalir melewati lapisan perkerasan. Struktur berpori ini tidak hanya bermanfaat untuk drainase, tetapi juga mampu menyerap energi suara dari gesekan ban kendaraan, sehingga efektif dalam mengurangi kebisingan lalu lintas (*traffic noise*). Haryanto dan Nugraha, (2018). Oleh karena itu, aspal porus banyak diaplikasikan pada jalan bebas hambatan (*highway*), bandara, maupun jalan perkotaan yang membutuhkan tingkat kenyamanan dan keselamatan berkendara lebih tinggi.

Secara teknis, campuran aspal porus biasanya menggunakan aspal dengan kadar optimal yang lebih rendah dibandingkan aspal bergradasi rapat, untuk menjaga keberadaan rongga yang saling terhubung (*interconnected voids*). Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Suryatama et al., 2023), campuran aspal porus dengan kadar aspal optimal 5,5% dapat menghasilkan porositas sebesar 21,8% dan nilai koefisien permeabilitas sekitar 0,075 cm/detik, yang menunjukkan kinerja drainase yang baik serta stabilitas *marshall* yang memenuhi standar. Hal ini membuktikan bahwa desain campuran aspal porus harus memperhatikan keseimbangan antara fungsi drainase dan kekuatan mekanis agar dapat digunakan secara efektif di lapangan.

Dengan berbagai keunggulan tersebut, aspal porus dipandang sebagai salah satu solusi inovatif dalam pembangunan infrastruktur jalan modern. Selain mendukung keselamatan pengguna jalan melalui pengurangan genangan air dan kebisingan, aspal porus juga berkontribusi terhadap aspek lingkungan dengan mengurangi limpasan permukaan dan membantu pengendalian banjir lokal. Namun demikian, sifatnya yang berpori juga menjadikan aspal porus rentan terhadap abrasi (*ravelling*) dan kerusakan akibat kelembapan, sehingga diperlukan inovasi material, seperti penggunaan bahan tambah nano silika, untuk meningkatkan kinerjanya.

2.1.2 Karakteristik Aspal Porus

Adapun beberapa karakteristik aspal porus yang harus dipenuhi agar menjadi perkerasan dengan kekuatan yang diinginkan berdasarkan *Australian Asphalt Pavement Association* (2004) ditampilkan pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Aspal Porus

No	Kriteria Perencanaan	Nilai
1	Kadar Rongga di Dalam Campuran (VIM %)	18-25
2	Kadar Rongga Antar Agregat (VMA %)	<18
3	Stabilitas <i>Marshall</i> (mm)	Min. 500
4	Kelelehan <i>Marshall</i> (mm)	2-6
5	<i>Marshall Quotient</i> (kg/mm)	Max. 400
6	Jumlah Tumbukan perbidang	50
7	Uji <i>Cantabro Loss</i> (%)	Max. 20

Sumber : AAPA, 2004

Koefisien permeabilitas menggambarkan kemampuan lapisan aspal porus dalam melalukan air melalui pori-porinya. Nilai tersebut menunjukkan sejauh mana air dapat meresap secara efektif tanpa menimbulkan genangan di permukaan jalan. VIM (*Void in the Mix*) merupakan persentase volume rongga udara yang terdapat di dalam campuran aspal. Stabilitas *marshall* menggambarkan kemampuan campuran aspal dalam menahan beban lalu lintas sebelum mengalami perubahan bentuk permanen. *Flow* menunjukkan tingkat deformasi atau kelunakan campuran aspal ketika menerima beban maksimum. Rentang nilai 2-6 mm mencerminkan bahwa campuran memiliki keseimbangan yang baik antara kekakuan dan kelenturan. *Marshall Quotient* merupakan hasil perbandingan antara nilai stabilitas dan *flow* yang digunakan untuk menunjukkan tingkat kekakuan suatu campuran aspal. Jumlah tumbukan digunakan dalam proses pemadatan benda uji *marshall*

untuk mencapai kepadatan yang diinginkan. Uji *Cantabro Loss* berfungsi untuk menilai sejauh mana campuran aspal mampu mempertahankan butiran agregatnya dari pelepasan akibat gaya geser atau abrasi.

2.1.3 Material Penyusun Aspal Porus

Salah satu jenis lapis permukaan pada perkerasan lentur adalah aspal porus, dengan aspal sebagai material pengikat utamanya. Aspal merupakan material hidrokarbon berwarna hitam yang bersifat termoplastis, yaitu dapat melembek ketika dipanaskan dan kembali mengeras pada suhu ruang (SNI 06-2434-2011). Dalam pembuatan aspal porus, aspal yang digunakan harus memenuhi karakteristik teknis tertentu, antara lain viskositas, titik lembek (*softening point*), serta stabilitas terhadap perubahan temperatur, agar campuran tetap memiliki permeabilitas yang baik sekaligus mampu menahan deformasi akibat lalu lintas dan suhu lingkungan (ASTM D5-13). Penelitian Bahrudin menunjukkan bahwa penggunaan aspal termodifikasi, seperti *polymer modified asphalt* (PMA) maupun *crumb rubber modified asphalt* (CRMA), dapat meningkatkan elastisitas, daya tahan terhadap rutting, serta mengurangi kepekaan terhadap suhu ekstrem sehingga kinerja aspal porus lebih optimal (Bahrudin et al., 2019). Adapun beberapa karakteristik aspal yang harus dipenuhi akan ditampilkan pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Karakteristik Aspal

Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Persyaratan
Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456-2011	60-70
Titik Lembek (°C)	SNI 2434-2011	≥ 48
Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432-2011	≥ 100
Titik Nyala (°C)	SNI 2433-2011	≥ 232
Berat Jenis Aspal	SNI 2441-2011	≥ 1,0

Sumber : Spesifikasi Umum 2018 (Revisi 2)

Penetrasi bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan atau kelenturan aspal dengan menekan jarum standar ke permukaan aspal pada suhu 25°C dalam waktu dan beban tertentu. Titik lembek merupakan suhu pada saat aspal mulai mengalami pelunakan. Daktilitas digunakan untuk menilai kemampuan aspal dalam meregang sebelum putus, yang mencerminkan tingkat elastisitas serta daya rekatnya. Titik nyala merupakan suhu terendah saat uap aspal dapat terbakar sesaat apabila terkena sumber api. Berat jenis aspal merupakan perbandingan antara massa jenis aspal

dengan massa jenis air. Nilai minimum sebesar 1,0 menunjukkan bahwa aspal memiliki kerapatan yang tinggi, yang berperan penting dalam menentukan proporsi antara agregat dan aspal pada perencanaan campuran (*mix design*).

2.1.4 Agregat Aspal Porus

Dalam campuran aspal porus, agregat berfungsi sebagai kerangka utama yang membentuk struktur berpori untuk menjaga permeabilitas air sekaligus memberikan stabilitas struktural terhadap beban lalu lintas. Agregat yang digunakan memiliki gradasi terbuka dengan proporsi dominan agregat kasar ($>4,75$ mm) dan sangat sedikit agregat halus, sehingga menghasilkan *void content* antara 18-22% untuk menjamin fungsi drainase pada lapisan perkerasan (McDaniel et al., 2010). Sifat fisik agregat sangat menentukan kinerja campuran, antara lain bentuk butir bersudut tajam untuk meningkatkan *interlocking*, kebersihan material agar tidak terjadi penyumbatan pori, serta ketahanan aus yang tinggi untuk menghadapi pengaruh beban berulang dan kondisi lingkungan (Rahim Jamian, 2013). Material yang lazim dipakai sebagai agregat kasar dalam aspal porus adalah batu pecah granit, basalt, maupun dolomit karena memiliki kekuatan dan daya tahan aus yang baik, sementara penggunaan filler dibatasi agar permeabilitas campuran tetap optimal (Lei et al., 2024).

1. Agregat kasar merupakan elemen utama dalam campuran aspal porus karena berfungsi membentuk struktur berongga (*void structure*) yang menjaga permeabilitas lapisan sekaligus memberikan kekuatan struktural. Dalam campuran aspal porus, agregat kasar menyumbang lebih dari 75-85% dari total berat campuran, dengan ukuran butir lebih besar dari 4,75 mm sesuai dengan spesifikasi terbuka (Rahim Jamian, 2013). Peran utama agregat kasar adalah menciptakan jalur aliran air di antara butir-butirnya, meningkatkan kapasitas menahan beban lalu lintas, serta menjaga kestabilan mekanis agar lapisan tidak mudah mengalami deformasi permanen (Lei et al., 2024). Pemilihan agregat kasar yang bersudut tajam, bersih, serta memiliki ketahanan aus yang baik sangat penting untuk menjamin kinerja jangka panjang lapis aspal porus. Adapun beberapa persyaratan agregat kasar yang harus dipenuhi akan ditampilkan pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Persyaratan Agregat Kasar

Pengujian			Metode Uji	Persyaratan
Kekekalan bentuk slag dan agregat kasar terhadap larutan		Natriu m Sulf at	SNI 3407:2008	Maks. 12%
		Magnesi u m Sulfat		Maks. 18%
Abrasi dengan mesin <i>Los Angeles</i>	Laston	100 putaran	SNI 2417:2008	Maks. 6%
		500 putaran		Maks. 30%
	Laston Modifikasi	100 putaran		Maks. 8%
		500 putaran		Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal			SNI 2439:2011	Min. 95%
Butir pecah pada agregat kasar			SNI 7619:2012	95/90
Partikel pipih dan lonjong			SNI 8287:2016	Maks. 5%
Material lolos ayakan No. 200			SNI ASTM C117:2012	Maks. 1%

Sumber : Spesifikasi Umum 2018 (Revisi 2)

2. Agregat halus pada aspal porus adalah material granular berukuran kecil yang sebagian besar lolos saringan No. 4 (4,75 mm), berasal dari pasir alami maupun hasil batu pecah halus. Dalam perancangan campuran porus *asphalt*, penggunaan agregat halus dibatasi agar struktur berpori tetap terbuka dan kemampuan drainase tetap optimal. Penelitian oleh (Lei et al., 2024) menunjukkan bahwa persentase agregat halus yang terlalu tinggi dapat mengurangi nilai *void in total mix* (VTM) sehingga menurunkan permeabilitas campuran. (Rahim Jamian, 2013) juga menegaskan bahwa kandungan agregat halus sebaiknya dijaga rendah (<10% dari total berat campuran) agar tidak terjadi penyumbatan pori (*clogging*) dan tetap mempertahankan stabilitas mekanis. Oleh karena itu, pemilihan agregat halus dengan bentuk butiran bersudut dan kebersihan yang baik sangat penting untuk mendukung ikatan antar partikel agregat kasar. Adapun beberapa persyaratan agregat kasar yang harus dipenuhi akan ditampilkan pada tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Persyaratan Agregat Halus

Pengujian	Metode Uji	Persyaratan
Nilai setara pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 50%
Uji kadar rongga tanpa pemadatan	SNI 03-6877-2002	Min. 45
Gumpalan lempung dan butir-butir mudah pecah dalam slag dan agregat halus	SNI 03-4141-1996	Maks. 1%
Material halus saringan No. 200 (0,075 mm)	SNI ASTM C117:2012	Maks. 10%

Sumber : Spesifikasi Umum 2018 (Revisi 2)

2.1.5 Gradasi Campuran Aspal Porus

Menurut spesifikasi umum (*Australian Asphalt Pavement Association* (AAPA), 2004) persyaratan gradasi campuran ditampilkan pada tabel 2.5 dibawah.

Tabel 2. 5 Persyaratan Gradasi Campuran

Ukuran Ayakan	Persen Berat Lolos Terhadap Total Agregat Dalam Campuran
$\frac{3}{4}$ in (19 mm)	100
$\frac{1}{2}$ in (12,5 mm)	85-100
$\frac{3}{8}$ in (9,5 mm)	45-70
No. 4 (4,75 mm)	10-25
No. 8 (2,36 mm)	7-15
No. 16 (1,18 mm)	6-12
No. 30 (0,60 mm)	5-10
No. 50 (0,30 mm)	4-8
No. 100 (0,15 mm)	3-7
No. 200 (0,075 mm)	2-5
Total	100

Sumber : AAPA (2004)

Dari tabel 2.5 diatas dapat diartikan sebagai pengertian ukuran yang berfungsi untuk memisahkan butiran agregat berdasarkan ukurannya, mengambil contoh ayakan ukuran $\frac{3}{4}$ (19 mm) memiliki lubang sebesar 19 milimeter yang berarti ukuran agregat yang lebih kecil dari 19 milimeter akan lolos, sedangkan yang lebih besar akan tertahan. Pengertian persen berat lolos adalah menunjukkan persentase massa agregat yang lolos dari ayakan terhadap total berat, misalnya pada ayakan $\frac{1}{2}$ (12,5 mm) = 85 – 100 % yang berarti 85 – 100 % dari total berat agregat harus lolos dari ayakan $\frac{1}{2}$ (12,5 mm).

2.2 Kekurangan Aspal Porus

Indonesia memiliki iklim tropis dengan curah hujan tinggi, sehingga genangan air di permukaan jalan sering terjadi. Kondisi ini mempercepat kerusakan pada perkerasan lentur melalui fenomena *stripping*, yaitu lepasnya ikatan antara agregat

dan aspal, yang berdampak pada penurunan stabilitas dan umur layanan jalan (Azman Masri et al., 2016).

Tingkat porositas yang tinggi pada aspal porus sangat mempengaruhi terhadap umur perkerasan jalan, di mana umur aspal porus cenderung lebih pendek dibandingkan aspal konvensional. Hal ini disebabkan oleh struktur campuran yang lebih berpori, sehingga menyebabkan stabilitasnya menjadi lebih rendah (Al-Kaissi & Mashkoor, 2016). Aspal porus memiliki rongga udara yang besar dan saling terhubung, campuran ini memiliki *flow* rendah menyebabkan menjadi rapuh dalam menahan beban lalu lintas yang berulang dan akibatnya lebih rentan terhadap terjadinya retak lelah (Hammes & Thives, 2023).

2.3 Nano Silika

2.3.1 Kandungan Nano Silika

Nano silika (SiO_2) merupakan partikel silika berukuran nanometer yang digunakan dalam berbagai aplikasi material untuk meningkatkan kinerja dan sifat mekanisnya. Komposisi kimia nano silika umumnya terdiri dari: SiO_2 (Silikon Dioksida): $\geq 99,9\%$, dan Al_2O_3 (Aluminium Oksida): $0,005\%$.

Penambahan nano silika cenderung mempertahankan VIM dan VMA pada tingkat optimal, sehingga struktur berpori tetap mendukung drainase, sementara MQ meningkat, menunjukkan peningkatan kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi permanen (Azman Masri et al., 2016).

Tabel 2. 6 *Propertis Nano Silika*

<i>Ingredients (s)</i>	CAS No.	EC No. / REACH Registration No.	&W/W	<i>Hazard Statements (s)</i>
<i>Synthetic Amorphus Silica</i>	112926-00-8	231-545-4/01- 2129379499-16	>90	<i>Not classified</i>
<i>Water</i>	7732-18-5	231-791-2	<10	<i>Not classified</i>

2.3.2 Manfaat Nano Silika Pada Aspal

Menurut Resentia semakin banyak penggunaan aspal akan semakin kecil rongga pada campuran yang dihasilkan tetapi penggunaan aspal yang terlalu banyak dapat menyebabkan *bleeding*, oleh karena itu penggunaan kadar NS sebagai substitusi filler menghasilkan rongga yang lebih sedikit (Resentia et al., 2023).

Untuk meningkatkan performa aspal, nano silika digunakan sebagai bahan modifikasi. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan nano silika mampu

memperkuat struktur internal campuran, meningkatkan kekuatan struktural, stabilitas *marshall*, serta *flow marshall*, sekaligus mempertahankan permeabilitas campuran. Nano silika berfungsi sebagai pengisi mikro yang memperbaiki ikatan antara aspal dan agregat, mengurangi risiko retak akibat beban dan kelembapan, serta memperkuat ketahanan terhadap deformasi permanen (Azman Masri et al., 2016)

Penambahan NS pada campuran menyebabkan peningkatan nilai *density* dibandingkan dengan campuran kontrol pada kadar aspal yang sama. Selain itu, penambahan silika juga memengaruhi jumlah rongga dalam campuran, di mana semakin tinggi kadar silika yang digunakan, maka rongga udara yang terbentuk dalam campuran cenderung semakin berkurang (Resentia et al., 2023).

Dengan demikian, kami berharap integrasi nano silika pada aspal dapat meningkatkan stabilitas struktural, menurunkan potensi *stripping*, dan mempertahankan kinerja drainase. Hal ini menjadikannya sangat sesuai untuk diterapkan pada kondisi iklim tropis di Indonesia, di mana perkerasan jalan rentan terhadap genangan air dan kerusakan akibat beban lalu lintas berat.

Penelitian Azman Masri menunjukkan bahwa penggunaan nano silika dengan kadar SiO₂ di atas 99% pada aspal porus dapat meningkatkan stabilitas *marshall* (Azman Masri et al., 2016).

2.4 Pengujian *Marshall*

Pengujian *marshall* merupakan salah satu metode standar untuk mengevaluasi sifat mekanis campuran aspal, termasuk aspal porus. Pengujian ini bertujuan untuk menilai kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas serta deformasi plastis yang terjadi di bawah tekanan. Parameter utama yang diukur dalam pengujian ini adalah stabilitas dan *flow*. Stabilitas menggambarkan kemampuan campuran menahan beban maksimum sebelum mengalami kerusakan plastis, sedangkan *flow* mengukur deformasi vertikal yang terjadi pada campuran saat diberi beban tertentu. Kedua parameter ini digunakan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO), yang memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan struktural dan fleksibilitas campuran (Azman Masri et al., 2016) (Rasheed et al., 2022).

Pengujian *marshall* dengan membuat sampel yang dicetak dengan bentuk silinder, lalu dipadatkan menggunakan alat pemadat aspal atau disebut manual aspal kompaktor, kemudian sampel dilepaskan dari cetakan lalu diuji dengan mesin *marshall* untuk mendapatkan dua parameter utama antara lain:

1. Stabilitas : mengetahui parameter yang menunjukkan batas maksimum aspal menahan beban yang dapat diterima.
2. Kelelehan (*Flow*) : mengetahui besarnya deformasi yang terjadi pada lapisan aspal akibat menahan beban kendaraan.

Selain 2 parameter utama diatas, pengujian *marshall* juga dapat menghasilkan data, antara lain :

1. Kepadatan (*Density*) : mengetahui tingkat kepadatan campuran setelah campuran aspal dipadatkan (Laras et al., 2022).
2. *Voids in Mix* (VIM) : mengetahui rongga udara yang masih tersisa pada aspal yang telah dipadatkan dan mengetahui ketahanan kerusakan akibat air dan suhu (Laras et al., 2022).
3. *Void in the Minerl Agregat* (VMA) : mengetahui rongga antar partikel agregat dan mengetahui ruang yang tersedia yang dapat diisi udara dan aspal (Laras et al., 2022).
4. *Voids Filled with Asphalt* (VFA) : Persentase VMA yang diisi aspal, mempengaruhi ikatan antar agregat dan daya tahan campuran terhadap deformasi (Asphalt Institute, 2007).
5. *Voids Filled with Bitumen* (VFB) : merupakan persentase rongga yang terisi aspal pada campuran setelah mengalami pemadatan (Laras et al., 2022).
6. *Marshall Quotient* (MQ) : merupakan hasil bagi stabilitas dengan kelelehan (*flow*) untuk mengetahui nilai kekuatan campuran aspal (Laras et al., 2022).

Hasil pengujian *marshall* ini sangat penting sebagai dasar perhitungan Kadar Aspal Optimum (KAO) dan evaluasi performa campuran. Dengan adanya nano silika, campuran aspal porus tidak hanya memiliki kekuatan mekanis yang lebih baik, tetapi juga lebih tahan terhadap efek kelembapan, abrasi, dan deformasi akibat beban lalu lintas berulang. Hal ini menjadikan nano silika sebagai bahan tambahan

yang efektif untuk meningkatkan daya tahan, stabilitas struktural, dan umur layanan perkerasan jalan, khususnya pada kondisi iklim tropis seperti di Indonesia.

2.5 Pengujian *Cantabro*

Pengujian *Cantabro* merupakan salah satu metode standar untuk mengevaluasi ketahanan terhadap abrasi dan kehilangan agregat pada campuran aspal porus. Pengujian ini dilakukan dengan menempatkan sampel silinder campuran aspal dalam mesin *Los Angeles* tanpa bola baja, kemudian memutar sampel selama sejumlah putaran tertentu untuk mensimulasikan efek abrasi mekanis. Hasil pengujian diukur sebagai persentase kehilangan massa (*percent mass loss*, PML) dari sampel awal. Nilai PML yang rendah menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan abrasi yang tinggi dan struktur agregat yang stabil, sedangkan nilai PML tinggi menunjukkan bahwa campuran lebih rentan terhadap kerusakan dan pelepasan partikel agregat (Azman Masri et al., 2016).

Selain mengukur kehilangan massa, pengujian *Cantabro* juga memberikan indikasi tidak langsung tentang ketahanan struktural dan umur layanan campuran. Campuran dengan nilai PML rendah memiliki porositas yang terjaga, sehingga tetap mempertahankan kemampuan drainase air di permukaan jalan, sambil meningkatkan stabilitas struktural. (Rasheed et al., 2022).

Secara keseluruhan, pengujian *cantabro* memberikan informasi penting mengenai ketahanan abrasi dan integritas permukaan campuran aspal porus yang dimodifikasi dengan nano silika. Dengan integrasi nano silika, campuran menunjukkan performa lebih baik dalam hal stabilitas agregat, ketahanan terhadap abrasi, dan umur layanan jalan, sehingga sangat sesuai untuk perkerasan di daerah tropis dengan curah hujan tinggi dan lalu lintas berat, seperti kondisi di Indonesia (Azman Masri et al., 2016) (Rasheed et al., 2022)

2.6 Literatur Review

Aspal porus merupakan jenis campuran bergradasi terbuka dengan dominasi agregat kasar dan jumlah agregat halus yang relatif sedikit, sehingga membentuk rongga udara yang cukup besar. Keberadaan rongga udara tersebut berfungsi untuk memberikan ruang bagi air di permukaan perkerasan agar dapat meresap baik

secara vertikal maupun horizontal, kemudian dialirkan menuju sistem drainase jalan (Nadya Tesalonika Sembung et al., 2020)

Kekuatan aspal konvensional dalam menghadapi beban lalu lintas berat dan deformasi permanen (*flow*) lebih unggul dibandingkan dengan aspal porus. Gradasi rapat serta ikatan antar agregat yang solid menjadikan aspal konvensional lebih tahan terhadap perubahan bentuk. Sebaliknya, aspal porus cenderung kurang stabil dan lebih mudah mengalami deformasi jika diaplikasikan pada jalan dengan lalu lintas padat (Zanoni et al., 2019)

Jika mengacu pada perbandingan diatas dapat disimpulkan bahwa aspal porus lebih baik dalam menangani penyumbatan air dari derasny hujan sangat cocok dipakai didaerah yang memiliki intensitas curah hujan yang tinggi, tapi aspal porus juga memiliki kekurangan dibandingkan dengan aspal konvensional dari segi kekuatan dan tahan lama umur penggunaan aspal.

2.6.1 Kadar Bahan Tambah Inovasi Optimum

Adapun beberapa penelitian terdahulu penggunaan nano silika sebagai campuran pada aspal dapat dilihat pada tabel 2.7 dibawah ini.

Tabel 2. 7 Kadar Optimum Peneltian Terdahulu

Sumber	Bahan Tambah	Presentase Penelitian dan Presentase Optimum	Kelebihan	Kekurangan
(Taher & Ismael, 2023)	Nano Silika	2%,4%,6% dan 4%	Meningkatkan nilai stabilitas sebesar 33% pada kadar NS 6%	Menurunkan nilai <i>rutting</i> hingga 64%
(Resentia et al., 2023)	Nano Silika	1%, 2%, 3% dan 3%	Meningkatkan nilai <i>density</i> aspal	Menurunkan nilai VIM karena nano silika mengisi rongga dalam campuran
(Rasheed et al., 2022)	Nano Silika	2%, 4%, 6% dan 4%	1. Meningkatkan nilai stabilitas hingga 32,5% pada kadar optimum 4% mendapatkan nilai 16,3 kN. Pada kadar 6% menurun menjadi 15,8 kN dikarenakan kelebihan kekakuan	1. Nilai <i>flow</i> semakin menurunkan seiring bertambahnya nano silika, pada KAO 4% NS penurunan sebesar 21% mendapatkan

Sumber	Bahan Tambah	Presentase Penelitian dan Presentase Optimum	Kelebihan	Kekurangan
			2. Meningkatkan nilai TSR hingga 80% pada KAO 4% mendapatkan nilai 91, %	nilai pengujian 2,7 mm.
(Mahir & Abed, 2023)	Nano Silika dan Nano Kalsium Karbonat	5%, 8% dan 5%	1. Meningkatkan nilai stabilitas pada persentase penambahan 5% mendapatkan nilai stabilitas sebesar 1586,37 kg 2. Meningkatkan nilai VIM seiring bertambahnya persentase. Nilai pada persentase 8% melebihi spesifikasi • 0% = 3,17% • 5% = 4,50% • 8% = 5,36%	1. Menurunkan nilai <i>flow</i> seiring bertambahnya persentase penambahan inovasi tetapi tetap memasuki spesifikasi. • 0% = 2,93 mm • 5% = 2,67 mm • 8% = 2,57 mm
(QASIM et al., 2022)	Nano Silika	2%, 4%, 5%, 6%, 8% dan 6%	1. Meningkatkan nilai stabilitas seiring bertambahnya persentase NS sampai dengan 6% dan menurun pada 8% • 0% = 1305 kg • 2% = 1407 kg • 4% = 1549 kg • 6% = 1589 kg • 8% = 1560 kg 2. Meningkatkan nilai <i>flow</i> yang dimulai dari persentase 2% - 8% tetapi sempat mengalami penurunan dari campuran kontrol 0% • 0% = 3,8 mm	

Sumber	Bahan Tambah	Presentase Penelitian dan Presentase Optimum	Kelebihan	Kekurangan
			• 2% = 3,1 mm • 4% = 3,5 mm • 6% = 4 mm • 8% = 4,5 mm	
(Yao et al., 2013)	Nano Silika	4% & 6% dan 6%	Peningkatan kekakuan viskositas mingkat 212,5% pada persentase NS 6% dan flow mingkat 300% pada NS 6%.	Penurunan ketahanan retak lelah sebesar 28% pada persentase NS 6%

Secara umum, penambahan NS berhasil meningkatkan stabilitas *marshall* campuran. Menurut Rasheed, peningkatan ini bervariasi dari 32,5% pada kadar optimum 4% NS hingga 33% pada kadar 6% NS (Rasheed et al., 2022). Secara angka yang dicatat Rasheed, nilai stabilitas 16,3 kN pada 4% NS, sementara penelitian Qasim menunjukkan peningkatan bertahap dari 1305 kg 0% NS menjadi 1589 kg pada 6% NS, sebelum sedikit menurun pada 8% NS 1560 kg (QASIM et al., 2022; Rasheed et al., 2022).

Peningkatan kekakuan campuran juga didukung oleh data penelitian Yao melaporkan peningkatan kekakuan viskositas yang sangat drastis, mencapai 212,5% pada 6% NS (Yao et al., 2013). Peningkatan kekakuan ini berkorelasi langsung dengan kemampuan campuran untuk menahan deformasi permanen penelitian Taher mencatat penurunan nilai *rutting* hingga 64%, mengindikasikan ketahanan yang jauh lebih baik terhadap lalu lintas berat (Taher & Ismael, 2023).

Namun, peningkatan kekakuan yang berlebihan juga membawa konsekuensi. Peningkatan NS, penelitian Resentia meskipun meningkatkan stabilitas dan *density*, cenderung menurunkan nilai *flow*, yang menunjukkan campuran menjadi lebih kaku dan getas mencatat penurunan *flow* sebesar 21% menjadi 2,7 mm pada 4% NS (Resentia et al., 2023). Kelemahan lainnya adalah potensi kelebihan kekakuan dapat menurunkan kinerja pada aspek lain, seperti yang ditunjukkan oleh peneliti Yao yang mencatat penurunan ketahanan retak lelah sebesar 28% pada 6% NS. Selain itu oleh (Yao et al., 2013), Sementara Mahir & abed menemukan bahwa pada kadar

8% NS, nilai VIM 5,36% telah melebihi batas spesifikasi maksimum 5%, meskipun nilai VIM pada 5% NS 4,50% masih ideal (Mahir & Abed, 2023).

2.6.2 Metode Pencampuran Aspal

Metode pencampuran pada aspal ada dua yaitu *wet process* dan *dry process*, *wet process* adalah proses pencampuran bahan aditif langsung ke dalam aspal panas beda seperti *dry process* yang merupakan metode pencampuran bahan aditif kepada campuran agregat kering baru di campur dengan aspal saat dimasak, pada *wet process* bahan aditif dicampur saat aspal mencair dan di *mix* dengan mesin *high shear mixing*.

Beberapa penelitian menunjukkan adanya perbedaan kinerja antara metode *wet process* dan *dry process* dalam pembuatan campuran aspal termodifikasi. Menurut Chavez penerapan metode *wet process* pada campuran aspal karet terbukti lebih efektif dalam meningkatkan performa dibandingkan metode *dry process* (Chavez et al., 2019). Temuan serupa juga disampaikan oleh Labbafi yang melaporkan bahwa campuran aspal karet dengan metode *wet process* memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen maupun kerusakan akibat beban berulang (*fatigue*) jika dibandingkan dengan campuran yang dimodifikasi menggunakan *dry process* (Labbafi et al., 2025).

Secara umum, dari kedua studi tersebut dapat disimpulkan bahwa metode *wet mixing* lebih unggul dalam menghasilkan dispersi material modifikasi yang merata dalam aspal, sehingga mampu meminimalkan terjadinya heterogenitas pada campuran. Homogenitas ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan stabilitas, daya tahan terhadap deformasi, serta umur lelah campuran aspal. Dengan demikian, *wet process* dipandang lebih efektif untuk memodifikasi aspal dibandingkan dengan *dry process*, khususnya ketika material tambahannya berupa karet atau partikel lain yang memerlukan interaksi kuat dengan binder.

2.6.3 Perbandingan Efisiensi Aspal Porus dan Aspal Konvensional

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Resentia penggunaan nano silika sebagai substitusi filler pada aspal AC-WC menghasilkan rongga lebih sedikit bila dibandingkan dengan campuran *control* (Resentia et al., 2023). Penelitian ini

memperkuat penulis bahwa penggunaan nano silika pada campuran aspal dapat menambahkan nilai VIM pada aspal porus.

2.6.4 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Adapun beberapa perbandingan penelitian terdahulu mengenai aspal porus dengan berbagai inovasi campuran dapat dilihat pada tabel 2.8 dibawah ini.

Tabel 2. 8 Literatur Review

Sumber	Jenis Aspal	Bahan Tambahan	Metode	Kelebihan	Kekurangan
(Arlia et al., 2018)	Aspal Porus	Gonderekum	Pengujian Marshall, Cantabro Loss & Asphalt Flow Down	Kelebihan : penggunaan KAO 5,56% dengan substitusi gonderekum 8% menambah nilai stabilitas menjadi 554,81 kg (memenuhi standar)	Menyebabkan nilai <i>cantabro</i> menurun
(Anam & Pratikto, 2018)	Aspal Porus	Ban Bekas	Pengujian Marshall	- Kelebihan : Menambah stabilitas 1,217 kg (memenuhi standar) - KAO optimum diperoleh pada sekitar 6,3% kadar aspal. - Penambahan tread ban bekas meningkatkan stabilitas campuran hingga mencapai maksimum pada kadar 3% tread dan 6% aspal (stabilitas 1413 kg).	- Nilai <i>flow</i> masih dalam batas standar (2–4 mm), menandakan campuran cukup lentur. - Nilai VIM dan VMA menurun seiring penambahan tread, menunjukkan rongga udara berkurang akibat peningkatan kerapatan campuran.
(Saputra et al., 2023)	Aspal Porus	Serat Berman	Pengujian Marshall	Serat berman hasil perlakuan NaOH memiliki kadar air 2,36%, selulosa 22,52%, dan lignin 1,33%, sesuai syarat bahan serat alami untuk aspal.	Penambahan serat >1% menurunkan nilai porositas dan MQ

Sumber	Jenis Aspal	Bahan Tambahan	Metode	Kelebihan	Kekurangan
				2. KAO 6% 3. Nilai optimum campuran terjadi pada 1% serat bemban, dengan: • Porositas = 18,86%, • VIM = 18,86%, • MQ = 10,46 kg/mm, yang semuanya memenuhi standar AAPA 2004	
(Arif et al., 2023)	Aspal <i>porus</i>	Plastik Polietilena tereflalat	Pengujian <i>Marshall, Cantabro loss & Asphalt flow down</i>	1. KAO yang didapatkan berdasarkan : • PET 0% → KAO = 5,27% • PET 5% → KAO = 4,75% • PET 7,5% → KAO = 4,64% 2. Semakin tinggi kadar PET (hingga 7,5%), semakin baik daya tahan campuran terhadap air dan suhu tinggi.	
(Martina et al., 2019)	Aspal <i>Porus</i>	Serbuk Ban Bekas	Pengujian <i>Marshall</i>	1. Kadar optimum serbuk ban bekas = 6% (memenuhi kriteria Bina Marga untuk stabilitas ≥ 800 kg dan <i>flow</i> 2–4 mm). 2. <i>flow</i> campuran benda uji campuran aspal porus dengan serbuk ban bekas 4%, 6%, 8% berturut – turut adalah 3.27 mm,	• stabilitas pada benda uji campuran aspal porus normal adalah sebesar 1169.38 Kg, Campuran ini mengurangi nilai stabilitas menjadi 4%, 6%, 8% berturut – turut adalah 642.19 Kg, 847.59 Kg, 574.94 Kg.

Sumber	Jenis Aspal	Bahan Tambahan	Metode	Kelebihan	Kekurangan
				3.37 mm, 3 mm. Hasil <i>flow</i> benda uji dengan campuran serbuk ban bekas mengalami kenaikan dari benda uji campuran aspal porus normal	
(Saleh et al., 2014)	Aspal Porus	<i>Styrofoam</i>	Pengujian <i>Marshall</i> , <i>Cantabro loss</i> & <i>Asphalt flow down</i>	1. KAO tanpa campuran 6,26%, dengan campuran kadar <i>styrofoam</i> 9%	• Menurunkan nilai stabilitas, Semakin tinggi kadar <i>Styrofoam</i> maka stabilitas semakin tinggi namun pada penelitian ini tidak memenuhi spesifikasi yang mendapatkan nilai spesifikasi tertinggi 495,92 kg

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa modifikasi bahan tambah pada aspal porus memberikan pengaruh yang beragam terhadap kinerja campuran. Penelitian Arlia melaporkan bahwa substitusi gonderekum sebesar 8% pada kadar aspal optimum (KAO) 5,56% mampu meningkatkan stabilitas campuran hingga 554,81 kg sehingga memenuhi standar, meskipun menyebabkan penurunan nilai *Cantabro loss* (Arlia et al., 2018). Penelitian lain oleh Anam dan Pratikto menunjukkan bahwa pemanfaatan serbuk *tread* ban bekas dapat meningkatkan stabilitas secara signifikan, dengan nilai maksimum 1413 kg pada kadar 3% *tread* dan kadar aspal 6%, serta tetap mempertahankan *flow* dalam batas standar 2-4 mm (Anam & Pratikto, 2018). Namun demikian, penambahan cenderung menurunkan nilai VIM dan VMA akibat meningkatnya kerapatan campuran. Selain itu, penelitian yang dilakukan Saputra mengungkapkan bahwa penggunaan serat bemban, khususnya pada kadar 1%, menghasilkan performa terbaik dengan porositas dan VIM sebesar 18,86% serta nilai MQ 10,46 kg/mm, yang semuanya memenuhi standar AAPA

(2004) (Saputra et al., 2023). Meskipun demikian, penambahan serat di atas 1% justru menurunkan porositas dan nilai MQ.

Sementara itu, modifikasi aspal porus menggunakan material plastik dan *styrofoam* juga menunjukkan kecenderungan yang bervariasi. Arief mengemukakan bahwa penambahan plastik PET sebesar 0–7,5% menurunkan nilai KAO dari 5,27% menjadi 4,64%, sekaligus meningkatkan ketahanan campuran terhadap air dan suhu tinggi (Arif et al., 2023). Martina menemukan bahwa serbuk ban bekas dengan kadar optimum 6% memenuhi kriteria Bina Marga, meskipun secara umum cenderung menurunkan stabilitas campuran dari 1169,38 kg menjadi 642,19–847,59 kg (Martina et al., 2019). Terakhir, penelitian oleh Saleh menunjukkan bahwa campuran *styrofoam* dapat meningkatkan stabilitas seiring bertambahnya kadar substitusi, namun nilai stabilitas tertinggi yang diperoleh sebesar 495,92 kg pada kadar *styrofoam* 9% masih belum memenuhi spesifikasi standar (Saleh et al., 2014). Secara keseluruhan, variasi bahan tambah memiliki potensi meningkatkan karakteristik aspal porus, namun efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh jenis material dan kadar penggunaannya.