

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi merupakan salah satu elemen vital dalam sistem infrastruktur suatu negara karena berperan dalam menunjang aktivitas sosial, ekonomi, dan distribusi logistik secara luas. Infrastruktur transportasi sangat penting bagi pembangunan sosial-ekonomi. Sebagai komponen fundamental infrastruktur transportasi, permukaan jalan berdampak langsung pada keberlanjutan masyarakat modern dan kualitas pembangunan perkotaan (Cavalli et al., 2023). Di antara berbagai moda transportasi, jalan raya menempati posisi strategis karena menjadi penghubung utama antarkawasan dan mendukung pergerakan manusia maupun barang dalam skala lokal maupun nasional. Kualitas sistem jalan sangat ditentukan oleh desain dan jenis konstruksi perkerasan yang digunakan. Dua sistem utama perkerasan yang lazim digunakan adalah perkerasan lentur (*flexible pavement*) dan perkerasan kaku (*rigid pavement*), masing-masing dengan karakteristik dan aplikasi yang berbeda. Perkerasan lentur lebih umum digunakan pada jalan raya dan lingkungan perkotaan karena fleksibilitasnya dalam menyesuaikan deformasi subgrade serta kemudahan dalam proses pemeliharaan (Sharma et al., 2022). Sistem ini umumnya menggunakan campuran aspal sebagai material pengikat agregat, menghasilkan lapisan perkerasan yang tahan terhadap beban lalu lintas, namun tetap mampu meredam tegangan berlebih.

Campuran aspal panas (*hot mix asphalt*, HMA) merupakan material utama dalam perkerasan lentur yang terdiri dari agregat (kasar dan halus), filler, dan bahan pengikat berupa aspal minyak bumi. Komposisi dan interaksi antar material ini sangat memengaruhi kinerja akhir campuran terhadap beban lalu lintas dan lingkungan. Dalam beberapa dekade terakhir, variasi campuran aspal telah dikembangkan untuk menyesuaikan kebutuhan fungsi struktural maupun fungsional, termasuk campuran padat (*dense-graded*), *Stone Matrix Asphalt* (SMA), dan campuran berpori (*porous asphalt*). Masing-masing memiliki keunggulan tersendiri. SMA, misalnya, memiliki ketahanan terhadap deformasi plastis yang tinggi karena gradasinya yang rapat dan kadar filler tinggi (Brown et al., 1997). Di sisi lain, campuran aspal berpori dirancang untuk tujuan utama drainase, yakni mengalirkan air secara vertikal ke bawah permukaan jalan dan menghindari genangan yang berpotensi menurunkan keselamatan lalu lintas.

Aspal berpori (*porous asphalt*) merupakan sistem campuran aspal yang memiliki karakteristik rongga antar agregat yang saling terhubung, dengan tingkat porositas terbuka umumnya berkisar antara 15% hingga 25%. Tujuan utama dari struktur ini adalah menciptakan jalur aliran air sehingga perkerasan tetap kering meskipun dalam kondisi hujan deras (Diana, 2007). Keunggulan lain dari campuran ini adalah pengurangan kebisingan akibat interaksi roda dan permukaan jalan, serta mendukung manajemen air limpasan dalam kawasan perkotaan. Namun, keberhasilan penerapan aspal berpori sangat ditentukan oleh rancangan gradasi

agregat dan kadar aspal yang digunakan. Salah satu standar gradasi terbuka yang telah banyak diterapkan dan terbukti memberikan performa drainase yang baik adalah gradasi terbuka versi Australia (*Austroads OG10*) (Austroads, 2018). Gradasi ini menekankan dominasi agregat kasar (>80%) dan membatasi fraksi agregat halus serta filler untuk mencegah penyumbatan pori. Namun demikian, desain ini juga menghadirkan tantangan teknis, terutama terkait keseimbangan antara performa drainase dan stabilitas mekanik campuran.

Penerapan gradasi terbuka dalam aspal berpori harus mempertimbangkan dengan cermat kadar aspal yang digunakan. Kadar aspal yang terlalu rendah berisiko menyebabkan lemahnya ikatan antar agregat dan tingginya kehilangan partikel akibat gaya abrasi (*raveling*), sedangkan kadar yang terlalu tinggi dapat menyebabkan fenomena *binder drain-down*, yaitu keluarnya aspal bebas dari campuran akibat gaya gravitasi selama proses pencampuran dan pemadatan (Brown & Manglorkar, 1993). Selain itu, kadar aspal berlebih juga dapat menutup pori-pori terbuka sehingga menurunkan permeabilitas dan porositas campuran, yang bertentangan dengan fungsi utama dari sistem aspal berpori. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi mendalam terhadap pengaruh kadar aspal terhadap berbagai parameter kinerja campuran aspal berpori.

Untuk menjawab kebutuhan tersebut, penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi kinerja campuran aspal berpori dengan gradasi terbuka versi Australia berdasarkan variasi kadar aspal (4% hingga 6%). Evaluasi dilakukan melalui serangkaian pengujian laboratorium terhadap parameter: porositas, permeabilitas, *binder drain-down*, stabilitas Marshall, nilai *flow*, dan kehilangan massa akibat uji Cantabro. Pengujian porositas digunakan untuk mengukur volume rongga terbuka dalam campuran yang berperan dalam mendukung aliran air. Permeabilitas digunakan untuk menilai kecepatan aliran fluida melalui struktur pori, sedangkan *binder drain-down* mengevaluasi kestabilan aspal selama proses produksi. Uji stabilitas Marshall dan *flow* memberikan gambaran tentang kekuatan struktural dan deformasi plastis campuran. Terakhir, uji Cantabro digunakan untuk mengukur ketahanan campuran terhadap abrasi atau pelepasan partikel akibat gaya mekanik (Abbasalizadeh Boura & Hesami, 2020).

Dengan kata lain, peningkatan kadar aspal akan memberikan dampak yang saling bertentangan antara stabilitas dan porositas, sehingga diperlukan pencarian titik optimum kadar aspal berdasarkan evaluasi multi-parametrik. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam menetapkan kadar aspal yang ideal untuk campuran aspal berpori di Indonesia, khususnya dengan menggunakan gradasi terbuka Australia yang belum banyak digunakan dalam praktik lokal.

Kurangnya kajian empiris di Indonesia yang mengintegrasikan pendekatan gradasi terbuka versi Australia dengan analisis menyeluruh terhadap semua parameter utama kinerja campuran berpori. Sebagian besar penelitian lokal masih fokus pada penggunaan gradasi SNI untuk lapisan aus, sementara data terkait *performance balancing* antara drainase dan kekuatan mekanis dalam sistem berpori masih terbatas. Selain itu, belum banyak studi yang menggunakan kombinasi

evaluasi Cantabro, *binder drain-down*, permeabilitas, dan stabilitas Marshall secara simultan dalam konteks variasi kadar aspal untuk campuran gradasi terbuka. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya memberikan kontribusi baru dalam pengembangan desain campuran aspal berpori yang lebih adaptif terhadap kondisi iklim tropis dengan curah hujan tinggi dan kebutuhan perkerasan yang multifungsi.

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi kadar aspal terhadap nilai porositas, permeabilitas, dan binder drain-down?
2. Sejauh mana kadar aspal memengaruhi stabilitas Marshall, flow, dan ketahanan aus campuran aspal berpori gradasi terbuka?
3. Berapa kadar aspal optimum yang menghasilkan keseimbangan antara drainase dan stabilitas struktural?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh kadar aspal terhadap porositas, permeabilitas, dan binder drain-down.
2. Menganalisis pengaruh kadar aspal terhadap stabilitas Marshall, flow, dan ketahanan aus pada campuran aspal berpori gradasi terbuka.
3. Menentukan kadar aspal optimum berdasarkan integrasi parameter fungsional dan struktural.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan desain campuran aspal berpori menggunakan gradasi terbuka versi Australia dengan pendekatan evaluasi multi-parametrik. Melalui integrasi hasil uji porositas, permeabilitas, *binder drain-down*, stabilitas Marshall, *flow*, dan Cantabro loss, penelitian ini dapat menjadi acuan praktis dalam menentukan kadar aspal optimum yang mampu menjembatani kebutuhan fungsional drainase dan kestabilan struktural. Hal ini penting untuk mendukung penerapan teknologi perkerasan berpori di wilayah tropis dengan curah hujan tinggi, serta memperluas alternatif desain campuran yang adaptif terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan di Indonesia.

1.1.4 Batasan Masalah

Penelitian terkait aspal, sehingga perlu untuk membatasi masalah penelitian ini agar dapat lebih terarah.

1. Penelitian yang dilakukan berbentuk eksperimental di laboratorium.
2. Penelitian ini hanya menggunakan campuran aspal berpori (porous asphalt), bukan campuran padat atau semi padat.

3. Gradasi agregat kasar yang digunakan merujuk pada standar gradasi terbuka versi Australia (Austroads OG10).
4. Agregat kasar, agregat halus, dan debu batu berasal dari lokasi dan sumber lokal yang sama untuk memastikan keseragaman karakteristik.
5. Kadar aspal divariasikan pada rentang 4,0% hingga 6,0% dengan interval 0,5%.
6. Jenis aspal yang digunakan adalah aspal minyak bumi penetrasi 60/70 sesuai SNI.
7. Tidak dilakukan penambahan bahan aditif (modifikasi aspal atau serat tambahan).
8. Analisis data dilakukan dengan pendekatan regresi eksponensial dan linear untuk masing-masing parameter.
9. Evaluasi optimum kadar aspal didasarkan pada keseimbangan antara stabilitas, porositas, permeabilitas, dan Cantabro loss.

1.2 Teori

1.2.1 Tinjauan Umum Perkerasan Jalan Raya

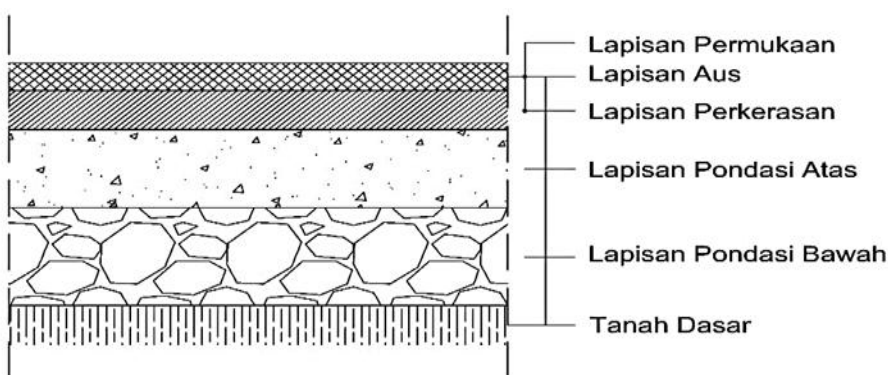
Perkerasan jalan yang telah terbangun pasti akan mengalami kerusakan seiring dengan berjalannya waktu dan beberapa faktor lainnya (Soeseno & Tajudin, 2021). Umur rencana untuk konstruksi perkerasan jalan telah ditetapkan, dan selama periode tersebut, kinerja dan kualitas jalan akan mengalami penurunan secara bertahap. Oleh karena itu, kerusakan pada jalan dianggap sebagai suatu hal yang tidak dapat dihindari (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 5 Tentang Persyaratan Teknis Jalan dan Perencanaan Teknis Jalan, 2011). Jalan digunakan sebagai prasarana yang sangat penting dalam sistem transportasi untuk menghubungkan berbagai lokasi demi memenuhi kebutuhan ekonomi, sosial, budaya, serta pertahanan dan keamanan negara. Kondisi jalan yang optimal diperlukan agar kegiatan transportasi dapat terselenggara secara efisien untuk mempercepat mobilitas manusia, barang, atau jasa dengan aman dan nyaman.

Perkembangan konstruksi jalan di dunia dimulai dari inovasi yang diperkenalkan oleh Thomas Telford (1757–1834) dan John Loudon McAdam (1756–1836), yang menciptakan struktur jalan dengan pelapisan atas (lapisan aus) menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Teknologi ini kemudian menjadi standar dalam pembangunan jalan secara global. Seiring waktu, metode pembangunan jalan terus berkembang, termasuk penerapan campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt*) yang dikenal sebagai perkerasan lentur (*flexible pavement*). Di sisi lain, teknologi perkerasan kaku (*rigid pavement*) kini juga telah dikembangkan sebagai alternatif, dengan menggunakan semen sebagai bahan pengikat utama. Perkerasan jenis ini memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan perkerasan lentur, sehingga disebut sebagai perkerasan kaku (Woro Sukarno, 2022). Sejalan dengan kemajuan teknologi dan kebutuhan pembangunan di berbagai sektor, desain dan klasifikasi jalan juga mengalami perkembangan, baik dari segi fungsi, tingkat

penggunaan, maupun struktur konstruksinya. Secara fungsional, jalan dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori berdasarkan peran dan tujuannya.

- Jalan Arteri, adalah jalan yang melayani angkutan utama dengan ciri-ciri perjalanan jarak jauh, kecepatan rata-rata tinggi, dan jumlah jalan masuk dibatasi secara efisien;
- Jalan Lokal, adalah jalan yang melayani angkutan setempat dengan ciri-ciri perjalanan jarak dekat, dan jumlah jalan masuk tidak dibatasi.
- Jalan Kolektor, adalah jalan yang melayani angkutan pengumpulan/pembagian dengan ciri-ciri perjalanan jarak sedang, kecepatan rata-rata sedang, dan jumlah jalan masuk dibatasi.

Konstruksi perkerasan lentur terdiri dari:



Gambar 1 Komponen Perkerasan Lentur (Sumber: dikutip dari tugas akhir Eko Agus Nugroho Universitas Negeri Semarang)

1.2.2 Jenis Campuran Aspal

Jenis beton aspal yang ada di Indonesia saat ini adalah:

Laston (Lapisan Aspal Beton) adalah jenis beton aspal dengan gradasi menerus yang umum digunakan pada jalan-jalan yang menahan beban lalu lintas berat. Laston, juga dikenal sebagai Asphalt Concrete (AC), memiliki stabilitas sebagai karakteristik paling penting dalam campurannya. Tebal nominal minimum Laston berkisar antara 4-6 cm, tergantung pada fungsinya. Terdapat tiga jenis campuran Laston, yaitu:

- Laston sebagai lapis aus, dikenal dengan nama AC-WC (Asphalt Concrete-Wearing Course). Tebal nominal minimum AC-WC adalah 4 cm.
- Laston sebagai lapis pengikat, dikenal dengan nama AC-BC (Asphalt Concrete-Binder Course). Tebal nominal minimum AC-BC adalah 5 cm.
- Laston sebagai lapis pondasi, dikenal dengan nama AC-Base (Asphalt Concrete-Base). Tebal minimum AC-Base adalah 6 cm.

Lataston (Lapis Tipis Aspal Beton) adalah jenis beton aspal dengan gradasi senjang yang dikenal juga sebagai HRS (Hot Rolled Sheet). Karakteristik utama beton aspal pada campuran ini adalah durabilitas dan fleksibilitas. Berdasarkan fungsinya, Lataston dibedakan menjadi dua jenis campuran, yaitu:

- Lataston sebagai lapisan aus, dikenal dengan nama HRS-WC (Hot Rolled Sheet-Wearing Coarse). Tebal nominal minimum HRS-WC adalah 3 cm.
- Lataston sebagai lapisan pondasi, dikenal dengan nama HRS-Base (Hot Rolled Sheet-Base). Tebal nominal minimum HRS-Base adalah 3,5 cm.

Latasir (Lapisan Tipis Aspal Pasir) adalah jenis beton aspal yang dirancang untuk jalan dengan lalu lintas ringan, terutama di area di mana agregat kasar sulit atau tidak tersedia. Lapisan ini memiliki ketahanan alur (rutting) yang rendah, sehingga tidak direkomendasikan untuk digunakan pada jalan dengan lalu lintas berat atau di area tanjakan. Latasir juga dikenal sebagai SS (Sand Sheet) atau HRSS (Hot Rolled Sand Sheet). Berdasarkan gradasi agregatnya, campuran Latasir dapat dibedakan menjadi beberapa jenis:

- Latasir kelas A, dikenal dengan nama HRSS-A atau SS-A. Tebal nominal HRSS-A adalah 1,5 cm
- Latasir kelas B, dikenal dengan nama HRSS-A atau SS-A. Tebal nominal HRSS-A adalah 2 cm. Gradasi agregat HRSS-B lebih kasar.

Lapis perata adalah beton aspal yang diterapkan sebagai lapisan untuk meratakan dan membentuk penampang melintang pada permukaan jalan yang sudah ada. Semua jenis campuran beton aspal dapat digunakan untuk tujuan ini. Namun, untuk membedakan dengan campuran yang digunakan pada lapisan perkerasan jalan baru, huruf "L" ditambahkan pada setiap jenis campuran beton aspal tersebut. Contohnya, campuran yang digunakan adalah AC-WC (L), AC-BC (L), dan AC-Base (L).

SMA (Stone Matrix Asphalt) adalah jenis beton aspal dengan gradasi terbuka dan lapisan aspal yang tebal. Bahan ini dilengkapi dengan tambahan fiber selulosa yang berfungsi untuk menstabilkan kadar aspal yang tinggi. Lapisan ini terutama diaplikasikan pada jalan-jalan yang menahan beban lalu lintas berat. Terdapat tiga jenis SMA, yaitu:

- SMA 0/5 dengan tebal perkerasan 1,5 – 3 cm
- SMA 0/8 dengan tebal perkerasan 2 – 4 cm
- SMA 0/11 dengan tebal perkerasan 3 – 5 cm

HSMA (High Stiffness Modulus Asphalt) adalah jenis beton aspal yang menggunakan aspal dengan tingkat penetrasi rendah, yaitu 30/40. Lapisan ini terutama diterapkan pada jalan-jalan yang menanggung beban lalu lintas berat.

1.2.3 Aspal Berpori dan Gradasi Terbuka

Aspal berpori (*porous asphalt*) merupakan jenis campuran aspal yang dirancang khusus dengan struktur berongga untuk memungkinkan air hujan atau limpasan permukaan mengalir langsung ke dalam lapisan perkerasan, bukan mengalir di atas permukaan jalan. Teknologi ini merupakan solusi rekayasa perkerasan yang menekankan fungsi drainase sekaligus meningkatkan keselamatan lalu lintas dengan mengurangi risiko hidroplaning dan genangan air (Putman & Kline, 2011). Campuran aspal berpori memiliki void antar agregat yang saling terhubung (connected voids) dengan tingkat porositas terbuka umumnya berkisar antara 15%

hingga 25%, sehingga menjadikan air mampu meresap secara vertikal ke bawah lapisan permukaan jalan (Austroads, 2018; Caltrans, 2021).

Secara umum, struktur dari campuran aspal berpori berbeda signifikan dibandingkan dengan campuran padat seperti *dense-graded asphalt*, karena tidak memprioritaskan kepadatan maksimum, melainkan keseimbangan antara stabilitas mekanik dan fungsi drainase. Keunggulan lainnya termasuk kemampuan mengurangi kebisingan lalu lintas (noise reduction) dan peningkatan kualitas lingkungan dengan mendukung infiltrasi air ke lapisan subgrade atau sistem resapan (Wang et al., 2025). Namun demikian, campuran ini juga memiliki tantangan, seperti penurunan stabilitas struktural jika porositas terlalu tinggi, serta risiko penyumbatan pori (clogging) oleh debu dan sedimen.

Prinsip utama dalam perancangan aspal berpori adalah penerapan gradasi terbuka (*open-graded aggregate*) yang dicirikan oleh proporsi besar agregat kasar dan hampir tidak adanya fraksi agregat halus (fines). Tujuan dari gradasi terbuka adalah menciptakan struktur kerangka agregat (*stone-on-stone contact*) dengan rongga antar agregat yang cukup besar dan tidak terisi sempurna oleh aspal maupun filler, sehingga membentuk jaringan pori yang memungkinkan aliran fluida. Sebaliknya, penambahan terlalu banyak filler atau aspal justru akan menutup pori-pori dan mengurangi permeabilitas. Oleh karena itu, desain gradasi terbuka menuntut kontrol ketat terhadap distribusi ukuran partikel agar tercapai kinerja yang seimbang antara drainase dan stabilitas (Brown & Manglorkar, 1993).

Salah satu gradasi terbuka yang banyak digunakan di dunia adalah gradasi terbuka versi Australia, sebagaimana tercantum dalam standar *Austroads AGPT04B-14* dan *AGPT02-17*. Gradasi ini dirancang untuk menghasilkan nilai *air void* yang cukup tinggi, dengan batas maksimum ukuran agregat (nominal maximum aggregate size) biasanya 10 mm atau 14 mm, dan porsi fraksi yang lolos saringan 2.36 mm dibatasi seminimal mungkin. Karakteristik gradasi Australia ini umumnya mengandung sekitar 85–90% agregat kasar, 5% agregat halus (pasir), dan sekitar 5–10% filler (debu/batu) tergantung kebutuhan desain (Austroads, 2018). Penerapan gradasi ini terbukti menghasilkan campuran dengan permeabilitas tinggi (>0.2 cm/s), binder drain-down yang terkendali, serta tingkat porositas terbuka $>18\%$ yang sesuai dengan spesifikasi fungsi drainase (APRG Report No. 21, 2001).

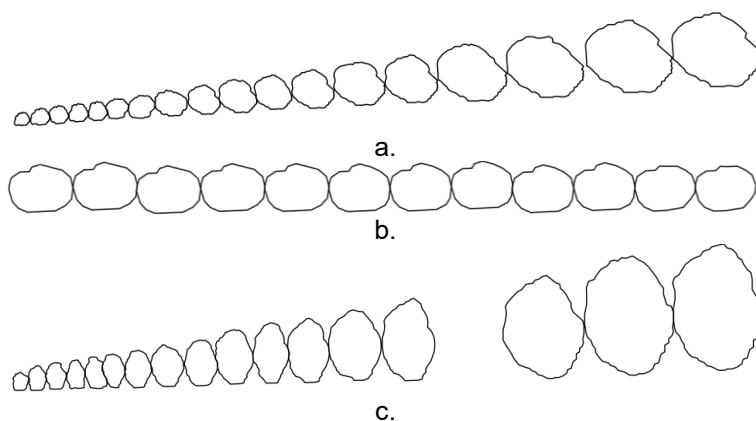
1.2.4 Material Penyusun Aspal Berpori

1.2.4.1 Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan komponen utama dalam campuran aspal berpori yang membentuk kerangka struktural campuran dan memengaruhi kekuatan, porositas, serta stabilitas secara langsung. Dalam campuran aspal berpori, agregat kasar menyusun sekitar 85–90% dari total agregat, berperan sebagai elemen pengunci (interlock) yang menciptakan rongga antar butiran. Rongga-rongga ini kemudian menjadi jalur utama aliran air dalam sistem drainase permukaan (Brown & Manglorkar, 1993). Agregat kasar yang digunakan harus memiliki kekuatan tinggi, bentuk yang tidak pipih atau lonjong secara berlebihan (flakiness index dan

elongation index rendah), serta tahan terhadap aus dan fragmentasi akibat lalu lintas. Standar seperti *Austroads Guide to Pavement Technology* dan *SNI 1969:2008* mensyaratkan nilai abrasi maksimum 40% (uji Los Angeles), berat jenis minimal 2.5 gr/cm³, dan penyerapan air kurang dari 3% agar menjamin ketahanan jangka panjang dan kestabilan struktural dari perkerasan pori. Dalam konteks aspal berpori, gradasi agregat kasar harus disusun secara terbuka (*open-graded*) dengan meminimalkan fraksi halus agar pori-pori tidak tertutup, sehingga aliran air dapat berlangsung tanpa hambatan (Huang, 2004). Beberapa penelitian juga menekankan pentingnya penggunaan agregat lokal yang telah melalui pengujian standar untuk menjamin kualitas dan efisiensi produksi (Pratama et al., 2025).

Gradasi agregat kasar merupakan aspek fundamental dalam desain campuran aspal berpori karena menentukan struktur kerangka agregat (*aggregate skeleton*) dan memengaruhi secara langsung nilai porositas dan stabilitas campuran. Dalam sistem gradasi terbuka (*open-graded*), distribusi ukuran partikel agregat kasar didesain untuk menciptakan kontak antar butiran kasar (*stone-on-stone contact*) dengan minimal intervensi dari fraksi halus, sehingga tercipta pori antar partikel yang saling terhubung. Ciri khas dari gradasi terbuka adalah rendahnya fraksi agregat yang lolos saringan ukuran kecil seperti 2,36 mm, dan tingginya proporsi agregat berukuran besar, misalnya 10 mm hingga 20 mm. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa rongga antar agregat tidak terisi sempurna oleh aspal atau filler, sehingga memungkinkan aliran air secara vertikal dalam struktur campuran (Austroads, 2018). Dalam prakteknya, kontrol terhadap gradasi sangat penting karena jika distribusi ukuran partikel terlalu sempit (*uniform*), campuran akan mudah mengalami segregasi; sebaliknya, jika terlalu banyak fraksi kecil, maka porositas dan permeabilitas akan menurun drastis. Oleh karena itu, desain gradasi agregat kasar harus memenuhi kurva gradasi tertentu yang telah distandarisasi, seperti yang terdapat dalam *AGPT04B-14* dari Austroads, yang menetapkan batas atas dan bawah untuk setiap fraksi saringan. Gradasi ini memungkinkan pencapaian porositas efektif minimal 18% dan permeabilitas lebih dari 0,2 cm/s, sesuai kriteria campuran drainase. Jenis gradasi agregat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Gradasi agregat (a) rapat, (b) seragam, dan (c) senjang

Tabel 1 Perbandingan gradasi Australia Terbuka dan SMA Halus SNI

Ukuran Saringan (mm)	Austroads OG10 (%)	SMA Halus (SNI 8129-2015) (%)
19,0	100	100
12,5	85–100	90–100
9,5	45–70	50–80
4,75	10–25	20–35
2,36	7–15	16–24
1,18	6–12	12–20
0,600	5–10	10–15
0,300	4–8	9–13
0,075	2–5	8–11

1.2.4.2 Agregat Halus

Agregat halus dalam campuran aspal berpori digunakan dalam jumlah terbatas, biasanya sekitar 5–10% dari total agregat, untuk mengisi sebagian ruang antar agregat kasar dan membantu stabilisasi campuran. Namun, tidak seperti dalam campuran padat (*dense-graded*), penambahan agregat halus dalam campuran berpori harus dikontrol ketat karena berlebihan agregat halus dapat mengisi rongga antar butiran agregat kasar dan menurunkan nilai porositas dan permeabilitas campuran (Zoorob et al., 2002). Agregat halus yang digunakan harus bersih, bebas dari tanah liat atau partikel plastis, serta memiliki nilai *sand equivalent* minimal 50% sebagaimana disyaratkan dalam *SNI 3403:2008*. Tujuan utama penggunaannya adalah untuk memperkuat ikatan antara agregat dan aspal, meningkatkan kohesi mastic secara lokal, serta mencegah segregasi. Penambahan agregat halus yang optimal dapat membantu meningkatkan stabilitas Marshall dan ketahanan aus tanpa secara signifikan mengurangi fungsi drainase. Oleh karena itu, dalam perancangan gradasi terbuka, agregat halus hanya digunakan dalam proporsi minimum yang cukup untuk meningkatkan kohesi tanpa mengganggu keterhubungan pori (Austroads, 2018; Widyatmoko, 2011).

1.2.4.3 Filler (Debu Batu)

Filler atau bahan pengisi berfungsi untuk mengisi ruang mikro antar agregat dan memperkuat pasta aspal (mastic) yang terbentuk. Dalam aspal berpori, penggunaan filler biasanya dibatasi maksimal 10% dari total agregat untuk mencegah penutupan pori-pori efektif. Filler yang umum digunakan dalam praktik adalah debu batu (limestone dust), fly ash, atau semen, yang memiliki partikel sangat halus dan luas permukaan tinggi. Fungsi utamanya adalah untuk meningkatkan viskositas mastic, memperkuat kohesi internal, dan meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi plastis dan pengikisan (Cantabro loss) (Kadar, 2013). Namun demikian, pada campuran berpori, penggunaan filler secara berlebihan

sangat berisiko menutup pori antar agregat dan mengurangi permeabilitas secara signifikan. Oleh karena itu, kualitas filler yang digunakan harus memenuhi kriteria berat jenis minimal 2.5 gr/cm^3 dan kadar air rendah.

1.2.4.4 Aspal Minyak (Aspal Penetrasi 60/70)

Aspal minyak tipe penetrasi 60/70 merupakan bahan pengikat (*binder*) utama dalam campuran aspal berpori dan dipilih karena karakteristik termoplastiknya yang mampu mencair saat dipanaskan dan mengeras kembali saat dingin. Aspal ini memiliki nilai penetrasi sedang yang memberikan keseimbangan antara fleksibilitas dan kekakuan, penting dalam menjaga kohesi antar partikel agregat dan merespon deformasi akibat beban lalu lintas atau perubahan suhu (Huang, 2004). Dalam campuran berpori, aspal berperan tidak hanya sebagai perekat, tetapi juga sebagai pelapis agregat untuk mengurangi pelepasan partikel (*raveling*). Namun, karena campuran ini memiliki rongga terbuka besar, risiko *binder drain-down*—yakni aspal mengalir keluar dari struktur saat pencampuran atau pemadatan—menjadi perhatian utama. Oleh karena itu, kadar aspal harus dikontrol dengan ketat agar cukup membasahi agregat tanpa menyebabkan kelebihan aspal bebas (*free asphalt*). Selain itu, sifat-sifat aspal seperti titik lembek (*softening point*), daktilitas, viskositas pencampuran (*mixing temperature*), dan titik nyala juga harus memenuhi standar teknis seperti *SNi 06-2441-1991* dan *AASHTO T49*. Penggunaan aspal pen 60/70 dalam campuran berpori terbukti memberikan performa yang baik secara mekanik dan termal, serta cukup stabil dalam iklim tropis seperti di Indonesia (Woro Sukarno, 2022; Austroads, 2018).

1.2.5 Karakteristik Stabilitas Marshall

Pengujian Marshall merupakan salah satu metode paling umum yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja mekanis campuran beraspal panas (*Hot Mix Asphalt/HMA*). Metode ini dikembangkan oleh Bruce Marshall pada tahun 1939 di Mississippi State Highway Department dan kemudian disempurnakan oleh U.S. Army Corps of Engineers selama Perang Dunia II untuk menilai daya tahan perkerasan jalan lapangan udara. Uji Marshall bertujuan untuk menentukan stabilitas (*stability*) dan kelelahan (*flow*) dari suatu campuran aspal padat, yang secara langsung mencerminkan kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas dan deformasi plastis (Aljassar et al., 2016).

Secara prinsip, uji Marshall menilai resistensi campuran terhadap deformasi akibat pembebanan vertikal melalui pengujian benda uji silindris berdiameter 101,6 mm dan tinggi 63,5 mm yang telah dipadatkan pada kondisi standar. Pengujian dilakukan pada suhu 60°C untuk mensimulasikan kondisi lapangan saat perkerasan menerima beban lalu lintas pada suhu tinggi. Dua parameter utama yang diperoleh adalah nilai stabilitas Marshall (*Marshall Stability*) dan nilai kelelahan Marshall (*Marshall Flow*).

1.2.5.1 Konsep Dasar Stabilitas Marshall

Stabilitas Marshall didefinisikan sebagai beban maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji campuran aspal sebelum terjadi kegagalan plastis pada suhu pengujian tertentu. Nilai ini diukur dalam satuan kilogram atau kilonewton dan menggambarkan daya dukung serta ketahanan campuran terhadap deformasi permanen (*rutting*).

Stabilitas Marshall dipengaruhi oleh beberapa faktor utama:

- Kadar Aspal (Asphalt Content)
Kadar aspal berpengaruh langsung terhadap kekakuan dan kohesi campuran. Kadar aspal terlalu rendah menyebabkan campuran kering dan rapuh, sedangkan kadar terlalu tinggi menyebabkan campuran menjadi plastis dan mudah mengalami deformasi.
- Jenis dan Gradasi Agregat
Agregat dengan bentuk bersudut dan gradasi rapat (*well-graded*) memberikan interlocking yang baik sehingga meningkatkan stabilitas.
- Kepadatan (Density) dan Rongga Udara (Air Voids)
Kepadatan tinggi menandakan sedikit rongga udara, meningkatkan kontak antar butiran dan kekuatan geser internal. Namun, rongga udara yang terlalu sedikit dapat menyebabkan *bleeding* pada suhu tinggi.
- Sifat Aspal (Viskositas dan Penetrasi)
Aspal dengan viskositas tinggi memberikan daya lekat dan kekakuan lebih baik, meningkatkan stabilitas terutama pada iklim tropis.

Secara matematis, stabilitas berhubungan dengan daya dukung dan kohesi internal campuran. Semakin tinggi nilai stabilitas, semakin besar kemampuan lapisan perkerasan dalam menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi berlebih.

1.2.5.2 Parameter Pendukung dalam Uji Marshall

Selain nilai stabilitas dan flow, pengujian Marshall juga menghasilkan beberapa parameter tambahan yang digunakan untuk menilai kinerja keseluruhan campuran, yaitu:

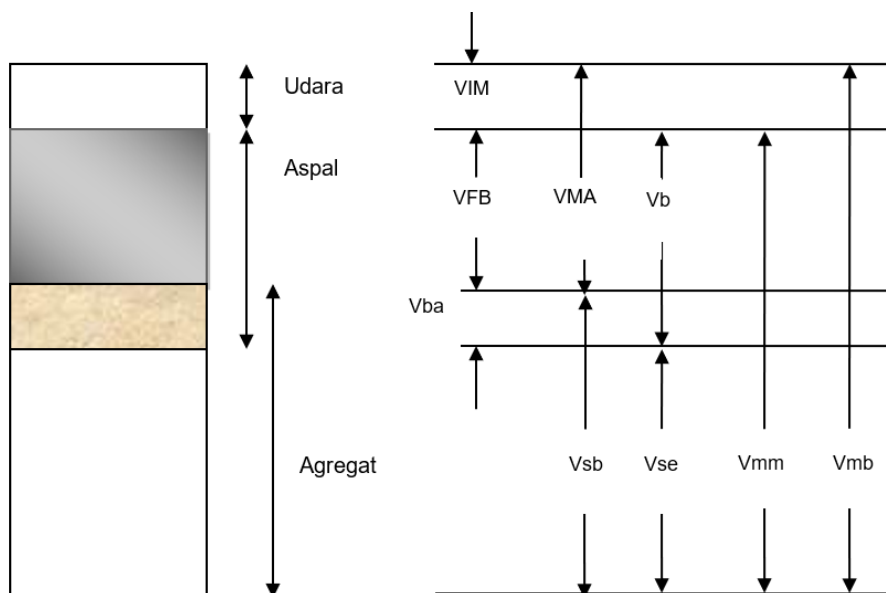
- Flow Value (Nilai Kelelehan)
Merupakan deformasi plastis total (dalam satuan mm) yang terjadi saat beban maksimum tercapai. Nilai flow yang terlalu kecil menunjukkan campuran yang terlalu kaku dan rentan retak, sedangkan nilai terlalu besar menunjukkan campuran yang lunak dan mudah mengalami alur (*rutting*).
- Marshall Quotient (MQ)
Didefinisikan sebagai rasio antara nilai stabilitas terhadap nilai flow.

$$MQ = \frac{\text{Stabilitas}}{\text{Flow}}$$

Nilai MQ yang tinggi menunjukkan campuran memiliki kekakuan dan daya tahan deformasi tinggi, sementara nilai rendah menunjukkan campuran yang fleksibel namun kurang stabil.

1.2.5.3 Parameter Volumetrik

Kinerja campuran beraspal sangat ditentukan oleh volumetrik campuran dalam keadaan padat yang terdiri dari : rongga udara dalam campuran (VIM), rongga di antara agregat (VMA), dan rongga terisi aspal (VFA). VMA adalah rongga di antara butir-butir agregat dalam campuran padat yang meliputi rongga udara (VIM) dan volume aspal efektif, VMA dinyatakan dalam persen terhadap volume total. VIM adalah rongga udara di antara agregat yang diselimuti aspal, VIM dinyatakan dalam persen terhadap volume total campuran. VFB adalah bagian dari VMA yang diisi oleh aspal efektif dan dinyatakan dalam perbandingan antara (VMA-VIM) terhadap VMA. Volumetrik campuran beraspal diilustrasikan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Volumetrik campuran beraspal

Dimana :

VMA = volume rongga diantara mineral agregat

Vmb = volume bulk/curah campuran padat

Vmm = volume campuran tanpa rongga udara

VIM = volume rongga dalam campuran

Vb = volume aspal

VFB = volume aspal mengisi rongga

Vba = volume aspal diserap agregat

Vsb = volume agregat (berdasarkan berat jenis bulk/curah)

Vse = volume agregat (berdasarkan berat jenis efektif)

Konsep mengenai berat jenis yang digunakan diperlihatkan pada rumusan sebagai berikut:

a. Berat Jenis Bulk Agregat (Gsb)

Pada total agregat yang terdiri dari beberapa fraksi agregat kasar dan agregat halus yang masing-masing memiliki berat jenis yang berlainan, maka berat jenis gabungan agregat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{G_1 + G_2 + \dots + G_n}}$$

Dimana :

Gsb = berat jenis bulk/curah total agregat
 P_1, P_2, P_n = persentase dalam berat agregat 1,2,n
 G_1, G_2, G_n = berat jenis bulk/curah agregat 1,2, n

b. Berat Jenis Semu Agregat (Gsa)

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{G_1 + G_2 + \dots + G_n}}$$

Dimana :

Gsa = berat jenis semu total agregat
 P_1, P_2, P_n = persentase dalam berat agregat 1,2,n
 G_1, G_2, G_n = berat jenis semu agregat 1,2, n

c. Berat Jenis Semu Efektif Agregat (Gse)

$$G_{se} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2}$$

Dimana :

Gse = berat jenis efektif agregat
 Gsb = berat jenis bulk/curah total agregat
 Gsa = berat jenis semu total agregat

d. Berat Jenis Maksimum Teoritis (Gmm)

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{\%agg}{B_j \text{ agg}} + \frac{\%aspal}{B_j \text{ aspal}}}$$

Dimana :

Gmm = berat jenis maksimum

Hasil perhitungan berat jenis diatas dapat digunakan pada perhitungan untuk mendapatkan sifat volumetrik dari campuran, yaitu :

- VMA (Voids In Mineral Agregate)

Menggambarkan volume total rongga antara butiran agregat dalam campuran padat, termasuk rongga yang terisi aspal dan udara. Nilai VMA yang memadai penting untuk memastikan cukup ruang bagi lapisan film aspal yang mengikat agregat.

$$VMA = 100 - \left(\frac{Gmb}{Gsb} \right) \times \left(\frac{100}{100+Pb} 100 \right)$$

Dimana :

Gmb = berat jenis curah campuran padat

Pb = kadar aspal

Gsb = berat jenis curah agregat

- VIM (Voids In Mix)

Menunjukkan persentase rongga udara yang tersisa dalam campuran setelah pemadatan. Nilai ideal berkisar antara 3–5%, yang memungkinkan ekspansi aspal akibat suhu dan mencegah bleeding.

$$VIM = 100 \left(\frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \right)$$

Dimana :

Gmm = berat jenis maksimum campuran (tidak ada rongga udara)

Gmb = berat jenis curah padat campuran

- VFB (Voids Filled with Bitument)

Menunjukkan persentase VMA yang terisi oleh bitumen. Nilai yang optimal berada pada rentang 65–75%, menunjukkan keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas campuran.

$$VFB = 100 \left(\frac{VMA - VIM}{VMA} \right)$$

Dimana :

VFB = rongga terisi aspal

VMA = rongga dalam mineral agregat

VIM = rongga dalam campuran

1.2.5.4 Hubungan Antara Stabilitas Marshall dan Parameter Campuran

Hubungan antara kadar aspal, stabilitas, dan flow mengikuti pola kurva parabolik. Pada kadar aspal rendah, stabilitas meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal karena peningkatan daya lekat antar partikel. Namun, setelah melewati kadar optimum, stabilitas menurun akibat campuran menjadi terlalu plastis dan kehilangan interlocking agregat. Titik tertinggi kurva tersebut disebut kadar aspal optimum (Optimum Bitumen Content – OBC), yang memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas dan fleksibilitas.

Secara umum, karakteristik hubungan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Pada kadar aspal di bawah OBC, campuran bersifat kaku, rapuh, dan mudah retak.
- Pada kadar aspal mendekati OBC, diperoleh keseimbangan antara kekakuan dan daya tahan deformasi.

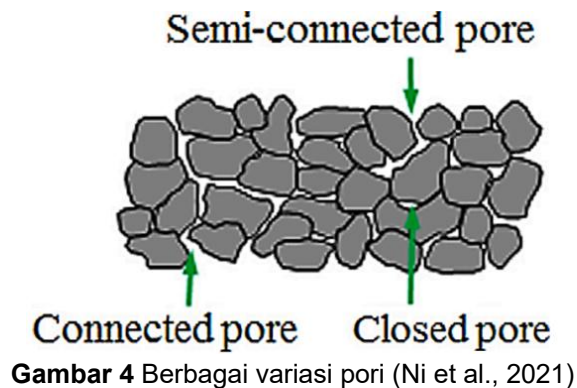
Pada kadar aspal di atas OBC, campuran menjadi lunak, mengalami bleeding, dan kehilangan stabilitas.

1.2.6 Porositas

Porositas merupakan salah satu parameter fisik paling penting dalam desain campuran aspal berpori, karena secara langsung memengaruhi fungsi drainase dan stabilitas struktural dari perkerasan. Secara umum, porositas mengacu pada proporsi volume rongga atau ruang kosong yang terdapat di antara butiran agregat dalam suatu material padat terhadap total volumenya. Dalam sistem perkerasan aspal berpori, pori-pori tersebut memungkinkan air hujan meresap dan mengalir ke bawah permukaan perkerasan, sehingga mengurangi risiko genangan dan meningkatkan keamanan lalu lintas, terutama dalam kondisi basah.

Porositas dalam campuran aspal berpori didominasi oleh *interconnected voids* atau pori-pori terbuka yang saling terhubung, karena jenis inilah yang menentukan kemampuan aliran fluida (air) melalui struktur campuran. Sementara itu, pori-pori tertutup yang tidak saling terhubung tidak berkontribusi terhadap permeabilitas, namun tetap memengaruhi berat jenis dan kapasitas termal campuran. Porositas yang tinggi umumnya dianggap menguntungkan bagi campuran aspal berpori, dengan nilai ideal di atas 18% menurut beberapa standar internasional seperti Austroads dan Federal Highway Administration (FHWA).

Namun demikian, tingginya porositas juga membawa tantangan teknis. Jika porositas terlalu besar, struktur agregat menjadi kurang stabil, meningkatkan risiko abrasi dan kerusakan akibat beban lalu lintas berulang. Pada kondisi ini, agregat cenderung kehilangan kontak yang rapat dan tidak terkunci dengan baik, sehingga mengurangi daya dukung campuran. Oleh karena itu, keseimbangan antara porositas fungsional untuk drainase dan kekuatan mekanik harus menjadi perhatian utama dalam proses desain campuran. Porositas juga berkaitan erat dengan jenis dan gradasi agregat: gradasi terbuka dengan sedikit butiran halus menghasilkan porositas yang tinggi, sedangkan gradasi rapat akan menurunkan porositas secara signifikan. Gambar 4 menunjukkan jenis-jenis pori.



1.2.6 Permeabilitas

Permeabilitas adalah ukuran kemampuan suatu material berpori untuk memungkinkan fluida (air) mengalir melewatinya. Dalam konteks perkerasan jalan, permeabilitas dari campuran aspal berpori merupakan indikator utama dari efektivitas sistem drainase vertikal. Sistem ini dirancang untuk mengalirkan air hujan langsung ke lapisan bawah tanpa mengalir di atas permukaan perkerasan, sehingga sangat penting untuk mencegah genangan dan meningkatkan keselamatan berkendara, khususnya pada kecepatan tinggi.

Berbeda dengan porositas yang hanya menunjukkan volume ruang kosong, permeabilitas mempertimbangkan sejauh mana pori-pori tersebut saling terhubung dan mampu mengalirkan fluida. Oleh karena itu, dua campuran dengan porositas sama belum tentu memiliki permeabilitas yang sama, karena distribusi, ukuran, dan konektivitas pori juga memainkan peran penting. Campuran dengan pori-pori besar yang saling terhubung akan memiliki permeabilitas tinggi, sementara campuran dengan pori-pori kecil atau tidak terhubung akan memiliki permeabilitas rendah, meskipun nilai porositasnya tinggi.

Nilai permeabilitas yang memadai sangat penting agar air dapat cepat mengalir dari permukaan jalan ke sub-base dan sistem drainase, mencegah akumulasi air yang dapat menyebabkan hidroplaning, kerusakan iklim dingin (freeze-thaw), dan pelunakan lapisan bawah. Di sisi lain, permeabilitas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan masalah seperti infiltrasi partikel halus dari bawah, yang dapat menyumbat pori-pori dan mengurangi performa drainase seiring waktu.

Permeabilitas sangat dipengaruhi oleh kadar aspal dan gradasi agregat. Peningkatan kadar aspal umumnya menurunkan permeabilitas karena rongga antar agregat terisi oleh mastic. Penelitian Mahmud et al. (2021) menunjukkan bahwa terdapat nilai optimum kadar aspal yang mampu menjaga keseimbangan antara permeabilitas dan kekuatan mekanik campuran. Jika kadar aspal terlalu rendah, campuran akan rapuh dan mudah rontok; jika terlalu tinggi, campuran kehilangan fungsi drainase karena pori-pori tertutup oleh aspal.

1.2.7 Binder-drain Down

Binder drain-down adalah fenomena dimana sebagian dari aspal pengikat (binder) dalam campuran aspal—terutama pada campuran bergradasi terbuka seperti porous asphalt—mengalir ke bawah akibat pengaruh gravitasi selama proses pemanasan, pengangkutan, atau pemadatan (Devulapalli et al., 2022; Hamzah et al., 2012). Fenomena ini menjadi isu penting karena drain-down dapat menyebabkan segregasi vertikal campuran, mengurangi kadar aspal pada bagian atas dan menumpuk di bagian bawah, yang pada akhirnya berdampak pada menurunnya kohesi, kestabilan struktural, dan kinerja jangka panjang dari perkerasan jalan.

Campuran berpori seperti porous asphalt secara khusus sangat rentan terhadap drain-down karena tingginya porositas dan rendahnya fraksi agregat halus. Tidak adanya butiran halus yang memadai untuk menyerap atau menahan aspal menyebabkan aspal cenderung mengalir bebas melalui rongga agregat yang terbuka, apalagi saat viskositas aspal menurun pada suhu tinggi. Oleh karena itu, pengendalian binder drain-down menjadi tantangan utama dalam desain campuran berpori yang memerlukan perhatian khusus dalam pemilihan kadar aspal, jenis agregat, serta penggunaan material tambahan seperti serat atau filler.

Menurut studi Austroads (2012), batas maksimum binder drain-down yang dapat ditoleransi dalam campuran aspal pori berada pada kisaran $<0,3\%$ berdasarkan berat total campuran. Jika nilai drain-down melebihi ambang tersebut, maka risiko segregasi dan penurunan performa jangka panjang meningkat secara signifikan. Dalam penelitian lain oleh Mallick et al. (2000), disarankan penggunaan *drain-down test basket method* untuk mengevaluasi potensi drain-down dari berbagai campuran pada suhu pencampuran dan pemadatan aktual.

Beberapa faktor utama yang memengaruhi besarnya binder drain-down meliputi:

- **Kadar aspal:** Semakin tinggi kadar aspal, semakin besar potensi drain-down. Kelebihan aspal tidak tertahan oleh struktur agregat dan cenderung mengalir ke bawah.
- **Gradasi agregat:** Gradasi terbuka dengan fraksi halus rendah memperbesar ruang antar agregat dan mengurangi daya tahan terhadap aliran aspal.
- **Viskositas aspal:** Viskositas yang rendah pada suhu pencampuran atau pemadatan menyebabkan aspal lebih mudah mengalir.
- **Waktu dan suhu pemanasan:** Semakin lama dan tinggi suhu campuran disimpan sebelum pemadatan, semakin besar kemungkinan drain-down terjadi.
- **Jenis filler atau serat:** Penggunaan filler aktif seperti semen, fly ash, atau serat (fiber) dapat membantu menahan aspal dan menurunkan drain-down secara signifikan.

Implikasi dari drain-down yang berlebihan adalah terjadinya zona “kering” di bagian atas spesimen dan zona jenuh aspal di bagian bawah, yang masing-masing memiliki kekuatan dan ketahanan aus yang buruk. Kondisi ini meningkatkan kerentanan terhadap retak awal dan kerusakan dini.

1.2.8 Cantabro

Ketahanan terhadap abrasi adalah parameter penting dalam menilai durabilitas campuran aspal poros, terutama karena jenis perkerasan ini memiliki porositas tinggi dan fraksi halus yang rendah, yang dapat membuatnya lebih rentan terhadap kerusakan permukaan akibat gaya geser, beban lalu lintas, dan pengaruh lingkungan. Salah satu metode evaluasi yang banyak digunakan untuk mengukur ketahanan campuran aspal poros terhadap aus adalah uji Cantabro.

Pengujian Cantabro dirancang untuk menilai sejauh mana agregat dalam campuran aspal poros dapat terlepas dari struktur akibat gaya sentrifugal dalam kondisi kering (dry Cantabro) atau jenuh air (wet Cantabro). Pengujian ini dilakukan dengan menempatkan spesimen silinder ke dalam mesin abrasi Los Angeles tanpa bola baja, kemudian diputar selama 300 putaran sesuai standar seperti ASTM D7064 dan AASHTO T305. Setelah proses pemutaran, massa spesimen diukur kembali untuk menentukan persentase kehilangan material (Cantabro loss). Nilai kehilangan massa ini memberikan indikasi langsung terhadap kohesi internal dan daya tahan permukaan dari campuran aspal poros (Watson et al., 2003; Wu et al., 2011).

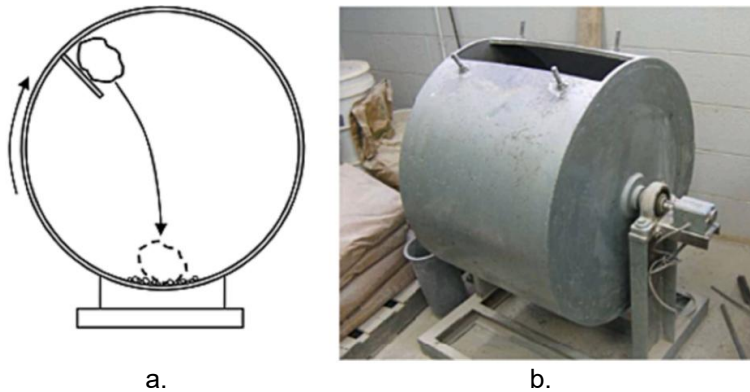
Aspal poros secara umum memiliki ketahanan aus yang lebih rendah dibandingkan campuran aspal konvensional karena karakteristik gradasi terbuka yang membentuk banyak rongga antar agregat. Rongga ini sangat penting untuk fungsi drainase, tetapi sekaligus mengurangi kontinuitas dan kekakuan struktural campuran. Oleh karena itu, Cantabro loss yang tinggi dapat mengindikasikan lemahnya ikatan antar agregat akibat kadar aspal yang tidak mencukupi, distribusi aspal yang tidak merata, atau struktur agregat yang kurang terkunci secara mekanis (Gesoglu et al., 2014).

Sejumlah faktor memengaruhi performa Cantabro, antara lain:

- **Kadar aspal:** Kadar aspal yang terlalu rendah tidak cukup melapisi dan mengikat agregat, menyebabkan partikel mudah lepas. Sebaliknya, kadar yang terlalu tinggi bisa menurunkan kekakuan dan menyebabkan drain-down.
- **Gradasi agregat:** Gradasi terbuka memperbesar ukuran rongga, mengurangi kekompakan, dan meningkatkan potensi partikel agregat untuk terlepas.
- **Jenis filler atau aditif:** Penggunaan filler aktif seperti semen atau bahan tambahan seperti serat dapat meningkatkan ikatan antar partikel dan menurunkan nilai Cantabro loss (Ozel et al., 2022; Zhang et al., 2015).
- **Kondisi pengujian:** Uji Cantabro dalam kondisi jenuh air (wet Cantabro) biasanya menghasilkan nilai kehilangan massa yang lebih tinggi dibandingkan pengujian dalam kondisi kering, karena air memperlemah ikatan aspal-agregat.

Berdasarkan literatur, Cantabro loss di bawah 20% umumnya dianggap sebagai indikasi bahwa campuran memiliki daya tahan yang cukup terhadap keausan permukaan, meskipun batas ini dapat bervariasi tergantung pada standar

nasional atau proyek (Austroads, 2012; Mallick et al., 2000). Gambar 5 menampilkan skema pengujian Cantabro.



Gambar 5 (a) Skema pengujian Cantabro, (b) Alat pengujian Los Angeles (Dong et al., 2013)

1.3 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu terkait aspal poros menggunakan gradasi Australia. Sehingga dipandang perlu untuk meninjau hasil-hasil penelitian terdahulu terkait aspal poros untuk memberikan hipotesis dan gambaran hasil yang akan diperoleh. Tabel 9 menampilkan ringkasan penelitian terdahulu terkait pembuatan aspal poros.

Andrés-Valeri et al. (2018) meneliti tantangan peningkatan kadar aspal pada campuran aspal berpori (PA) tanpa menyebabkan draindown dan penurunan permeabilitas dengan mengevaluasi efektivitas serat daur ulang Tetra Pak (TBA) sebagai aditif stabilisasi pengganti serat selulosa komersial (CF). Campuran disusun menggunakan agregat basalt, filler kapur 4,5%, aspal penetrasi 50/70, serta TBA atau CF sebesar 0,25–0,75% pada kadar aspal 5,0% dan 5,5%. Spesimen silinder dikompaksi dengan 50 tumbukan per sisi, lalu diuji sifat volumetrik, permeabilitas, draindown, Cantabro, ITS, dan ITSr. Hasil menunjukkan bahwa TBA dan CF mampu mencegah draindown sepenuhnya pada 5,5% aspal (0%), sementara campuran referensi mencapai 1,5%. Meskipun AV dan IAV turun 1–3%, permeabilitas tetap berada di atas batas ASTM (1,2 mm/s). Campuran TBA-2-2 (5,5% aspal + 0,5% TBA) memiliki kehilangan Cantabro terendah sebesar 12,95% (perbaikan 52% dibanding kontrol). ITS meningkat hingga 22%, dan seluruh ITSr melampaui 85%, dengan TBA menunjukkan ketahanan terhadap air lebih stabil daripada CF. Penelitian ini menyimpulkan bahwa dosis optimal TBA berada pada 0,25–0,5% karena mampu meningkatkan stabilitas mekanik tanpa mengorbankan fungsi drainase, menjadikannya alternatif berkelanjutan yang layak untuk desain PA.

Rodríguez-Fernández et al. (2020) mengevaluasi kelayakan teknis, lingkungan, dan ekonomi dari campuran aspal berpori berkelanjutan menggunakan agregat daur ulang dan teknologi pencampuran bersuhu rendah. Penelitian ini merespons kebutuhan akan campuran ramah lingkungan dengan memanfaatkan Electric Arc Furnace (EAF) slag sebagai agregat kasar, Reclaimed Asphalt Pavement

(RAP) sebesar 14%, serta dua jenis binder: PMB 45/80-65 dan nano-modified binder (NB) berbasis carbon black dan SBS, dikombinasikan dengan aditif Evotherm. Campuran diuji untuk porositas, Cantabro loss, ITS, ITSR, modulus dinamis, dan ketahanan fatik, serta dianalisis melalui Life Cycle Assessment (LCA) dan Life Cycle Cost Analysis (LCCA). Hasil menunjukkan bahwa semua campuran memenuhi standar mekanik, dengan campuran WMA-PMB menunjukkan ITS tertinggi (1502,6 kPa) dan ITSR 94%, sedangkan WMA-NB memiliki ITSR tertinggi (99%) dan modulus 3077 MPa. Dalam simulasi umur jalan 1 km, WMA-NB memberikan peningkatan umur 17% dan pengurangan dampak lingkungan 14%, serta potensi penghematan biaya hingga 15%. Studi ini menyimpulkan bahwa penggunaan EAF slag, RAP, dan nano-binder pada WMA merupakan solusi efektif dan berkelanjutan untuk perkerasan berpori masa depan, meskipun diperlukan pengembangan lebih lanjut dalam pemodelan prediksi umur layanan.

Shambhavi et al. (2024) meneliti kinerja campuran aspal berpori sebagai solusi jalan ramah lingkungan dalam mengurangi limpasan air dan efek panas di kawasan urban tropis. Campuran menggunakan agregat 20 mm, 12,5 mm, dan 6 mm sesuai gradasi NCAT, dengan variasi kadar aspal 5%–7,5% untuk menentukan Optimum Binder Content (OBC). Pengujian meliputi air voids, Cantabro loss (un-aged dan aged), drain down, dan permeabilitas. OBC ditentukan sebesar 6,5% karena memenuhi kriteria: air voids 24,1%, Cantabro loss 18,25% (un-aged) dan 26,49% (aged), serta drain down 0,27%. Permeabilitas mencapai 0,47 cm/s (406,8 m/hari), jauh melebihi batas minimum 100 m/hari. Penambahan aspal di atas 6,5% menurunkan porositas dan menaikkan drain down. Untuk tanah dasar, dilakukan stabilisasi menggunakan abu batu (quarry dust) 10%–40%. Tanah asli memiliki CBR <8% dan permeabilitas 2,54 cm/jam; setelah distabilisasi dengan 20% QD, CBR meningkat menjadi 8,6% dan permeabilitas 5,43 cm/jam. Hasil terbaik diperoleh pada 20%–30% QD. Secara keseluruhan, sistem perkerasan ini memenuhi kriteria teknis dan berpotensi mendukung konservasi air tanah melalui peningkatan infiltrasi dan pengurangan genangan.

Yang et al. (2021) mengevaluasi dampak lingkungan dari penggunaan filler berbasis limbah padat—termasuk abu terbang, diatomite, dan residu bauksit (red mud)—dalam campuran aspal berpori (PA), khususnya terhadap potensi pelapukan dan pelepasan logam berat. Campuran dibuat menggunakan proporsi filler setara volume dan diuji sebagai campuran padat (AC) serta pori (PA). Uji Cantabro standar, rendaman, dan penuaan dilakukan untuk menilai ketahanan pelapukan, sementara uji leachate menggunakan HACH DR3900 mengukur pH dan konsentrasi logam (Fe, Al, Cu) pada tingkat pelapukan 0% hingga 30%. Hasil menunjukkan bahwa diatomite dan residu bauksit mampu menurunkan kehilangan massa akibat raveling dari 34,5% (kapur) menjadi 23,5% dan 21,4%, serta mempertahankan pH larutan di bawah 8,55. Konsentrasi Fe, Al, dan Cu masing-masing tetap di bawah 0,3; 0,2; dan 0,04 mg/L, meskipun cenderung meningkat seiring porositas dan pelapukan. Pelapisan aspal menghambat pelepasan logam, namun efektivitasnya menurun setelah raveling. Dengan demikian, walaupun limbah padat seperti diatomite dan residu bauksit memperbaiki ketahanan campuran PA tanpa melampaui batas pencemar, studi ini

menekankan pentingnya pemantauan jangka panjang saat menggunakan filler limbah dalam campuran berpori.

Hao et al. (2025) meneliti peningkatan kinerja jangka panjang campuran aspal berpori (porous asphalt/PA) melalui penambahan plastik daur ulang jenis HDPE dan LDPE, guna mengatasi kelemahan umum PA seperti raveling dan deformasi permanen. Campuran dibuat dengan aspal 80/100, agregat granit, dan plastik daur ulang ukuran 1–2 mm dalam kadar 2–6% terhadap berat aspal. Campuran diuji laboratorium untuk Cantabro loss, rutting, dan drainabilitas, serta diuji lapangan pada lintasan uji sepanjang 75 m selama 60 bulan. Hasil menunjukkan bahwa HDPE 4% menghasilkan performa terbaik dengan Cantabro loss 11,3% (dibandingkan 18,9% kontrol), deformasi hanya 3,6 mm (kontrol 7,2 mm), serta drainabilitas tetap memenuhi standar JKR ($>0,4$ cm/s). Di lapangan, campuran HDPE 4% menunjukkan ketahanan luar biasa tanpa retak dan deformasi <4 mm, dengan nilai tekstur permukaan tetap >1 mm setelah 5 tahun. Campuran LDPE juga menunjukkan kinerja baik, meskipun sedikit menurun pada aspek drainase. Secara keseluruhan, penambahan plastik daur ulang, khususnya HDPE 4%, efektif meningkatkan daya tahan struktural dan hidrolik PA, sekaligus menawarkan solusi pengelolaan limbah plastik yang berkelanjutan dalam konstruksi perkerasan jalan berpori.

Akhtar et al. (2025) meneliti potensi pemanfaatan agregat kasar daur ulang (Recycled Coarse Aggregate/RCA) dari limbah beton dalam campuran aspal berpori sebagai solusi drainase berkelanjutan di lingkungan urban yang rentan banjir akibat permukaan kedap air. Penelitian menggunakan RCA dalam kadar 0%, 50%, dan 100% terhadap total agregat kasar, dikombinasikan dengan agregat alami, filler batu kapur, dan aspal penetrasi 60/70. Campuran dirancang mengikuti gradasi standar dengan target porositas $>18\%$. Metode pengujian meliputi uji kekuatan Marshall, kecepatan infiltrasi, waktu drainase, dan retensi air. Hasil menunjukkan bahwa penambahan RCA meningkatkan porositas (dari 19,1% menjadi 22,3%) dan kecepatan infiltrasi (dari 1,2 mm/s menjadi 2,5 mm/s pada 100% RCA), serta mempercepat waktu drainase (9 detik menjadi 4 detik). Namun, kekuatan Marshall menurun dari 5,1 kN (kontrol) menjadi 3,8 kN (100% RCA), meskipun tetap di atas ambang batas fungsional. Campuran RCA juga menunjukkan kemampuan retensi air yang lebih baik, yang relevan untuk pengendalian limpasan permukaan. Secara keseluruhan, kadar 50% RCA direkomendasikan karena memberikan keseimbangan optimal antara kekuatan mekanik dan kinerja hidrolik, menjadikannya solusi material yang ramah lingkungan dan efektif untuk perkerasan berpori di wilayah perkotaan.

Akhtar et al. (2021) meneliti karakteristik stabilitas dan permeabilitas pada campuran perkerasan aspal berpori (PAP) sebagai solusi drainase permukaan yang efektif untuk mengurangi genangan dan meningkatkan keselamatan lalu lintas saat hujan. Penelitian menggunakan aspal penetrasi 60/70, agregat lokal dengan ukuran maksimum 12,5 mm, serta penambahan semen (3,8%) dan gips (1%) dalam seluruh variasi campuran (A–J). Campuran dirancang dengan berbagai rasio agregat kasar: halus, yaitu 1:2:0; 2:1:0; dan 3:1:0. Sebanyak 90 spesimen diuji untuk stabilitas Marshall dan koefisien permeabilitas awal serta setelah satu tahun menggunakan

pengujian head permeability. Hasil menunjukkan stabilitas tertinggi diperoleh pada campuran H (rasio 2:1:0) sebesar 26,9 kN, sedangkan permeabilitas tertinggi terdapat pada campuran J (rasio 3:1:0) sebesar 0,394 cm/s (baru) dan 0,245 cm/s (setelah satu tahun). Penurunan permeabilitas mencapai 30–59% akibat pemadatan alami dan potensi clogging. Campuran dengan proporsi agregat kasar 9,5 mm dominan menghasilkan stabilitas lebih baik, sedangkan dominasi agregat 6,3 mm memperbesar porositas dan aliran air. Dengan kadar aspal optimal 5%, studi ini menyimpulkan bahwa gradasi agregat yang tepat memungkinkan pencapaian keseimbangan antara kekuatan struktural dan kinerja hidrolis pada campuran PAP untuk aplikasi jalan ramah lingkungan di daerah tropis.

Meng et al. (2023) meneliti karakteristik penyerapan suara dari campuran aspal berpori dengan pendekatan makroskopik dan mesoskopik untuk mengatasi polusi kebisingan lalu lintas yang berasal dari interaksi ban–jalan. Penelitian menggunakan agregat batu kapur kasar dan halus dari Shaanxi, filler bubuk batu kapur, serta aspal SK-90 yang dimodifikasi TAFPACK-Super (TPS) sebesar 12% dari berat aspal. Tiga tipe campuran PAC13, PAC16, dan PAC20 dirancang dengan variasi porositas (15–27%), ketebalan (4–6 cm), dan ukuran maksimum nominal agregat (13,2 mm, 16 mm, dan 19 mm). Sampel berbentuk silinder diameter 100 mm diuji koefisien serapan suara (SAC) menggunakan tabung impedansi fungsi transfer, serta dianalisis mikrostrukturnya melalui pemindaian CT dan rekonstruksi 3D. Hasil menunjukkan bahwa SAC meningkat seiring peningkatan porositas dan ketebalan, dengan nilai maksimum $>0,7$ pada frekuensi 400–1400 Hz, khususnya pada porositas 27% dan ketebalan 6 cm. NMA kecil menghasilkan SAC lebih tinggi. Korelasi grey menunjukkan porositas sebagai faktor dominan, dan analisis meso mengungkap bahwa dimensi fraktal pori memiliki hubungan paling kuat dengan SAC ($R^2 > 0,75$). Studi ini menyimpulkan bahwa kombinasi karakteristik pori makro–meso sangat menentukan efektivitas penyerapan suara, dan dapat menjadi dasar perancangan perkerasan berpori akustik berkinerja tinggi.

Tabel 2 Ringkasan penelitian terdahulu terkait aspal porous

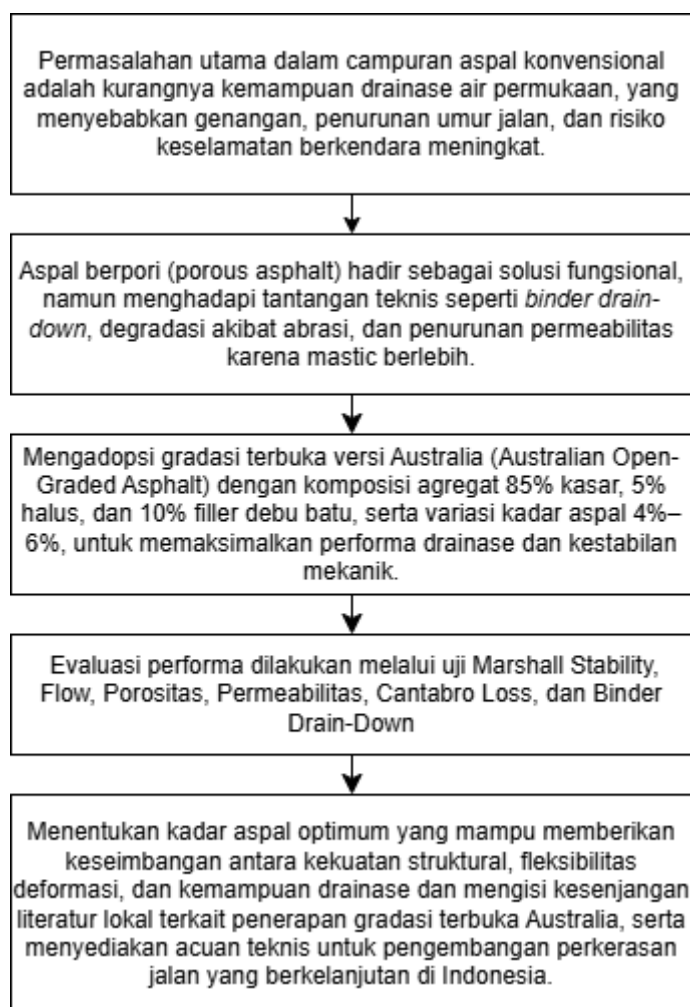
Penulis	Material	Parameter Diuji	Hasil
Andrés-Valeri et al. (2018)	Tetra Pak fiber (TBA), asphalt 50/70	Draindown, Cantabro, ITS, ITSR, permeability	TBA 0,25–0,5% mencegah draindown, Cantabro loss turun 52%, ITS naik 22%, ITSR >85%.
Rodríguez-Fernández et al. (2020)	EAF slag, RAP 14%, PMB, nano-binder	Porositas, ITS, ITSR, modulus, fatigue, LCA, LCCA	WMA-NB: ITSR 99%, modulus 3077 MPa, umur naik 17%, emisi turun 14%, biaya turun 15%.
(Shambhavi et al., 2023)	Aspal 5–7,5%, agregat NCAT, QD stabilizer	AV, Cantabro, drain down, permeability, CBR	OBC 6,5%; permeability 406,8 m/hari; CBR naik ke 8,6% (QD 20%); drain down 0,27%.
Yang et al. (2021)	Fly ash, diatomite, red mud	Cantabro, leachate (Fe, Al, Cu), pH	Red mud turunkan Cantabro loss jadi 21,4%; logam tetap < ambang batas; pH < 8,55.
Hao et al. (2025)	HDPE, LDPE 2–6%, asphalt 80/100	Cantabro, rutting, drainability, field durability	HDPE 4% hasil terbaik: Cantabro 11,3%, rutting 3,6 mm, tahan >5 tahun di lapangan.
Akhtar et al. (2025)	RCA 0–100%, asphalt 60/70	Porositas, infiltrasi, drain time, Marshall strength	RCA 100% naikan porositas ke 22,3%, infiltrasi 2,5 mm/s; kekuatan turun 25%, tetap fungsional.
Akhtar et al. (2021)	Aspal 60/70, agregat lokal, semen, gipsum	Marshall, permeability, aging	Campuran H stabilitas tertinggi (26,9 kN); permeabilitas awal 0,394 cm/s; turun 30–59% setelah 1 tahun.
Meng et al. (2023)	Aspal TPS, PAC13/16/20, limestone	SAC, porosity, CT scan, meso analysis	SAC >0,7 pada porositas 27%, ketebalan 6 cm; korelasi SAC–pori $R^2 > 0,75$.
Penelitian ini	Aspal 60/70, agregat lokal, abu batu, KA 4% - 6%	Draindown, cantabro, stabilitas Marshall, porositas, permeabilitas,	-

1.4 Desain Konseptual

Perkerasan jalan merupakan komponen vital dalam sistem transportasi, yang memiliki peran strategis dalam mendukung mobilitas, distribusi logistik, dan pertumbuhan ekonomi. Umumnya, campuran aspal konvensional yang digunakan pada perkerasan lentur memiliki kelemahan dalam pengelolaan air permukaan, yang dapat menyebabkan genangan, pengurangan umur layanan jalan, dan peningkatan risiko kecelakaan. Sebagai solusi fungsional, aspal berpori (*porous asphalt*) dikembangkan dengan struktur agregat terbuka untuk memungkinkan air meresap secara vertikal. Namun, tantangan utama dalam penerapan aspal poros terletak pada keseimbangan antara kemampuan drainase dan kestabilan mekanik. Masalah seperti binder drain-down, penurunan permeabilitas akibat mastic berlebih, dan degradasi struktural akibat abrasi menjadi perhatian utama dalam desain campuran aspal poros. Selain itu, belum banyak referensi lokal yang mengadopsi gradasi terbuka versi Australia dalam konteks iklim dan karakteristik material Indonesia.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini mengadopsi pendekatan desain campuran aspal poros menggunakan gradasi terbuka versi Australian Open Graded Asphalt Specification, yang dirancang untuk memaksimalkan porositas dan performa drainase tanpa mengorbankan kekuatan struktural. Campuran disusun dengan komposisi 85% agregat kasar, 5% agregat halus, dan 10% filler debu batu, dengan variasi kadar aspal minyak bumi penetrasi 60/70 sebesar 4% hingga 6%. Evaluasi performa dilakukan melalui serangkaian pengujian yang mencakup Marshall Stability, Flow, Permeabilitas, Porositas, Cantabro Loss, dan Binder Drain-Down, yang mengacu pada standar SNI, ASTM, dan Austroads. Kombinasi antara karakterisasi fisik material dan uji kinerja mekanik/fungsional digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kadar aspal terhadap sifat campuran poros, serta mengidentifikasi kadar optimum yang memenuhi standar ketahanan dan drainase.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kadar aspal optimum pada campuran aspal poros gradasi terbuka versi Australia yang dapat memberikan performa terbaik dalam hal stabilitas struktural, fleksibilitas, dan efektivitas drainase. Selain itu, studi ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi korelasi antar parameter kinerja utama seperti porositas, permeabilitas, binder drain-down, Cantabro loss, dan stabilitas Marshall, sebagai dasar ilmiah dalam formulasi desain campuran berpori yang lebih adaptif terhadap kondisi lokal. Dengan pendekatan ini, diharapkan hasil penelitian mampu mengisi kesenjangan literatur terkait implementasi gradasi terbuka Australia pada kondisi Indonesia serta memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi perkerasan jalan yang lebih tahan lama dan berkelanjutan.



Gambar 6 Desain konseptual

BAB II

METODE

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini Laboratorium Riset Eco-material, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Juni 2025 – Desember 2025.

2.2 Data Penelitian

Penelitian menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh langsung dari pengujian eksperimental di laboratorium dan lapangan. Sedangkan data sekunder didapatkan dari studi literatur dan hasil penelitian yang sudah ada, baik yang dilakukan di laboratorium maupun dilakukan di tempat lain yang berkaitan dengan penelitian aspal porous.

2.3 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. *Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.)* kapasitas 1000 kN yang dapat diatur pada kapasitas 200 dan 500 kN pada pengujian kuat tekan.
2. Load Cell kapasitas 200 & 500 kN untuk mengukur pembacaan beban maksimum.
3. High Speed Data Logger THS-1100 dan satu set komputer yang berfungsi untuk memonitor, mencatat, dan menyimpan data beban.
4. Satu set komputer yang berfungsi untuk mengolah data
5. Satu set alat pengujian karakteristik material
6. Automatic asphalt compactor
7. Cetakan briket aspal
8. Timbangan digital
9. Termometer
10. Nampan
11. Kompor dan wajan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Aspal minyak penetrasi 60/70.
2. Agregat kasar
3. Agregat halus
4. Debu batu

2.4 Pengujian Karakteristik Material

Standar pemeriksaan karakteristik yang digunakan mengacu pada Standardisasi Nasional Indonesia, dan aturan lain terkait agregat, dan aspal. Daftar pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3 Metode Pengujian Karakteristik Material

No	Pengujian	Standar Pengujian
Agregat Kasar		
1	Analisa Saringan	SNI 03-1968-1990
2	Berat Jenis dan Penyerapan Air	SNI 03-1969-2016
3	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium atau magnesium sulfat	SNI 3407:2008
4	Abrasi dengan mesin Los Angeles	SNI 2417:2008
5	Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 2439:2011
6	Angularitas	ASTM D 5821-01
7	Partikel pipih dan lonjong	RSNI T-01-2005
Agregat Halus		
1	Analisa Saringan (Lolos Ayakan No. 200)	SNI 03-4142-1996
2	Berat Jenis dan Penyerapan Air	SNI 03-1970-2016
3	Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997
4	Angularitas	SNI 03-6877-2002
5	Batas Cair (LL)	SNI 1967:2008
6	Indeks Plastisitas (PI)	SNI 1966:2008
Filler		
1	Analisa Saringan (Gradasi agregat)	SNI 06-6723-2002
2	Bagian hilang pijar	SNI 06-6723-2002
3	Indeks Plastisitas (PI)	SNI 06-6723-2002
Aspal		
1	Penetrasi pada 25°C	SNI 2456:2011
2	Daktilitas pada 25°C	SNI 2432:2011
3	Titik lembek	SNI 2434:2011
4	Titik nyala	SNI 2433:2011
5	Kelarutan dalam <i>Trichlor Ethylen</i>	ASTM D2042
6	Berat jenis aspal	SNI 2441:2011
7	Stabilitas penyimpanan: Perbedaan titik lembek	ASTM D 5976 part 6.1 SNI 2434:2011

2.5 Komposisi Bahan dan Campuran

Komposisi campuran aspal poros gradasi Australia diperlihatkan berupa briket aspal berbentuk silinder dengan ukuran 100 mm x 60 mm. Detail komposisi campuran disajikan pada Tabel 5.

Tabel 4 Komposisi campuran aspal poros

Ukuran ayakan		Agregat (gr)				
1"-3/4"	25-19	0	0	0	0	0
3/4"-1/2"	19-12,5	86,4	85,95	85,5	85,05	84,6
1/2"-3/8"	12,5-9,5	403,2	401,1	399	396,9	394,8
3/8"-No,4	9,5-4,75	460,8	458,4	456	453,6	451,2
No,4-No,8	4,75-2,36	74,88	74,49	74,1	73,71	73,32
No,8-No,16	2,36-1,18	23,04	22,92	22,8	22,68	22,56
No,16-No,30	1,18-0,6	17,28	17,19	17,1	17,01	16,92

Ukuran ayakan		Agregat (gr)				
No,30-No,50	0,6-0,3	17,28	17,19	17,1	17,01	16,92
No,50-No,200	0,3-0,075	28,8	28,65	28,5	28,35	28,2
No,200	0,075 (Filler)	40,32	40,11	39,9	39,69	39,48
Aspal		48	54	60	66	72
Kadar Aspal		4,00%	4,50%	5,0%	5,5%	6,0%

2.6 Prosedur Eksperimental

Secara garis besar, prosedur eksperimental aspal poros gradasi Australia terdiri dari pekerjaan persiapan, pembuatan benda uji briket, pengujian, analisa hasil pengujian, dan Kesimpulan.

2.6.1 Metode Pembuatan Benda Uji Aspal

Jumlah benda uji yang dibuat sebanyak 12 briket untuk masing-masing kadar aspal. Adapun metode pembuatan yang dilakukan sebagai berikut:

1. Persiapan Material

1. Timbang agregat kasar, agregat halus, dan filler sesuai komposisi desain campuran (misalnya: 85% agregat kasar, 5% pasir, 10% filler debu batu).
2. Keringkan seluruh agregat dalam oven pada suhu $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hingga tercapai kondisi kering permukaan jenuh (SSD).
3. Timbang aspal penetrasi 60/70 sesuai kadar aspal yang direncanakan (misal: 4%, 4,5%, 5%, 5,5%, dan 6% terhadap total agregat).
4. Panaskan aspal hingga suhu $150\text{--}160^\circ\text{C}$ untuk pencampuran.
5. Panaskan agregat hingga suhu $160\text{--}170^\circ\text{C}$ agar selisih suhu tidak lebih dari $\pm 10^\circ\text{C}$ saat pencampuran.

2. Pencampuran

1. Masukkan agregat kasar, halus, dan filler ke dalam alat pencampur atau loyang tahan panas.
2. Campurkan agregat secara merata terlebih dahulu (± 30 detik).
3. Tuangkan aspal panas ke dalam agregat sambil diaduk perlahan secara manual atau dengan alat mekanik.
4. Aduk campuran selama ± 2 menit atau hingga semua agregat terlapisi aspal secara merata dan terbentuk pasta mastic.

3. Pemanasan Cetakan dan Alat

1. Panaskan cetakan Marshall (diameter 101,6 mm, tinggi 63,5 mm) di oven pada suhu $\pm 150^\circ\text{C}$ selama ± 30 menit untuk menghindari pendinginan cepat saat pemadatan.
2. Pastikan pelat dasar dan collar ring juga ikut dipanaskan.
3. Siapkan pemadat Marshall (automatic atau manual) dan pelat pemadat.

4. Pembuatan Bricket (Benda Uji Silinder)

1. Masukkan campuran panas ke dalam cetakan Marshall dalam kondisi masih panas.
2. Penuhi cetakan dalam satu lapis tanpa penambahan bertahap (karena campuran porous tidak memerlukan lapisan padat).
3. Letakkan pelat penutup dan posisikan cetakan pada alat pemadat.
4. Padatkan dengan 50 pukulan per sisi jika menggunakan palu manual (75 pukulan jika untuk lalu lintas berat), atau atur pemadatan otomatis sesuai ketentuan.
5. Setelah pemadatan sisi pertama selesai, balik benda uji, lalu padatkan sisi lainnya dengan jumlah pukulan yang sama.

5. Pelepasan dan Pendinginan

1. Lepaskan benda uji dari cetakan setelah suhu turun secara alami selama ± 24 jam (hindari pendinginan cepat).
2. Bersihkan sisa aspal pada cetakan sebelum digunakan kembali untuk benda uji berikutnya.
3. Simpan benda uji pada suhu ruang dan tempat terlindung minimal selama 24 jam sebelum pengujian lanjutan dilakukan.

2.6.2 Pengujian Volumetrik Campuran Aspal

Metode pengujian volumetrik campuran aspal dilakukan untuk menentukan parameter VIM (Void in Mix), VMA (Voids in Mineral Aggregate), dan VFB (Voids Filled with Bitumen) sebagai dasar penentuan Kadar Bitumen Optimum (KBO), Pengujian mengikuti prosedur SNI 06-2489-1991, AASHTO T 269, dan ASTM D3203. Sampel campuran dipadatkan menggunakan metode Marshall untuk setiap variasi kadar aspal, kemudian ditentukan berat jenis maksimum teoritis (G_{mm}) sesuai ASTM D2041 dan berat jenis benda uji padat (G_{mb}) sesuai ASTM D2726. Nilai-nilai ini digunakan dalam perhitungan volumetrik menggunakan Persamaan 1-3.

$$VIM = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100\% \quad (1)$$

$$VMA = \left[1 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

$$VFB = \frac{VMA - VIM}{VMA} \times 100\% \quad (3)$$

Di mana G_{mm} adalah berat jenis maksimum campuran, G_{mb} berat jenis bulk campuran, G_{sb} berat jenis agregat, dan P_s adalah fraksi berat agregat dalam campuran, Nilai VIM menunjukkan besarnya rongga udara dalam campuran yang memengaruhi permeabilitas dan daya serap suara. VMA menggambarkan volume rongga antar agregat yang menampung aspal dan udara, sedangkan VFB menunjukkan proporsi rongga yang terisi aspal yang berpengaruh terhadap

ketahanan deformasi plastis. Data volumetrik yang diperoleh dibandingkan untuk setiap kadar aspal guna menentukan KBO yang memenuhi kriteria stabilitas, flow, dan kepadatan sesuai persyaratan spesifikasi perkerasan aspal berpori.

2.6.3 Pengujian Marshall Test

Pengujian Marshall digunakan untuk mengevaluasi stabilitas dan flow dari campuran aspal berpori berdasarkan metode kompresi. Metode ini dirancang untuk menilai kemampuan campuran dalam menahan beban lalu lintas dan mengukur deformasi plastis saat menerima beban. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) yang telah dimodifikasi untuk mendukung pengujian Marshall secara digital. Pengujian mengikuti acuan dari SNI 06-2489-1991, ASTM D6927, dan AASHTO T245, dengan modifikasi pada sistem pencatatan data beban dan deformasi melalui perangkat lunak UTM. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 101,6 mm dan tinggi 63,5 mm, dan diuji setelah proses perendaman dalam air bersuhu $60 \pm 1^\circ\text{C}$ untuk merepresentasikan kondisi lapangan yang mendekati suhu permukaan jalan tropis, Pengujian dilakukan untuk minimal 3 benda uji.

Langkah-langkah pelaksanaan pengujian Marshall dalam penelitian ini dijabarkan sebagai berikut.

1. Siapkan benda uji aspal berbentuk silinder dengan diameter 101,6 mm dan tinggi 63,5 mm, yang telah dicetak dan didiamkan selama 24 jam, Timbang setiap benda uji dan catat dimensi dari benda uji briket,
2. Masukkan benda uji ke dalam bak air bersuhu $60 \pm 1^\circ\text{C}$ selama 30 hingga 40 menit, Pastikan benda uji terendam seluruhnya dan tidak mengalami kerusakan selama proses perendaman,
3. Siapkan Universal Testing Machine (UTM) dengan perlengkapan fixture Marshall (breaking head) atas dan bawah,
4. Setelah perendaman, segera angkat benda uji dari air, keringkan permukaannya dengan kain, lalu letakkan pada breaking head bawah, Pasang breaking head atas hingga menyentuh permukaan atas benda uji secara simetris,
5. Atur laju pembebanan pada UTM sebesar 50,8 mm/menit, Mulai uji dengan memberi beban vertikal melalui UTM hingga benda uji mencapai beban maksimum dan mulai mengalami kerusakan, Catat nilai beban maksimum (dalam satuan N atau kg) sebagai stabilitas Marshall (S) dan nilai deformasi total saat beban maksimum (dalam satuan mm) sebagai flow.

Untuk menilai ketahanan deformasi terhadap beban, digunakan parameter Marshall Quotient (MQ), yaitu rasio antara nilai stabilitas terhadap flow, seperti dirumuskan pada Persamaan 4.

$$MQ = \frac{S}{F} \quad (4)$$

2.6.4 Cantabro Test

Pengujian Cantabro digunakan untuk menilai ketahanan campuran aspal berpori terhadap aus dan disintegrasi akibat gaya abrasif dan benturan ringan, yang mensimulasikan kondisi layanan di lapangan akibat beban lalu lintas dan gaya gesekan kendaraan. Dalam konteks aspal berpori, pengujian ini sangat penting karena struktur campuran cenderung lebih terbuka dan rentan terhadap pengelupasan partikel agregat akibat lemahnya ikatan mastic. Prosedur pengujian Cantabro pada penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada ASTM D7064/D7064M dan AASHTO T 305, dengan beberapa penyesuaian mengingat karakteristik material lokal dan peralatan uji yang tersedia.

Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 101,6 mm dan tinggi 63,5 mm, yang sebelumnya telah melewati proses pencampuran dan pemadatan sesuai kadar aspal desain. Setiap benda uji dikondisikan pada suhu ruang selama 24 jam, tanpa perendaman air, agar menghindari pengaruh pelunakan termal. Selanjutnya, benda uji dimasukkan ke dalam alat Los Angeles Abrasion Machine (LA Machine) tanpa penambahan bola baja, lalu diputar sebanyak 300 rotasi pada kecepatan standar (30–33 rpm). Setelah proses pemutaran selesai, benda uji dikeluarkan dan disapu bersih dari debu halus sebelum dilakukan penimbangan ulang. Nilai kehilangan massa akibat abrasi dihitung dengan membandingkan massa awal dan akhir benda uji menggunakan Persamaan 5.

$$\text{Cantabro Loss (\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100\% \quad (5)$$

di mana W_i adalah massa awal benda uji (gram), dan W_f adalah massa akhir setelah pengujian (gram).

2.6.5 Porositas dan Permeabilitas

Pengujian porositas dan permeabilitas merupakan tahapan penting dalam evaluasi kinerja campuran aspal berpori, mengingat kedua parameter ini mencerminkan kemampuan struktural material dalam menyediakan ruang antar-agregat serta jalur aliran air yang kontinu. Dalam penelitian ini, metode pengujian porositas dan permeabilitas dilakukan sesuai acuan dari ASTM D7063/D7063M-08 tentang *Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design*, serta mengikuti pendekatan perhitungan volumetrik berdasarkan massa dan volume benda uji.

Untuk pengujian porositas, benda uji berbentuk silinder dengan diameter 101,6 mm dan tinggi 63,5 mm ditimbang dalam kondisi kering (W_d), kemudian direndam dalam air selama 4 jam untuk memastikan air masuk ke dalam rongga terbuka. Setelah perendaman, benda uji ditimbang dalam kondisi jenuh permukaan kering (SSD) dengan kain dibasahi ringan untuk menghilangkan kelebihan air di permukaan (W_{ssd}). Volume benda uji (V) dihitung berdasarkan dimensi fisik silinder,

dan berat jenis teoritis (G_{mb}) diperoleh dari hasil uji sebelumnya. Nilai porositas total dihitung menggunakan Persamaan 6.

$$\text{Porosity (\%)} = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \times 100\% \quad (6)$$

di mana G_{mb} adalah berat jenis campuran bulk, dan G_{mm} adalah berat jenis maksimum teoritis tanpa udara (ASTM D3203-11).

Sementara itu, pengujian permeabilitas vertikal dilakukan untuk mengetahui sejauh mana air dapat meresap melalui jaringan pori yang saling terhubung. Pengujian ini mengacu pada metode ASTM PS 129-01 dan Fennis et al, (2011), dengan menggunakan peralatan silinder uji air tekan konstan yang dipasang secara vertikal pada benda uji. Aliran air disuplai dari pipa berdiameter kecil dengan tekanan hidrostatik tetap dan debit air yang melewati spesimen dicatat selama 1 menit, Nilai koefisien permeabilitas (k) dihitung menggunakan Persamaan 7.

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \quad (7)$$

dengan Q adalah volume air yang melewati spesimen (cm^3), L adalah tinggi benda uji (cm), A adalah luas penampang spesimen (cm^2), t adalah waktu pengujian (detik), dan h adalah tinggi kolom air (cm).

2.6.6 Binder Drain-Down Test

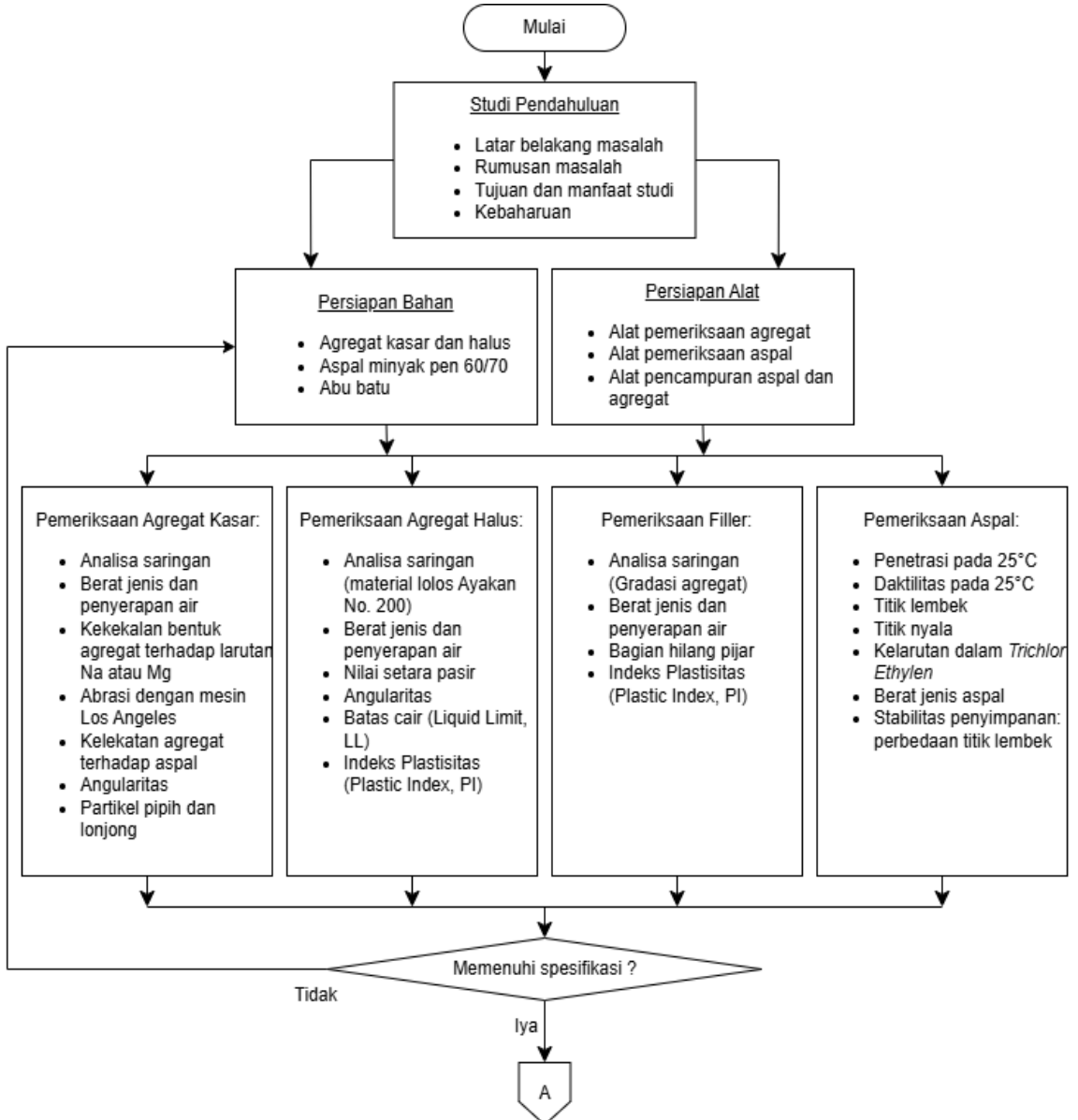
Pengujian binder drain-down bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan aspal terhadap kecenderungan migrasi vertikal (pengaliran ke bawah) pada campuran aspal berpori selama proses produksi, pengangkutan, dan pemadatan. Fenomena drain-down terjadi ketika aspal cair tidak sepenuhnya terserap atau terikat oleh struktur agregat, sehingga mengalir keluar dari matriks campuran, Metode pengujian mengacu pada ASTM D6390-11: Standard Test Method for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures, yang secara spesifik dirancang untuk menguji drain-down pada campuran berpori seperti Open Graded Friction Course (OGFC) atau porous asphalt. Dalam prosedur ini, campuran aspal yang baru selesai dicampur ditempatkan dalam keranjang logam berlubang (wire basket). kemudian keranjang tersebut diletakkan di atas wadah logam tidak berlubang untuk menampung aspal yang mungkin mengalir. Perangkat pengujian kemudian dimasukkan ke dalam oven dengan suhu sesuai suhu pencampuran (biasanya $\pm 150^\circ\text{C}$) selama 1 jam.

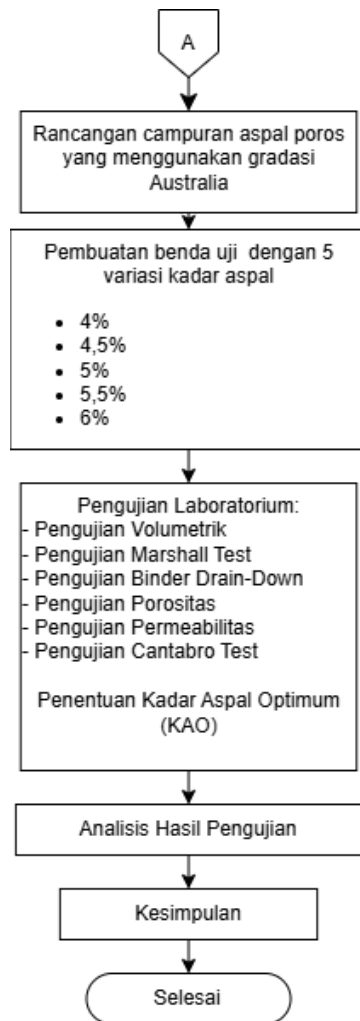
Setelah periode pemanasan, wadah penampung dikeluarkan dan didinginkan, kemudian ditimbang untuk mengetahui massa aspal yang mengalami drain-down. Nilai binder drain-down dihitung dengan menggunakan Persamaan 8.

$$\text{Drain-down (\%)} = \left(\frac{W_d}{W_m}\right) \times 100\% \quad (8)$$

di mana W_d adalah massa aspal yang mengalir dan tertampung di wadah logam (dalam gram), dan W_m adalah total massa campuran yang dimasukkan ke dalam keranjang pada awal pengujian (dalam gram).

2.7 Bagan Alir Penelitian





Gambar 7 Bagan Alir Penelitian