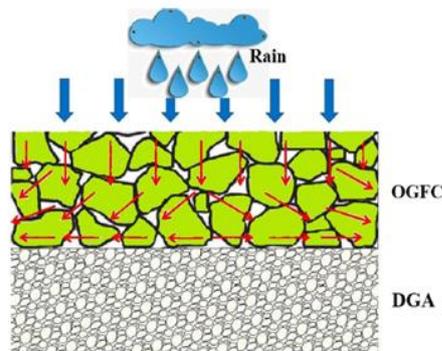


BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA BERPIKIR

2.1 Campuran Aspal Berpori

Campuran gradasi terbuka adalah campuran berpori yang memiliki rongga yang terhubung dan daya permeabilitas yang tinggi (Huber, 2000). Perkerasan berpori terdiri dari aspal, bahan tambah, dan proporsi yang tinggi dari agregat kasar dengan kadar agregat halus yang terbatas, serta memiliki kadar rongga yang tinggi (15-20%) (Mansour et al., 2013). Lapisan aspal berpori adalah lapisan tipis (19 – 50 mm) (Cooley et al., 2009 dalam Mansour et al., 2013) yang merupakan campuran dengan gradasi terbuka yang dihindarkan di atas lapisan aspal yang kedap air (Setyawan, 2005; Djumari & Sarwono, 2009; Sarwono & Wardhani, 2007). Pada aspal berpori, air dapat meresap ke dalam lapisan atas (*wearing course*) secara vertikal dan horisontal (Setyawan & Sanusi, 2008). Gambar 2.1 menunjukkan lapisan aspal berpori yang biasa disebut dengan Open Graded Friction Course (OGFC) yang dihindarkan di atas lapisan kedap air Dense Graded Asphalt (DGA).



Gambar 2.1 Lapisan Aspal Berpori di Atas Perkerasan Aspal Konvensional
Sumber : Wu et al. (2020)

Salah satu tipe perkerasan yang dikembangkan di Amerika, Eropa dan Australia ini adalah aspal berpori dengan ciri khas susunan gradasi didominasi oleh agregat kasar. Jumlah agregat kasar yang tidak kurang dari 85% terhadap berat total campuran, menghasilkan struktur yang lebih terbuka dan berongga (Djumari & Sarwono, 2009). Jumlah rongga yang banyak, menyebabkan campuran memiliki nilai stabilitas dan kekuatan yang lebih rendah dibanding dengan campuran aspal konvensional (Ramadhan et al., 2014), artinya mudah mengalami deformasi. Namun Mansour et al. (2013)

mengatakan bahwa campuran aspal berpori yang direncanakan dan dibangun dengan baik, tidak akan memiliki masalah *raveling*, dan akan dapat mempertahankan fungsi drainase selama umur pelayanannya.

Aspal berpori dirancang untuk mengatasi banjir akibat hujan, terutama di area parkir dan pada jalan dengan beban lalu lintas ringan, dengan kandungan pori lebih besar dari 20% setelah penghamparan dan pemadatan. Kinerja aspal berpori berasal dari struktur pori yang terhubung (Masri & Arshad, 2015). Aspal berpori dapat menjadi tantangan bagi sistem drainase perkotaan berkelanjutan yang dapat menjawab isu masalah drainase jalan raya (Ahmad et al., 2017). Aspal berpori adalah salah satu jenis permukaan perkerasan yang terbaik yang mengurangi ketahanan gesek, *hydroplaning*, *splash* dan *spray*, meningkatkan *visibility* pada malam hari dan menurunkan tingkat kebisingan perkerasan (Mallick et al., 2000; Watson et al., 2003).

Hardiman (2005) dalam Widhianto et al. (2013) mengatakan bahwa “Aspal berpori sangat baik untuk melapisi jalan, yaitu sangat efektif untuk meningkatkan keselamatan lalu lintas jalan raya pada kondisi cuaca yang sangat buruk (hujan deras dan licin)”. Hsu et al. (2010) juga mengatakan bahwa perkerasan aspal berpori dapat meningkatkan *riding quality* selama musim hujan, dengan meningkatkan ketahanan selip antara permukaan jalan dan roda kendaraan, *hydroplaning*, *splashing* dan *spraying*, serta meningkatkan kemampuan pandangan pada malam hari dengan berkurangnya pantulan cahaya dari permukaan jalan.

Aspal berpori juga dapat menjawab isu faktor lingkungan dalam pembangunan infrastruktur. Saat ini pembangunan jalan raya semakin dituntut agar mengedepankan faktor kepedulian terhadap lingkungan. Selain merupakan jalan berkeselamatan, lapisan aspal berpori juga ke depan dapat diupayakan menjadi jalan ramah lingkungan. Penggunaan aditif Warm Mix Asphalt memberikan dampak positif yang signifikan dalam pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi gas (Frigio & Canestrari, 2018). Selain itu, penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement juga memastikan terjadinya penghematan yang cukup besar pada penggunaan material. Penggunaan material daur ulang ini akan menghemat penggunaan sumber daya alam batuan.

Aspal berpori adalah campuran yang unik, dirancang untuk dapat menyerap air, dengan cirinya bergradasi terbuka, yang artinya memiliki daya ikat antar agregat (*interlocking*) yang relatif kecil, dikarenakan jumlah rongga dalam campuran relatif

besar. Campuran aspal berpori memiliki kadar pori 16-25%, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan campuran aspal konvensional yang memiliki pori 2-3% (Ahmad et al., 2017). Jumlah rongga yang cukup besar diperlukan sesuai fungsi campuran untuk dapat segera menyerap air hujan dari permukaan jalan. Di sisi lain, daya *interlocking* yang kecil cenderung menyebabkan kekuatan dan keawetan campuran rendah. Pada campuran bergradasi terbuka, gradasi sangat mempengaruhi kemampuan campuran menahan beban lalu lintas. Karena kandungan rongga yang tinggi pada gradasi terbuka, campuran aspal berpori rentan terhadap deformasi dibandingkan dengan campuran bergradasi rapat (Mansour et al., 2013).

Terdapat perbedaan antara aspal berpori dengan perkerasan konvensional. Secara struktural, keduanya merupakan perkerasan jalan yang memiliki kemiringan sesuai standar yang berlaku. Lapisan aspal berpori yang *permeable* dihindarkan di atas lapisan perkerasan jalan kedap air untuk mengalirkan air hujan ke kiri kanan jalan lewat rongga yang tersedia.

2.2 Gradasi Terbuka pada Aspal Berpori

Gradasi sangat berperan pada kinerja aspal berpori (Castillo et al., 2018; Hassan et al., 2016a ; Jiang et al., 2015; Król et al., 2018; Mansour et al., 2013; Nekkanti et al., 2019; Suresha et al., 2010; Xing et al., 2010). Salah satu faktor penting pada campuran aspal berpori adalah gradasi agregat (Djumari & Sarwono, 2009). Perubahan kecil pada gradasi bisa membawa perubahan besar pada kinerja fungsional dan durabilitas campuran (Repik, 2017). Berkaitan dengan hal tersebut, dapat dikatakan bahwa kinerja pelayanan terbaik dari aspal berpori berasal dari struktur rongga yang terhubung. Rongga adalah unsur utama campuran dan berpengaruh pada kinerja jalan maupun kinerja pelayanan jalan (Xiaoping, 2011 dalam Masri & Arshad, 2015).

Campuran aspal berpori yang bergradasi terbuka dengan komposisi agregat halus yang dibatasi, memiliki banyak rongga udara yang berhubungan. Rongga yang berhubungan ini membentuk saluran kapiler untuk mengalirkan air dan mengurangi genangan di permukaan jalan (Hassan et al., 2016a). Setelah membandingkan dua spesifikasi agregat, Hassan et al. (2014) yang menggunakan X-ray CT dan teknik pencitraan dalam mengamati struktur internal campuran, mengatakan bahwa gradasi agregat kasar menghasilkan ukuran rongga yang lebih besar, dengan bentuk memanjang

yang menggambarkan pembentukan interkoneksi setelah pemadatan, dibandingkan dengan gradasi yang lebih halus, yang membentuk ukuran rongga yang lebih kecil.

Fungsi utama agregat kasar pada campuran aspal berpori adalah menahan beban lalu lintas. Oleh karena itu, agregat kasar harus memenuhi standar spesifikasi termasuk nilai abrasi Los Angeles, Aggregate Impact Value, serta pembatasan kadar agregat yang berbentuk pipih dan lonjong. Proporsi agregat pipih dan lonjong harus dibatasi pada nilai terkecil yang diizinkan (Chen et al., 2016). Gradasi agregat harus didominasi oleh agregat kasar, namun penentuan porsi agregat halus juga penting, karena kadar agregat halus diusahakan sesedikit mungkin untuk mencegah tertutupnya rongga (Ruiz et al., 1990).

Gradasi merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi degradasi, dimana ukuran agregat adalah faktor penting yang memicu degradasi, terutama pada campuran dengan gradasi terbuka (Eldeen, 2018). Hassan et al. (2016b) dalam penelitiannya yang berjudul "Air Voids Characterization and Permeability of Porous Asphalt Gradations Used in Different Countries", menyimpulkan bahwa campuran aspal berpori yang menggunakan spesifikasi gradasi Australia (AAPA, 2004) merupakan campuran dengan distribusi rongga udara paling homogen dan tingkat permeabilitas paling tinggi dibandingkan berturut-turut dengan spesifikasi gradasi ASTM D7064 2013 US, PWD 2008 Malaysia dan LTA 2010 Singapore. Spesifikasi Australia ini memasukkan ukuran agregat sedang (6,7 mm) pada susunan butirnya yang pada umumnya tidak terdapat pada spesifikasi lain.

2.3 Agregat untuk Campuran Aspal Berpori

Agregat adalah komponen dasar selain aspal, dengan porsi dominan (90 – 95 % dari berat campuran), yang membentuk campuran perkerasan jalan dan paling signifikan berfungsi memikul beban lalu lintas. Pada dasarnya kebutuhan agregat pada campuran aspal berpori sama dengan campuran aspal pada umumnya dimana harus memenuhi persyaratan kekerasan, kekuatan dan keawetan, dapat menyerap aspal dengan baik, serta mudah dalam pelaksanaan (Rondonuwu et al., 2013).

Sukirman (2016) menyatakan bahwa daya tahan agregat merupakan ketahanan agregat terhadap adanya penurunan mutu akibat proses mekanis dan kimiawi. Agregat dapat mengalami degradasi, yaitu perubahan gradasi, akibat pecahnya butir-butir agregat. Dengan kata lain, agregat yang lemah dapat mengalami keausan dan fragmentasi sehingga dapat merubah gradasi awal. Kehancuran agregat karena proses mekanik antara lain akibat gaya-gaya yang terjadi selama proses pelaksanaan perkerasan jalan

(penimbunan, penghamparan, pemadatan), serta pelayanan beban lalu lintas. Sedangkan kehancuran agregat akibat proses kimiawi adalah pengaruh kelembaban, panas, dan perubahan suhu setiap harinya.

Bentuk agregat juga berpengaruh terhadap stabilitas dan durabilitas perkerasan jalan. Bentuk agregat yang relatif kubus merupakan yang paling baik bagi ikatan antar agregat dalam campuran, karena memiliki banyak bidang pecah. Dihindari agregat berbentuk bulat, serta harus dilakukan pembatasan pada agregat berbentuk lonjong dan pipih, karena bentuk ini relatif lemah terhadap degradasi akibat beban lalu lintas. Rongga antar agregat dalam campuran, selain dipengaruhi oleh gradasi, juga dibentuk oleh faktor bentuk dan tekstur agregat (Barksdale, 1993). Tekstur yang kasar dan berpori lebih baik dibandingkan permukaan yang licin.

Degradasi merupakan kondisi yang tak diinginkan pada perkerasan jalan. Degradasi merupakan perubahan gradasi akibat dari pecahnya agregat dalam campuran. Agregat berpori banyak pada umumnya mempunyai tingkat kekerasan rendah, sehingga mudah pecah dan terjadi degradasi (Sukirman, 2016). Pori sedikit pada agregat berguna untuk menyerap aspal, sehingga terjadi ikatan yang baik antara aspal dan agregat. Pemeriksaan banyaknya pori agregat dapat diperkirakan dari banyaknya air yang terabsorpsi oleh agregat. Nilai penyerapan air berbeda pada tiap jenis agregat (Wirawan et al., 2016). Jumlah penyerapan aspal bisa mempengaruhi kinerja OGFC (Zhang et al., 2020). Pada OGFC, agregat dengan nilai penyerapan air rendah (< 2%) disukai (Alvarez et al., 2006; Suresha et al., 2009).

Daya lekat aspal terhadap agregat dipengaruhi oleh sifat agregat terhadap air. Berdasarkan sifat tersebut, terdapat dua jenis agregat yaitu *hydrophilic* dan *hydrophobic* (Sukirman, 2016). Granit dan agregat yang mengandung silika bersifat *hydrophilic*, mudah diresapi air dan tidak mudah dilekati aspal. Sebaliknya diorit dan andesit bersifat *hydrophobic* yaitu agregat yang tidak mudah terikat dengan air, tetapi mudah terikat dengan aspal (Sukirman, 2016).

Campuran aspal berpori memiliki ciri gradasi terbuka dengan dominasi agregat kasar dan kadar agregat halus yang minimum, agar terbentuk rongga yang berhubungan untuk memenuhi fungsi penyerapan air. Hal ini perlu dicermati, dimana gradasi terbuka rawan terhadap lemahnya *interlocking* yang akan berpengaruh pada kinerja perkerasan seperti stabilitas dan durabilitas. Perlu perhatian pada pemilihan agregat, dimana

dibutuhkan agregat yang kuat dan dapat diukur ketahanannya terhadap degradasi dan fragmentasi. Tekanan akibat beban lalu lintas diharapkan tidak menyebabkan hancurnya agregat sehingga mengganggu rongga, mengurangi konektivitas dan pada akhirnya mengurangi permeabilitas. Wirawan et al., (2016) membuktikan bahwa sifat fisik agregat memiliki hubungan positif dengan kandungan mineral agregat. Dengan kata lain, jenis agregat berpengaruh terhadap karakteristik agregat. Los Angeles Test, Impact Value Test, dan Crushing Value Test merupakan cara untuk mengukur kekerasan dan kekuatan agregat (Ugur et al., 2010). Fookes et al. (1988) dalam Wu et al. (1998) merekomendasikan kombinasi antara pengujian abrasi, *impact*, dan *crushing*, untuk menguji durabilitas agregat. Sedangkan yang berkaitan dengan mineral agregat dapat diketahui dengan Uji Petrogenesis Batuan.

2.4 Bitumen untuk Campuran Aspal Berpori

Sejak gradasi agregat dirancang lebih terbuka pada campuran aspal berpori, maka perlu digunakan aspal dengan daya ikat yang lebih baik daripada aspal konvensional. Aspal Pen. 60/70 yang umum digunakan di Indonesia kurang dapat mengikat agregat untuk menghasilkan struktur aspal berpori yang lebih masif (Djakfar et al., 2015). Nurcahya et al. (2015) juga menyatakan hal yang sama, bahwa aspal Pen. 60/70 tidak direkomendasikan untuk aspal berpori.

Penelitian tentang penggunaan aspal modifikasi pada campuran aspal berpori telah dilakukan sejak lama dan terus berkembang selama 20 tahun terakhir. National Center of Asphalt Technology (NCAT) dalam laporannya menyampaikan bahwa penggunaan aspal polimer dan beberapa aditif meningkatkan kinerja aspal berpori (Kandhal & Mallick, 1998). Sampai saat ini aspal modifikasi masih diuji pada riset-riset campuran aspal berpori dan pada umumnya sudah digunakan sebagai standar material pengikat pada spesifikasi aspal berpori untuk beban lalu lintas sedang sampai berat, baik di negara maju maupun negara-negara berkembang (Poulikakos & Partl, 2010; Zhao & Huang, 2010; Lyons & Putman, 2013; Xu et al., 2016; Sangiorgi et al., 2017; Senior-Arrieta et al., 2017; Shukry et al., 2018; Liu et al., 2019).

Salah satu upaya penelitian yang banyak dilakukan adalah penggunaan aspal modifikasi polimer (Chen et al., 2016). Banyak penelitian yang menemukan bahwa penggunaan aspal polimer memberikan kemampuan lebih pada campuran aspal berpori dalam menahan deformasi permanen (Chen et al., 2016). Aspal modifikasi polimer

mengurangi *rutting* dan *raveling* serta meningkatkan kemampuan permeabilitas pada aspal berpori dibandingkan dengan penggunaan aspal tradisional (Hsu et al., 2010; Chen et al., 2012). Polymer modified bitumen (PMB) dikatakan dapat meningkatkan adhesi antara agregat dan aspal (Gupta et al., 2019). Bahkan khususnya PG-76 dikatakan dapat meningkatkan durabilitas campuran (Hamzah et al., 2010). Spesifikasi Malaysia (Public Work Department Malaysia, 2008) dan Singapura (Singapore Land Traffic Authority, 2010) merekomendasikan PMB paling rendah PG 76 untuk aspal berpori.

2.5 Penggunaan Aditif pada Campuran Aspal Berpori

Telah lama diketahui bahwa serat memainkan peran penting dalam perilaku campuran aspal karena dapat meningkatkan kinerja spesifik campuran. Selain aplikasi aspal modifikasi polimer, penggunaan aditif terutama serat merupakan upaya lainnya dalam pengembangan kualitas dan kinerja aspal berpori (Punith et al., 2011). Penggunaan PMB dan serat signifikan mengurangi abrasi pada campuran sehingga meningkatkan durabilitas OGFC (Kandhal & Mallick, 1999).

Serat selulosa adalah salah satu aditif yang populer digunakan di studi- studi aspal berpori. Pada uji Cantabro, serat selulosa secara signifikan meningkatkan perilaku khususnya pada campuran aspal berpori dengan kadar aspal yang relatif tinggi (Nielsen, 2006). Penambahan serat selulosa juga menghambat deformasi permanen dan rutting (Aziz et al., 2015). Kemampuan menyerap minyak pada serat selulosa terbukti efektif mencegah *draindown* (Cooley et al., 2000; Schaus, 2007). Menambahkan 0,3 – 0,5% serat selulosa ke dalam campuran OGFC menghasilkan nilai stabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan campuran yang menggunakan serat *polypropylene* dan serat *polyester* (Ye & Jian, 2019). Terkait kadar serat, Bina Marga merekomendasikan 0,3% serat selulosa dalam campuran aspal (PUPR, 2018).

2.6 Parameter Karakteristik Agregat

Pada penelitian ini beberapa parameter karakteristik agregat akan dianalisis terhadap hasil pengujian kinerja campuran.

2.6.1 Nilai Los Angeles (LA)

Los Angeles Abrasion Test adalah metode yang populer untuk menguji sifat kekerasan dan keausan agregat, serta menggambarkan ketahanan terhadap abrasi dan fragmentasi (Fernlund, 2005). Agregat yang digunakan untuk perkerasan jalan harus memenuhi

persyaratan kekerasan untuk mencegah kehancuran, degradasi dan disintegrasi ketika dicampur dengan aspal, dipadatkan dan dibebani oleh lalu lintas kendaraan (Ugur et al., 2010). Agregat yang tidak memiliki kekerasan dan ketahanan abrasi yang memadai, akan bermasalah dari sisi konstruksi dan kinerja (Wu et al., 1998). Pada pengujian ini, sampel diputar di dalam alat Los Angeles sebanyak 500 kali dengan bola baja, kemudian Nilai LA dihitung dengan Persamaan 2.1.

$$LA = \frac{A-B}{A} \times 100\% \quad (2.1)$$

dimana:

LA = Los Angeles Value (%)

A = berat sampel awal (gram)

B = berat sampel yang tertahan saringan 1,7 mm (gram)

Agregat dengan nilai LA yang lebih tinggi akan lebih banyak mengalami degradasi, demikian juga campuran dengan *interlocking* yang lemah akan menyebabkan agregatnya lebih mudah mengalami degradasi (Ugur et al., 2010). Secara umum Bina Marga (Bina Marga, 2018) telah mengatur nilai LA untuk agregat yang digunakan sebagai material perkerasan jalan tidak lebih dari 30%. AAPA (2004) membatasinya sebesar 25%. Sebagai perbandingan, National Center for Asphalt Technology (NCAT) Jepang, sejak tahun 2000 membatasi nilai LA sebesar 30% (Herndon et al., 2016). Khusus agregat untuk aspal berpori Amerika membatasi LA < 25% (Zhang et al., 2020).

2.6.2 Aggregate Impact Value (AIV)

Pengujian ini untuk mengetahui tingkat kemampuan agregat terhadap kerusakan akibat tekanan dan tumbukan, akibat pemadatan dan beban lalu lintas. Pengujian impact (tumbukan) dilakukan dengan alat Aggregate Impact Machine secara manual dengan tenaga manusia. Nilai hasil pengujian dihitung dari seberapa besar agregat yang hancur setelah pengujian. Nilai AIV dihitung dengan Persamaan 2.2. Bina Marga (Bina Marga, 2018) membatasi nilai AIV tidak lebih dari 30%.

$$AIV = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (2.2)$$

dimana :

AIV = Aggregate Impact Value (%)

B = Berat sampel awal (gram)

A = Berat sampel yang lolos saringan 2 mm (gram)

2.6.3 Soundness Test

Pada campuran aspal berpori, agregat yang digunakan harus kuat dan awet (Kline, 2010). Keawetan agregat diuji dengan Soundness Test, dan biasa juga disebut dengan The Sulfate Soundness Test, karena menggunakan cairan Sodium Sulfat, dilakukan untuk menguji ketahanan agregat (keawetan) terhadap degradasi akibat pengaruh cuaca (Barksdale, 1993). Nilai Soundness adalah persentase kehilangan berat yang dicari dari selisih berat sampel sebelum pengujian dan sesudah pengujian. Bina Marga (Bina Marga, 2018) membatasi nilai ini tidak lebih dari 12%.

2.6.4 Petrogenesis Batuan

Dari sisi geologi batuan secara megaskopis dapat dideskripsikan kandungan mineral pembentuk batuan, struktur mineral sampai kekerasan batuan. Andesit merupakan batuan beku luar berwarna abu-abu kehitaman hingga agak gelap. Sedangkan diorit merupakan salah satu batuan beku dalam. Proses pembekuan yang berlangsung sangat lambat menyebabkan diorit memiliki tekstur kristal berukuran besar.

2.7 Spesifikasi Gradasi Australia

Menurut hasil penelitian Hassan et al. (2016b), spesifikasi gradasi Australia yang biasa disebut dengan AASHTO M 2.0, merupakan gradasi terbaik dibandingkan dengan gradasi US, Malaysia dan Singapura, dari sisi karakteristik rongga, konektivitas dan permeabilitas. Tabel 2.1 menampilkan keempat gradasi tersebut dimana dapat dilihat bahwa gradasi Australia memiliki dua fraksi saringan yang tidak dimiliki gradasi lainnya yaitu fraksi agregat sedang di saringan 6,7 mm dan fraksi agregat halus di saringan 1,18 mm. Secara keseluruhan, dari keempat gradasi tersebut, Australia dan Singapura relatif memiliki fraksi lebih lengkap dibandingkan kedua gradasi lainnya terutama pada agregat halus.

Rata-rata spesifikasi gradasi di berbagai negara memiliki celah di antara saringan ukuran 3/8 (9,5 mm) dan saringan nomor 4 (4,75 mm) (Herndon et al., 2016). Selain pada gradasi Singapura, Malaysia dan US, celah ini juga ditemui di spesifikasi Inggris, Swizelran dan Jepang (Setyawan & Sanusi, 2008). Namun Australia memiliki keunikan dengan mengisi celah tersebut dengan ukuran saringan 6,7 mm.

Tabel 2.1 Spesifikasi AAPA (2004), Singapura (2010), Malaysia (2008) & US (2013)

Nomor saringan	Ukuran saringan (mm)	Australia	Singapura	Malaysia	US
		Persentase lolos (%)			
¾"	19	100	100	100	100
½"	12,7	85-100	79-89	85-100	85-100
3/8"	9,5	45-70	67-77	55-75	35-60
2/7"	6,7	25-45	-	-	-
No. 4	4,75	10-25	17-26	10-25	10-25
No. 8	2,36	7-15	13-23	5-10	5-10
No. 16	1,18	6-12	-	-	-
No. 30	0,6	5-10	8-18	-	-
No. 50	0,3	4-8	6-12	-	-
No. 100	0,15	3-7	4-10	-	-
No. 200	0,075	2-5	4-8	2-4	2-4

Sumber : Hasan et al. (2016b)

Dari hasil penelitiannya, Hassan et al. (2016b) menyampaikan analisis sebagai berikut:

- 1) Perbedaan permeabilitas disebabkan karena perbedaan susunan gradasi sehingga mempengaruhi karakter rongga udara dalam campuran yang dipadatkan.
- 2) Campuran dengan agregat kasar menghasilkan permeabilitas yang lebih baik.
- 3) Kadar agregat halus harus dibatasi dengan ketat karena keberadaannya akan mengisi celah- celah yang kosong sehingga ukuran rongga berkurang. Akibatnya konektivitas rongga dalam campuran akan berkurang.
- 4) Komposisi atau proporsi yang baik antara agregat kasar dan agregat halus di dalam susunan gradasi akan membentuk konektivitas yang baik dalam campuran.

2.8 Kadar Rongga dan Porositas

Porositas pada campuran aspal berpori didefinisikan sebagai rongga- rongga yang saling berhubungan yang dapat dimasuki air dari luar (Mansour et al., 2013). Mansour melakukan penelitian pada 10 gradasi agregat dan menemukan bahwa porositas yang rendah menghasilkan permeabilitas yang rendah, dan sebaliknya, yang menunjukkan adanya korelasi antara porositas dan permeabilitas. Rongga dalam campuran aspal dikendalikan oleh gradasi agregat (Castillo et al., 2018). Gradasi agregat mengendalikan porositas dari struktur (susunan) agregat, yang mana mengendalikan kemampuan permeabilitas campuran aspal berpori (Suresha et al., 2010).

Total rongga dalam campuran aspal berpori terdiri dari kadar rongga yang dapat dilewati air dan kadar rongga yang tidak dapat dilewati air (Alvarez et al., 2008 dalam Mansour et al., 2013; Kline & Putman, 2011 dalam Mansour et al., 2013; Mansour et al., 2013). Dengan kata lain, porositas merupakan bagian dari total jumlah rongga dalam campuran. Kadar rongga merupakan salah satu parameter penting pada campuran aspal

berpori dan memiliki nilai standar tersendiri. Menurut Australian Road Standard yang disebutkan pada spesifikasi perencanaan campuran aspal berpori, kadar rongga disyaratkan sebesar 18 – 23 %. Kadar rongga pada aspal berpori dihitung dengan Persamaan 2.3.

$$AV = \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right) \times 100\% \quad (2.3)$$

dimana:

A_v = kadar rongga (%)

G_{mb} = berat jenis bulk campuran yang dipadatkan (g/cm³)

G_{mm} = berat jenis maksimum teoritis campuran (g/cm³)

Sedangkan porositas atau kadar rongga terhubung ($A_{V_{connected}}$) dihitung dengan Persamaan 2.4.

$$A_{V_{connected}} = \frac{V - \frac{m - mw}{\rho_w}}{V} \quad (2.4)$$

dimana :

$A_{V_{connected}}$ = kadar rongga yang terhubung (%)

V = Volume sampel (cm³)

m = berat sampel kering (gram)

mw = berat sampel jenuh air (gram)

ρ_w = density air (gram/cm³)

2.9 Permeabilitas

Kinerja fungsional dari campuran aspal berpori yang biasa disebut dengan permeabilitas, berhubungan langsung dengan jumlah rongga dan porositas dalam campuran, namun memiliki korelasi yang lebih baik dengan porositas, dikarenakan bahwa pengertian porositas adalah rongga- rongga yang dapat dilewati oleh air (Mansour et al., 2013). Dengan demikian, permeabilitas dapat didefinisikan sebagai kemampuan media yang berongga untuk mengalirkan fluida. Setiap material yang memiliki rongga (*voids*) dapat dikatakan porous, dan jika rongga itu saling berhubungan, maka ia akan memiliki sifat permeabilitas.

Rongga memiliki hubungan yang sangat kuat dengan permeabilitas (Vivar & Haddock, 2007 dalam Fang et al., 2018 ; Goode & Lufsey, 1965 dalam Fang et al., 2018; Zube, 1962 dalam Fang et al., 2018). Semakin banyak rongga, semakin baik permeabilitas (Herndon et al., 2016). Ada hubungan yang erat antara permeabilitas dan kadar rongga.

Ketika kadar rongga meningkat, permeabilitas juga meningkat secara linear (Ranieri et al., 2010). Porositas biasa juga disebut dengan kadar rongga efektif dimana terdapat hubungan linier antara kadar rongga dan kadar rongga efektif (Xing et al., 2010). Xing et al. (2010) mengatakan bahwa rongga efektif adalah faktor utama yang mempengaruhi permeabilitas. Semakin besar kadar rongga efektif semakin baik kinerja permeabilitas. Namun karena lebih mudah menguji jumlah kadar rongga, maka kadar rongga (A_v) dipilih sebagai indeks untuk mengetahui permeabilitas.

Parameter yang mempengaruhi permeabilitas adalah porositas, gradasi, ukuran agregat dan kadar aspal (Vardanega, 2014). Gradasi adalah salah satu faktor yang menentukan karakter rongga yang terbentuk (Vardanega, 2012 dalam Hassan, 2016b). Rongga yang saling berhubungan di dalam campuran aspal berpori adalah faktor yang paling signifikan mempengaruhi permeabilitas (Hassan et al., 2014). Dominasi agregat kasar pada gradasi akan cenderung membentuk rongga yang saling berhubungan (Fang et al., 2018). Begitu pula, agregat yang lebih kasar berkontribusi terhadap terbentuknya rongga yang saling terhubung (Sarwono & Wardhani, 2007; Djakfar et al., 2016; Jiang et al., 2015; Chen et al., 2016). Permeabilitas diukur dengan alat Falling Head Permeameter dan Koefisien Permeabilitas (k) dihitung dengan menggunakan rumus pada Persamaan 2.5.

$$k = \frac{al}{At} \ln \frac{h1}{h2} \quad (2.5)$$

dimana :

k = koefisien permeabilitas (cm/ det)

a = luas potongan melintang tabung (cm²)

A = luas potongan melintang benda uji (cm²)

l = tinggi benda uji (cm)

t = waktu yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari h_1 ke h_2 (detik)

h_1 = tinggi batas air paling atas pada tabung (cm)

h_2 = tinggi batas air paling bawah pada tabung (cm)

2.10 Standar/ Spesifikasi dan Persyaratan

Dari beberapa penelitian direkomendasikan penggunaan spesifikasi aspal berpori dari Australian Asphalt Pavement Association (AAPA). Di bawah ini ditampilkan persyaratan campuran aspal berpori dari AAPA (AAPA, 2002; AAPA, 2004) pada Tabel 2.2, dan spesifikasi gradasi campuran aspal berpori OGA 10 dari AAPA (AAPA, 2004)

pada Tabel 2.3. Gradasi OGA 10 menggunakan NMAS (Nominal Maximum Aggregate Size) 9,5 mm.

Tabel 2.2 Spesifikasi Campuran Aspal Berpori

No.	Kriteria perencanaan	Nilai
1	Permeabilitas	> 0,01 cm/det
2	Uji Cantabro loss	< 25 %
3	Stabilitas Marshall	> 500 kg
4	Kelelehan plastis	2 – 6 mm
5	Kadar rongga udara	18 – 23 %
6	Jumlah tumbukan per bidang (pematat Marshall)	50
7	Jumlah gyration (pematat gyratory)	80

Sumber : AAPA (2002); AAPA (2004)

Tabel 2.3 Gradasi Campuran Aspal Berpori

Ukuran Ayakan		OGA 10
ASTM	mm	Persen lolos (%)
¾"	19	-
½"	12,7	100
3/8"	9,50	85-100
2/7"	6,70	35-70
No. 4	4,75	20-45
No.8	2,36	10-20
No. 16	1,18	6-14
No. 30	0,60	5-10
No. 50	0,30	4-8
No.100	0,150	3-7
No. 200	0,075	2-5
Kadar Aspal (%)		4-6

Sumber : AAPA (2004)

Penelitian ini menggunakan gradasi tengah (ideal) spesifikasi Australia yaitu dengan mengambil nilai tengah dari persen lolos agregat pada tiap saringan. Dalam merancang gradasi, dihitung berat agregat tertahan pada tiap saringan berdasarkan persen lolos agregat. Berat agregat tertahan merupakan ukuran material yang akan digunakan dalam membuat campuran aspal berpori.

Adapun persyaratan mutu agregat dari AAPA (AAPA, 2004) dan Bina Marga (PUPR, 2018) ditampilkan pada Tabel 2.4, serta persyaratan mutu aspal dari Bina Marga (PUPR, 2018) pada Tabel 2.5.

Tabel 2.4 Persyaratan Mutu Agregat dan Standar Pengujian

No.	Parameter	Bina Marga	AAPA	Standar Pengujian
1	Los Angeles Value	≤ 30 %	≤ 25 %	SNI 2417:2008
2	Aggregat Impact Value	≤ 30 %	-	SNI 03-1996-1990
3	Soundness	≤ 12 %	-	SNI 3407:2008
4	Kepipihan & Kelonjongan	≤ 5 %	≤ 25 %	ASTM D4791-10
5	Kelekatan terhadap aspal	≥ 95 %		SNI 2439:2011
6	Penyerapan air	≤ 3 %	≤ 2,5 %	SNI 1969:2016
7	Berat Jenis	≥ 2,5 %		SNI 1969:2016

Sumber : AAPA (2004); PUPR (2018)

Tabel 2.5 Persyaratan Mutu Aspal dan Standar Pengujian

No.	Parameter	Spesifikasi	Standar Pengujian
1	Penetrasi pada 25°C	-	SNI 2456 : 2011
2	Berat jenis	≥ 1	SNI 2441: 2011
3	Titik nyala	≥ 230°C	SNI 2433:2011
4	Titik lembek	≥ 48	SNI 2434 : 2011
5	Viscositas pada 135°C	≤ 3000 CSt	SNI 06-6441-2000
6	Kehilangan berat	≤ 0,8 %	SNI 06-2440-1991

Sumber : PUPR (2018)

2.11 Pengujian Marshall

Pengujian Marshall bertujuan untuk mengetahui nilai Stabilitas dan Flow serta analisis density dan rongga dalam campuran padat (perhitungan volumetrik campuran). Nilai parameter- parameter Marshall dibandingkan dengan standar yang ada pada spesifikasi AAPA 2004.

2.12 Pengujian Permeabilitas

Pengujian permeabilitas pada campuran aspal berpori menggunakan alat Falling Head Permeameter dimana nilai koefisien permeabilitas dihitung dari nilai- nilai yang diperoleh pada pengamatan saat pengujian. Dari nilai- nilai yang diukur, akan didapat nilai koefisien permeabilitas dari masing masing benda uji yang menunjukkan tingkat kemampuan permeabilitas campuran. Perhitungan koefisien permeabilitas menggunakan

$$\text{Persamaan 2.5.}, k = \frac{al}{At} \ln \frac{h1}{h2}.$$

2.13 Pengujian Durabilitas Cantabro Loss

Pengujian Cantabro Loss lazim dilakukan pada campuran aspal berpori dengan tujuan untuk mengevaluasi ketahanan sampel terhadap keausan dan disintegrasi yang menggambarkan durabilitas campuran terhadap repetisi beban lalu lintas, termasuk ketahanan terhadap peluang *raveling* (pelepasan butir). *Raveling* merupakan salah satu kelemahan campuran aspal berpori. Poulikakos et al. (2006) dalam Luxman et al. (2019) menyatakan bahwa Cantabro Loss Test merupakan pengujian khusus aspal berpori untuk mengetahui ketahanan terhadap kehilangan partikel oleh *impact* dan abrasi akibat beban lalu lintas. Dilakukan dengan alat Los Angeles dimana sampel diputar sebanyak 300 kali tanpa bola baja. Serupa dengan pengujian abrasi agregat, nilai keausan dinyatakan dengan persentase bagian benda uji yang berkurang. Besarnya kehilangan berat pada Cantabro test dapat dihitung dengan Persamaan 2.6. Spesifikasi Australia membatasi nilai Cantabro sampai dengan 25%.

$$\text{Nilai keausan} = \frac{A-B}{A} \times 100\% \quad (2.6)$$

dimana :

A = berat sampel sebelum pengujian (gram).

B = berat sampel setelah pengujian (gram).

2.14 Pengujian Kerusakan Agregat

Kerusakan agregat diuji dengan metode ekstraksi (Hainin, 2013) dan dihitung dengan metode luas grafik. Pembuatan sampel untuk pengujian kerusakan agregat dilakukan sesuai dengan metode dan standar rancangan campuran aspal berpori. Pengujian dilakukan untuk mendapatkan data berat agregat tertahan setelah pemadatan pada tiap saringan. Sedangkan data berat agregat tertahan sebelum pemadatan sudah tersedia ketika merancang campuran. Kedua jenis data dihitung persentasenya terhadap berat total agregat. Persamaan 2.7 adalah contoh rumus untuk menghitung berat agregat tertahan pada saringan ukuran 9,5 mm terhadap berat total.

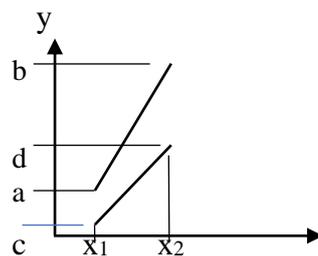
$$\text{Persentase berat tertahan agregat} = \frac{W_{9.5}}{W_{total}} \times 100\% \quad (2.7)$$

dimana :

$W_{9.5}$ = Berat agregat tertahan di saringan ukuran 9,5 mm (gram)

W_{total} = Berat total agregat dalam satu sampel (gram)

Setelah dihitung persentase berat tertahan agregat di semua ukuran saringan, maka data tersebut diplot di grafik, dimana sumbu x adalah ukuran saringan dan sumbu y adalah persentase berat tertahan agregat pada tiap sampel. Selanjutnya tingkat kerusakan agregat pada tiap sampel dihitung dengan metode luas grafik. Selisih antara persentase berat agregat tertahan sebelum pemadatan dan setelah pemadatan membentuk jajaran genjang. Oleh karena itu luas grafik merupakan penjumlahan dari luas beberapa segmen yang berbentuk jajaran genjang. Persamaan 2.8 merupakan rumus untuk menghitung luas satu segmen jajaran genjang seperti contoh pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Contoh Segmen Jajaran Genjang di Grafik Kerusakan Agregat

$$\text{Luas jajaran genjang} = (x_2 - x_1) \times \frac{(a-c)+(b-d)}{2} \quad (2.8)$$

dimana :

x_1 = Ukuran saringan yang lebih kecil

x_2 = Ukuran saringan yang lebih besar

a = Persentase berat agregat sebelum pemadatan tertahan saringan yang lebih besar

b = Persentase berat agregat sebelum pemadatan tertahan saringan yang lebih kecil

c = Persentase berat agregat setelah pemadatan tertahan saringan yang lebih besar

d = Persentase berat agregat setelah pemadatan tertahan saringan yang lebih kecil

2.15 Analisis dan Pengujian Hipotesis

Analisis dan pengujian hipotesis dilakukan dengan metode deskriptif dengan interpretasi dari data hasil penelitian untuk melihat hubungan dan pengaruh antar variabel. Analisis dilakukan secara saintifik dengan mengacu pada referensi terkait seperti buku, jurnal ilmiah dan jurnal internasional. Analisis dilakukan untuk melihat hubungan serta sebab akibat, antar variabel, baik hubungan langsung maupun hubungan tidak langsung yang pada akhirnya dapat ditarik kesimpulan dan rekomendasi.

2.16 Kerangka Berpikir

Peran gradasi, termasuk penentuan gradasi merupakan langkah utama dan terpenting pada perencanaan campuran aspal berpori. Agregat kasar harus mendominasi, dengan pembatasan pada porsi agregat halus dan filler. Selain itu, bentuk dan tekstur, kekuatan dan kekerasan, menentukan kualitas campuran. Sebagai lapisan perkerasan dengan gradasi terbuka, aspal berpori harus dapat mempertahankan struktur rongga selama umur rencananya dengan meminimalkan kerusakan agregat. Agregat yang kasar, kuat dan awet yang mampu menahan beban lalu lintas, dibutuhkan untuk membangun rongga yang terhubung.

Perancangan campuran aspal berpori harus menghasilkan keseimbangan antara kinerja fungsional (permeabilitas) dan kinerja struktural (durabilitas). Agregat harus kuat dan tahan terhadap abrasi untuk mencegah kerusakan dan degradasi akibat beban lalu lintas. Sifat ini khususnya sangat penting pada campuran bergradasi terbuka dan senjang (seperti OGFC dan SMA). Agregat yang lemah dapat menyebabkan masalah dari sisi konstruksi dan kinerja.

Pemahaman tentang kerusakan agregat yang terjadi setelah pencampuran dan pemadatan pada campuran aspal berpori, menjadi hal penting. Ukuran agregat bisa berubah secara signifikan, dan mengubah karakteristik campuran. Agregat harus kuat terhadap abrasi dan tekanan untuk mendukung kinerja struktural. Selain itu, kekerasan agregat juga diperlukan untuk menjaga rongga yang terhubung. Agregat yang mengalami kerusakan dan hancur selama pemadatan, akan mengubah gradasi, sehingga mengubah struktur rongga, dan berpengaruh terhadap rongga yang terhubung. Dikhawatirkan, terjadi penambahan kadar agregat yang lebih halus sebagai akibat dari degradasi, sehingga signifikan merubah gradasi dan mengganggu fungsional campuran, dalam hal ini, permeabilitas.

Angular dan tekstur agregat yang kasar dibutuhkan untuk menahan deformasi permanen, sedangkan agregat pipih dan lonjong tidak dibutuhkan pada campuran aspal, terutama di campuran dengan gradasi terbuka. Faktor ini menjadi alasan bahwa agregat sebagai material campuran aspal berpori harus kuat dan keras, serta relatif berbentuk kubus, dengan jumlah minimum agregat yang berbentuk pipih dan lonjong. Agregat yang lemah akan mengalami degradasi dan fragmentasi akibat beban lalu lintas, sehingga menyebabkan perubahan gradasi, yang akan berpengaruh terhadap rongga dan dapat

mengganggu konektivitas rongga. Sementara, rongga yang saling berhubungan (konektivitas) pada campuran aspal berpori, merupakan kunci untuk menghasilkan lapisan perkerasan yang *permeable*.

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa, mempertahankan struktur agregat adalah hal penting dalam keberhasilan rancangan campuran aspal berpori, yaitu dengan memelihara rancangan gradasi agregat. Perubahan kecil pada gradasi bisa membawa pengaruh besar pada kinerja campuran, baik fungsional maupun durabilitas campuran. Campuran gradasi terbuka membutuhkan gradasi yang memberikan kontak antar agregat. Selain itu, *interlocking* yang lemah akan lebih mudah menyebabkan agregatnya mengalami degradasi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, degradasi dapat disebabkan selain karena agregat yang lemah, juga karena *interlocking* yang lemah.

Ukuran agregat, terutama pada perkerasan *open graded* perlu menjadi perhatian. Ukuran partikel agregat yang lebih besar dapat berpeluang terhadap tingkat degradasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pemilihan gradasi juga perlu memperhatikan ukuran fraksi agregat. Perlu dipertimbangkan penggunaan ukuran agregat sedang. Spesifikasi Australia 2004 (AAPA, 2004) merupakan salah satu spesifikasi gradasi yang memiliki dua fraksi ukuran agregat (sedang dan halus) yang tidak dimiliki oleh spesifikasi lainnya.

Berkaitan dengan permasalahan pada permeabilitas yang berkaitan dengan kadar rongga, faktor kekerasan agregat akan menjadi variabel yang diukur dan diduga berpengaruh terhadap kerusakan agregat. Jenis agregat berpengaruh terhadap karakteristik agregat, maka perlu dilakukan penelitian terhadap jenis agregat yang berbeda. Beberapa parameter yang menggambarkan sifat agregat akan dianalisis yaitu Los Angeles, penyerapan air dan kekerasan mineral batuan. Dilanjutkan dengan pengujian stabilitas, Cantabro Loss, kadar rongga, kadar rongga terhubung serta permeabilitas. Kerangka berpikir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.3.

2.17 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang ada, maka hipotesis penelitian dirumuskan sebagai berikut:

Jenis agregat dan kekerasannya berpengaruh terhadap permeabilitas.

2.18 Kebaruan (Novelty)

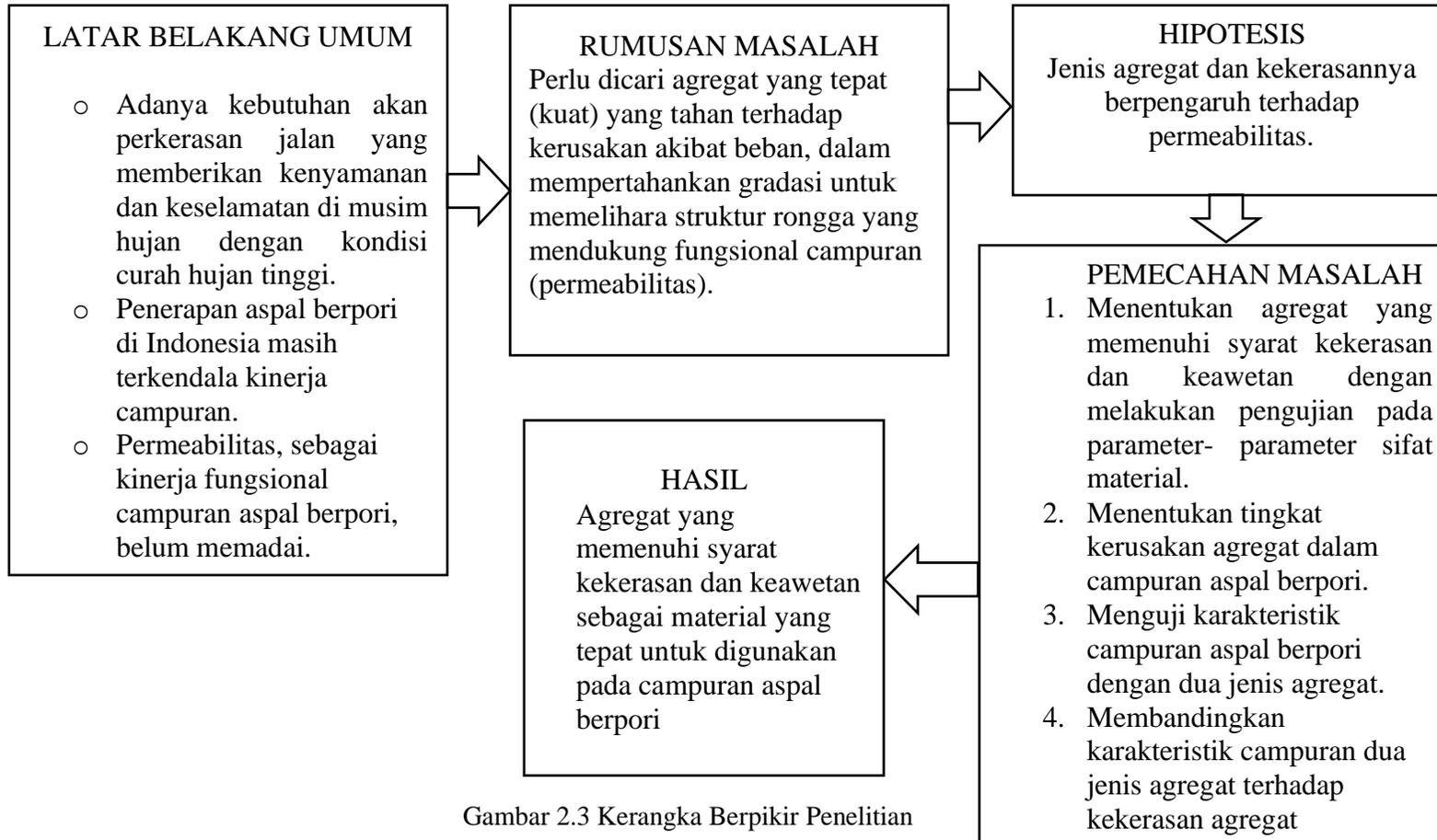
Gradasi agregat, sebagai pembentuk rongga pada campuran, memegang peranan penting pada permeabilitas, yang merupakan salah satu kinerja fungsional pada campuran aspal

berpori. Perubahan pada gradasi dapat mengubah kinerja campuran. Beban lalu lintas dapat menyebabkan kerusakan agregat sehingga menyebabkan perubahan gradasi. Agregat yang lemah bisa hancur, berubah ukuran, sehingga merubah gradasi, mempengaruhi struktur rongga, menurunkan kadar rongga, mengganggu konektivitas rongga, yang pada akhirnya mengurangi permeabilitas. Oleh karena itu, faktor kekerasan agregat menjadi sangat penting, dan sudah dikaji dengan pendekatan nilai abrasi Los Angeles (Repik, 2017) terhadap pengaruhnya pada permeabilitas dan durabilitas.

Seperti yang telah disinggung pada uraian Sub-Bab 1.1 tentang latar belakang masalah penelitian, untuk melengkapi penelitian yang sudah ada, maka terkait dengan upaya mempertahankan gradasi campuran, perlu diteliti terhadap jenis agregat dan bagaimana kerusakan agregat yang terjadi untuk mendapatkan agregat yang tepat sebagai material campuran aspal berpori yang mendukung fungsional campuran. Analisis dilakukan terhadap pengaruh karakteristik masing- masing jenis agregat terhadap kinerja campuran.

Seperti yang sudah disinggung pada Bab I, faktor- faktor yang berpengaruh terhadap permeabilitas campuran aspal berpori, termasuk peran agregat, sudah banyak diteliti. Penelitian ini mengisi gap dari sisi jenis agregat yang membahas secara khusus pengaruh jenis batuan terhadap rongga dan permeabilitas. Hasil penelitian akan merekomendasikan jenis agregat dan karakteristiknya yang tepat digunakan sebagai material campuran aspal berpori. Adapun gap penelitian campuran aspal berpori dapat dilihat pada Gambar 2.4.

KAJIAN KEKERASAN AGREGAT TERHADAP PERMEABILITAS CAMPURAN ASPAL BERPORI



Gambar 2.3 Kerangka Berpikir Penelitian

Kinerja Variabel	Stabilitas	Cantabro Loss	Kadar Rongga	Kadar Rongga Terhubung	Koefisien Permeabilitas
Kekerasan agregat	Penelitian ini	Herndon et al. (2016), Repik (2017), Penelitian ini	Putman et al. (2015), Herndon et al. (2016), Krol et al. (2017), Repik (2017), Penelitian ini	Krol et al. (2017), Penelitian ini	Herndon et al. (2016), Krol et al. (2017), Penelitian ini
Gradasi	Setyawan & Sanusi (2008), Djumari & Sarwono (2009), Xing et al. (2010)	Setyawan & Sanusi (2008), Djumari & Sarwono (2009), Mansour & Putman (2013)	Setyawan & Sanusi (2008), Djumari & Sarwono (2009), Xing et al. (2010), Mansour & Putman (2013), Hassan et al. (2016), Krol et al. (2017)	Xing et al. (2010), Mansour & Putman (2013), Krol et al. (2017),	Xing et al. (2010), Mansour & Putman (2013), Hassan et al. (2016), Krol et al. (2017)
Kadar aspal	Hendrik et al. (2014), Ramadhan & Reza (2014), Djakfar et al. (2016), Ramadhan (2017), Penelitian ini	Hendrik et al. (2014), Penelitian ini	Hendrik et al. (2014), Ramadhan & Reza (2014), Djakfar et al. (2016), Penelitian ini	Penelitian ini	Hendrik et al. (2014), Djakfar et al. (2016)
Kerusakan agregat			Penelitian ini	Penelitian ini	Penelitian ini
Jenis binder	Kamba et al. (2015), Nurcahya (2015)	Kamba et al. (2015), Nurcahya (2015)	Kamba et al. (2015), Nurcahya (2015)		
Aditif	Ali (2013), Djakfar et al. (2015), Djakfar et al. (2016), Ramadhan & Reza (2014), Ramadhan (2017), Arlia (2017), Ayun (2017), Noris & Mahardi (2017)		Ramadhan & Reza (2014), Djakfar et al. (2015), Djakfar et al. (2016), Arlia (2017), Noris & Mahardi (2017), Acevedo et al. (2020)		Ali (2013), Djakfar et al. (2015), Djakfar et al. (2016), Ramadhan (2017), Ayun (2017), Acevedo et al. (2020)
Suhu Pemasakan		Luxman et al. (2019)	Luxman et al. (2019)		
Jumlah Pemasakan		Repik (2017)	Repik (2017)		
Sumber Agregat	Hendrik et al. (2014)	Hendrik et al. (2014), Herndon et al. (2016)	Hendrik et al. (2014)		Hendrik et al. (2014), Herndon et al. (2016)
Bentuk Agregat		Xiaowei et al. (2018)	Krol et al. (2017), Xiaowei et al. (2018)	Krol et al. (2017), Xiaowei et al. (2018)	Krol et al. (2017), Xiaowei et al. (2018)
Angularitas	Tarmuzi et al. (2015)	Tarmuzi et al. (2015)	Tarmuzi et al. (2015)		
Jenis agregat	Penelitian ini		Krol et al. (2017), Penelitian ini	Krol et al. (2017), Penelitian ini	Krol et al. (2017), Penelitian ini

Gambar 2.4 Gap Penelitian Terkait Campuran Aspal Berpori