

Pengaruh Penyumbatan Pori (*Clogging*) pada Perkerasan Aspal Porous Terhadap Permeabilitas dan Limpasan Permukaan

Talitha Puspa Melati*

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, E-mail: talithapm@gmail.com

Eri Susanto Hariyadi

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, E-mail: erisdi@yahoo.com

Harmein Rahman

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, E-mail: rahmanharmein@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penyumbatan pori pada aspal porous terhadap kemampuan drainase melalui parameter limpasan permukaan dan permeabilitas. Asbuton murni digunakan sebagai bahan pengikat dengan harapan dapat memperbaiki kualitas campuran. Penelitian disimulasikan pada kondisi sebelum dan sesudah terjadi penyumbatan pori dengan variasi load sedimen, gradasi campuran, dan curah hujan. Penentuan gradasi campuran melalui proses trial dengan ketentuan batas sesuai ASTM D7064/D7064M – 08 (2013). Pengujian tersebut menggunakan alat falling head dan rainfall simulator. Hasil pengujian menunjukkan bahwa load sedimen berpengaruh terhadap penurunan kapasitas infiltrasi campuran aspal porous. Kapasitas infiltrasi campuran aspal porous dengan VIM 20,67% dapat menurun hingga 22% ketika disimulasikan penyumbatan pori dengan load sedimen sebesar 780 gram/m². Intensitas hujan 110 mm/jam hanya dapat mengembalikan kemampuan pengaliran air pada ketiga campuran aspal porous sebesar 11%. Tidak ada limpasan permukaan pada seluruh campuran baik dalam kondisi pori normal maupun tersumbat oleh sedimen. Di antara ketiga desain campuran aspal porous, campuran dengan VIM 23% memiliki ketahanan penyumbatan pori paling baik terhadap load sedimen yang disimulasikan. Untuk menghasilkan campuran dengan VIM tinggi, gradasi campuran aspal porous didesain dengan nilai koefisien keseragaman (Cu) yang rendah.

Kata-kata Kunci: Aspal porous, asbuton, limpasan permukaan, permeabilitas, rainfall simulator.

Abstract

This research aims to analyze the effect of porous asphalt clogging on drainage capacity through surface runoff and permeability parameters. Buton rock asphalt pure extraction is used as a binder to increase the quality of the mixture. The study simulated the condition before and after the occurrence of porous asphalt clogging with variations in sediment load, gradation, and rainfall intensity. Determination of the gradation through trial process with limit condition according to ASTM D7064/D7064M – 08 (2013). The simulation used falling head and rainfall simulator tools. The test results show that the sediment load affected the decrease in infiltration capacity of porous asphalt. The infiltration capacity of porous asphalt with VIM of 20.67% can decrease up to 22% when pores were clogged by sediment of 780 gram/m². Rain intensity of 110 mm/hour only restore the ability to drain water by 11%. There was no surface runoff on any of the mixtures under both normal and sediment clogged pore conditions. Among three porous asphalt mixture designs, mixture with highest VIM had the best pore clogging resistance. To produce mixture with high VIM, the porous asphalt gradation was designed with low uniformity coefficient (Cu).

Keywords: Asbuton, porous asphalt, permeability, rainfall simulator, surface runoff.

1. Pendahuluan

Faktor lingkungan yang berpengaruh langsung terhadap kerusakan struktur perkerasan jalan adalah air. Saat curah hujan tinggi, permukaan perkerasan dapat tergenang dan air masuk ke lapisan di bawahnya

melalui retak, lubang, maupun celah permukaan lainnya (Yilmaz dkk.,2012). Kandungan air dalam tanah yang melebihi nilai optimum dapat menurunkan daya dukung tanah. Apabila kondisi tersebut dikombinasikan dengan beban lalu lintas tinggi, dapat menyebabkan kerusakan perkerasan salah satunya

* Penulis Korespondensi: talithapm@gmail.com

adalah pelepasan ikatan antara butiran agregat dan pengikatnya (Huang, 2004).

Aspal porous merupakan salah satu inovasi di bidang perkerasan jalan yang dikembangkan untuk mengatasi masalah genangan air di permukaan perkerasan. Perkerasan jenis ini memiliki sistem drainase ganda karena memiliki kemampuan untuk mengalirkan air melalui permukaan perkerasan dan lapis perkerasan bagian bawah. Campuran aspal porous memiliki gradasi terbuka dengan proporsi agregat kasar lebih besar daripada agregat halus. Oleh karena itu, aspal porous memiliki ruang pori yang tinggi dibandingkan perkerasan aspal konvensional. Karakteristik campuran tersebut memungkinkan air mengalir dari lapisan permukaan ke lapisan perkerasan di bawahnya melalui proses infiltrasi. Air yang telah meresap tersebut lalu dapat dialirkan ke tepi badan jalan dan dibuang menuju saluran samping. Porositas yang tinggi pada aspal porous juga memberikan kekesatan permukaan yang dapat membantu mengurangi percikan air saat kendaraan melintas pada kondisi permukaan basah sehingga dapat mencegah *hydroplaning* (Fwa dkk., 2015).

Rancangan campuran aspal porous memiliki gradasi terbuka dengan tujuan agar memperoleh rongga dalam campuran yang saling berhubungan (*interconnected*) dengan permeabilitas tinggi. Penyumbatan pada permukaan perkerasan merupakan masalah utama pada struktur perkerasan aspal porous (Chopra dkk., 2010). Material partikulat yang berasal dari roda kendaraan maupun lingkungan sekitar mengendap di atas permukaan perkerasan. Partikulat yang tidak terbawa oleh limpasan air terperangkap dalam rongga aspal porous sehingga menyebabkan penyumbatan pori (Brugin dkk., 2017).

Penelitian ini menganalisis pengaruh penyumbatan pori pada aspal porous terhadap kemampuan drainase melalui parameter limpasan permukaan dan permeabilitas. Selain itu, pada penelitian ini juga diharapkan akan diperoleh komposisi campuran aspal porous yang memiliki ketahanan terhadap

penyumbatan pori. Desain campuran aspal dibuat dengan tiga variasi gradasi berdasarkan hasil percobaan di laboratorium dan sebagai bahan pengikat campuran digunakan asbuton murni hasil ekstraksi penuh. Asbuton murni digunakan sebagai bahan pengikat untuk memanfaatkan produk dalam negeri, serta asbuton mampu menghasilkan nilai modulus dan elastisitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan aspal pen (Affandi, 2012) dan dapat menjadi alternatif bahan pengikat (Sihombing, 2021).

Sebagai simulasi penyumbatan pori, aspal porous diaplikasikan sedimen pasir bergradasi tertentu pada permukaannya dengan tiga variasi load sedimen. Sampel diuji permeabilitas serta limpasan permukaan sebelum dan sesudah pemberian sedimen pasir, serta setelah adanya *maintenance*. Untuk menentukan kemampuan aspal porous dalam melimpaskan air dilakukan pengujian menggunakan *rain simulator*. Kemudian, juga dilakukan pengukuran permeabilitas menggunakan alat *falling head*, serta sebagai pertimbangan dari aspek karakteristik mekanis aspal porous dilakukan pengujian Cantabro dan Marshall.

2. Material

Pengujian material campuran beraspal terdiri dari pengujian agregat kasar, agregat halus, dan asbuton berdasarkan ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Hasil pengujian karakteristik agregat kasar, halus, dan asbuton ditunjukkan pada **Tabel 1** dan **2**.

Beberapa zat tambahan dapat diberikan pada campuran aspal porous untuk memperbaiki sifat campuran. Salah satu penggunaan zat aditif pada aspal porous yang direkomendasikan oleh ASTM D7064/D7064M-08 (2013) adalah fiber selulosa untuk meminimalisasi terjadinya *draindown*. Pada penelitian ini, campuran ditambahkan selulosa Viatop dengan kadar 0,3% dari total masa campuran.

3. Metodologi

Penelitian ini meliputi empat tahapan utama, yaitu perancangan campuran aspal porous, karakterisasi material penyumbat pori, karakterisasi variasi intensitas hujan, dan pengujian campuran. Pengujian *draindown* dan (*void in mixture*) VIM digunakan untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO). Kemudian pengujian lanjutan terdiri dari uji permeabilitas, *rainfall simulator*, Cantabro, dan Marshall.

Tabel 1. Hasil pengujian agregat kasar dan halus

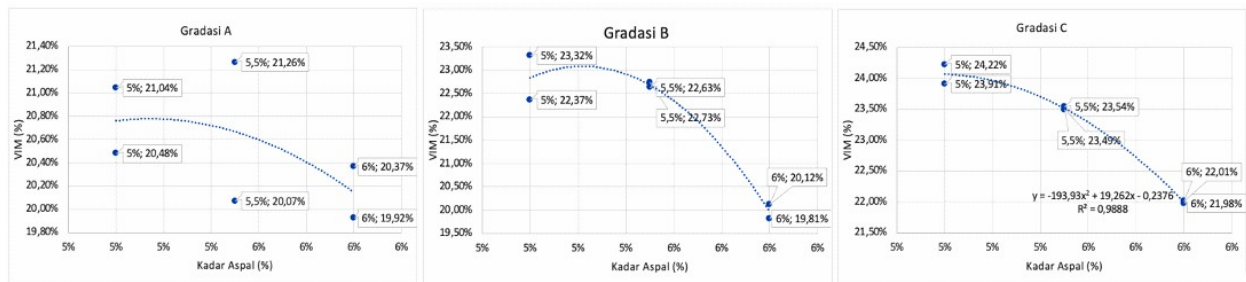
No	Pengujian	Metode Pengujian	Hasil
1	Berat Jenis Agregat Kasar	SNI 1969:2008	2,63
2	Berat Isi Agregat Kasar		1,45
3	Berat Jenis Agregat Halus	SNI 1970:2016	2,63

Tabel 2. Hasil pengujian asbuton

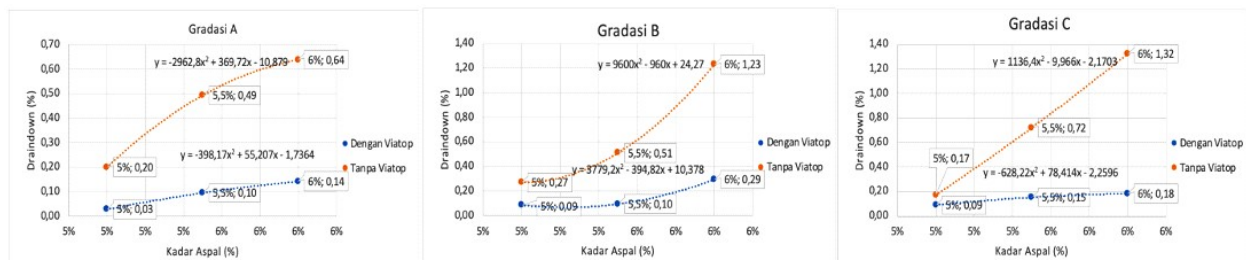
No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Standar	Hasil
1	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis ($G^*/\sin\delta$) $\geq 1,0$ kPa, (°C)	SNI 06-6442-2000	70	74
2	Penetrasi pada 25°C (0.1mm)	SNI 2456:2011	Dilaporkan	52,00
3	Daktilitas pada 25°C (0.1mm)	SNI 2432:2011	Dilaporkan	>120
4	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	Dilaporkan	52,50
5	Berat Jenis Residu aspal segar setelah RTFOT (SNI-03-6835-2002) / TFOT (SNI 06-2440-1991)		Dilaporkan	1,033
6	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis ($G^*/\sin\delta$) $\geq 2,2$ kPa, (oC)	SNI 06-6442-2000	70	75,7
7	Penetrasi pada 25°C (0.1mm) persen semula	SNI 2456 : 2011	≥ 54	73,50
8	Daktilitas pada 25°C (0.1mm)	SNI 2432:2011	≥ 25	>120

Tabel 3. Gradasi campuran aspal porous

Ukuran Ayakan		% Lolos				
		ASTM D7064/D7064M – 08 (2013)		Gradasi Campuran		
ASTM	mm	Min.	Maks.	A	B	C
¾ in	19,5	100	100	100	100	100
½ in	12,5	85	100	92	93	92
3/8 in	9,5	35	60	60	40	60
No. 4	4,75	10	25	25	14	20
No. 8	2,36	5	10	8	8	5
No. 200	0,075	2	4	3	4	2



Gambar 1. Hubungan antara VIM dengan kadar aspal



Gambar 2. Hubungan antara draindown dengan kadar aspal

3.1 Rancangan campuran aspal porous

Desain campuran yang akan digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga gradasi berdasarkan hasil *trial and error* untuk memperoleh variasi VIM sesuai target dan memenuhi syarat ASTM D7064/D7064M – 08 (2013). Rincian gradasi campuran aspal porous dapat dilihat pada Tabel 3.

Setelah menentukan gradasi campuran aspal porous dilakukan penentuan kadar aspal optimum (KAO) sesuai ketentuan ASTM D7064/D7064M-08 2013 yaitu berdasarkan hasil pengujian VIM minimal 18% dan pengaliran aspal (*asphalt draindown*) maksimal 0,3%. Variasi kadar aspal yang digunakan adalah 5%, 5,5%, dan 6% untuk masing – masing gradasi A, B, dan C. Pada pengujian VIM, benda uji dipadatkan menggunakan alat *Superpave Gyratory Compactor* (SGC) dengan jumlah girasi 50 kali untuk setiap benda uji.

Hasil pengujian VIM dan *draindown* ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Seluruh hasil pengujian VIM memenuhi ketentuan minimal 18%. Kemudian, pengujian *draindown* dilakukan pada dua jenis campuran, yaitu campuran aspal porous tanpa menggunakan selulosa Viatop dan dengan menggunakan selulosa Viatop kadar 0,3%. Seluruh nilai *draindown* gradasi A, B, dan C dengan menggunakan Viatop

memenuhi persyaratan maksimal 0,3%. Nilai KAO yang digunakan berdasarkan pengujian VIM dan *draindown* adalah nilai tengah di antara rentang kadar aspal sesuai hasil pengujian yaitu sebesar 5,5%.

3.2 Karakteristik material penyumbat pori

Penelitian terkait sedimen polutan pada jalan raya di Indonesia maupun negara tropis lain masih terbatas. Karakteristik material penyumbatan pori menggunakan hasil penelitian yang dilakukan di Malaysia (Chow dkk., 2013) karena kemiripan karakteristik antara wilayah studi tersebut dengan Indonesia. Penelitian tersebut dilakukan dengan mengambil sampel sedimen pada tiga jenis jalan di area permukiman, komersial, dan industri di Skudai, Peninsular. Dalam penelitian ini, simulasi penyumbatan pori menggunakan tiga variasi *load* sedimen bergradasi tertentu (Chow dkk., 2013) pada area komersial. Rata – rata *load* sedimen pada jalan raya komersial adalah 26 gram/m²/hari atau 260 gram/m²/10 *antecedent dry days* (ADD). Nilai tersebut menjadi variasi *load* pertama pada penelitian ini. Untuk variasi *load* sedimen kedua dilakukan simulasi penyumbatan pori dengan kondisi 20 hari ADD sebesar 52 gram/m²/hari atau 520 gram/m²/20 hari ADD dan variasi *load* sedimen ketiga untuk 30 hari ADD sebesar 78 gram/m²/hari atau 780 gram/m²/30 hari ADD.

3.3 Variasi intensitas hujan

Simulasi hujan pada *rainfall simulator* menggunakan dua variasi intensitas hujan berdurasi 15 menit. Curah hujan pertama sebesar 1965,5 mm merupakan curah hujan harian maksimum di Indonesia selama 100 tahun dengan lokasi pencatatan hujan di Stasiun Meteorologi Banyuwangi. Dengan menggunakan persamaan Mononobe, curah hujan harian maksimum tersebut dikonversi menjadi intensitas hujan jam – jaman menjadi 110 mm/jam dengan asumsi durasi hujan adalah 6 jam. Variasi intensitas hujan kedua sebesar 50 mm/jam (Nnadi dkk., 2014) terkait intensitas – durasi – frekuensi hujan 22 kota di seluruh dunia.

3.4 Simulasi penyumbatan pori (clogging) pada aspal porous

Pengukuran permeabilitas dan limpasan permukaan dilakukan pada dua kondisi, yaitu sebelum dan setelah simulasi penyumbatan pori pada aspal porous. Pengujian dengan dua kondisi tersebut bertujuan untuk meneliti korelasi penyumbatan pori terhadap kemampuan permeabilitas dan besarnya limpasan permukaan pada perkerasan aspal porous. Untuk mengukur nilai permeabilitas dilakukan pengujian menggunakan alat *falling head* dan pengukuran limpasan permukaan dilakukan dengan memodifikasi alat *Basic Hydrology System Armfield S12 – MKII* sebagai *rainfall simulator* (Abudi dkk., 2012) sesuai **Gambar 3**. Benda uji yang digunakan pada alat *rainfall simulator* berbentuk persegi panjang berukuran 300 x 400 x 100 mm.

4. Hasil Pengujian dan Analisis

4.1 Analisis pemilihan gradasi

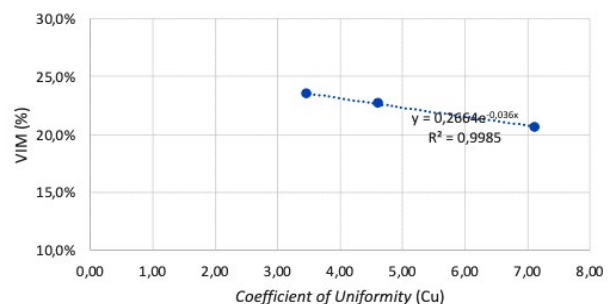
Untuk menentukan nilai VIM, ketiga variasi gradasi pada **Tabel 3** dibuat benda uji pada nilai KAO.



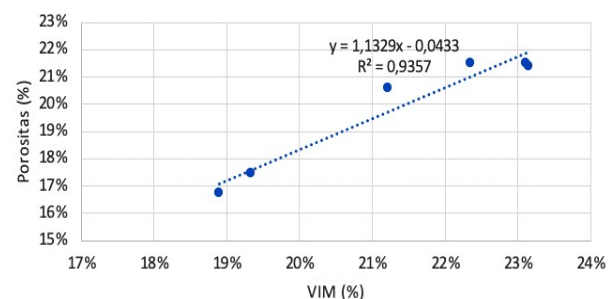
Gambar 3. Alat uji rainfall simulator dan falling head

Kemudian, untuk menentukan hubungan antara nilai VIM dengan distribusi ukuran partikel dilakukan analisis terhadap parameter ukuran efektif (D_{10}), *uniformity coefficient* (Cu), dan *coefficient of gradation* (Cc) dengan hasil ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Ketiga gradasi dirancang dengan keseragaman agregat yang berbeda, yaitu ditunjukkan dengan nilai Cu yang bervariasi antara 3 – 7. Nilai Cu tersebut menggambarkan rentang ukuran partikel agregat yang digunakan dalam gradasi rencana. **Gambar 4** menunjukkan hubungan antara nilai Cu dengan VIM, yaitu berbanding terbalik. Semakin tinggi nilai Cu menunjukkan bahwa gradasi cenderung bersifat menerus dan ukuran butir agregat terdistribusi dengan baik dan dihasilkan VIM rendah. Sedangkan semakin kecil nilai Cu, gradasi lebih bersifat seragam atau terbuka (*open graded*). Proporsi agregat halus yang sedikit menghasilkan campuran dengan rongga yang tinggi (Koozmishi dkk., 2018). Kemudian, nilai VIM tersebut juga erat kaitannya dengan kemampuan campuran dalam mengalirkan air. Campuran dengan rongga menerus yang tinggi memiliki kemampuan pengaliran air yang semakin baik (Ranieri dkk., 2010). Oleh sebab itu, agar dihasilkan campuran aspal porous dengan kemampuan pengaliran air yang baik dapat digunakan rancangan gradasi dengan nilai Cu yang kecil.



Gambar 4. Rentang nilai VIM pada ketiga distribusi ukuran partikel



Gambar 5. Hubungan antara Porositas dan VIM

Tabel 4. Hasil pengujian kepadatan dan VIM campuran aspal porous

Gradasi	Persentase Agregat			VIM	D10	D30	D60	Cu	Cc
	Kasar	Halus	Filler						
A	75%	22%	3%	20,67%	0,95	5,00	6,75	7,11	3,90
B	86%	10%	4%	22,68%	1,5	6,00	6,90	4,60	3,48
C	80%	18%	2%	23,52%	2,00	6,50	6,90	3,45	3,06

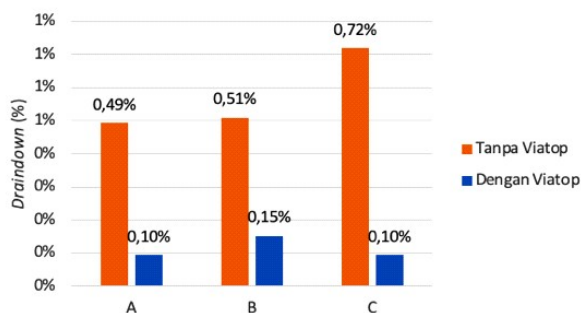
4.2 Analisis data porositas efektif

Porositas efektif merupakan persentase void yang dapat diakses oleh air secara menerus hingga rongga campuran jenuh sehingga erat kaitannya dengan kapasitas infiltrasi perkerasan aspal porous. Hubungan antara porositas efektif dan VIM ditunjukkan pada **Gambar 5**.

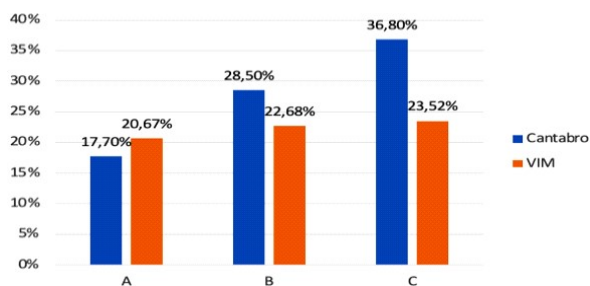
Berdasarkan **Gambar 5**, terlihat bahwa nilai porositas efektif campuran lebih kecil daripada nilai VIM. Hal ini menunjukkan bahwa tidak seluruh pori dalam campuran berupa rongga menerus yang dapat mengalirkan air. Oleh karena itu, perlu diperhitungkan besarnya pori semi efektif dan non efektif untuk menentukan kapasitas infiltrasi aspal porous (Yang dkk., 2019).

4.3 Analisis pengujian *draindown*

Sesuai dengan hasil pengujian *draindown* pada **Gambar 6**, campuran aspal porous gradasi A, B, dan C tanpa penambahan selulosa Viatop mengalami *draindown* pada kadar aspal lebih dari 5%. Oleh sebab itu, untuk mengurangi *draindown*, campuran aspal porous ditambahkan Viatop sebesar 0,3% dari berat campuran.



Gambar 6. Hasil pengujian *draindown* pada KAO



Gambar 7. Hasil uji *Cantabro Loss*

Pada nilai KAO, Viatop dapat menurunkan *draindown* sebesar 81%, 70%, dan 87% untuk gradasi A, B, dan C sesuai **Gambar 6**. Hal tersebut disebabkan karena penambahan Viatop mampu meningkatkan gaya kohesi antara agregat dengan aspal. Selain itu, viatop juga meningkatkan viskositas aspal sehingga memiliki ketahanan terhadap perubahan suhu yang tinggi dan dapat menghambat terjadinya pengaliran aspal akibat gravitasi (Muhammed dkk., 2022).

4.4 Analisis data pengujian *cantabro loss*

Gambar 7 menunjukkan bahwa hubungan antara *Cantabro Loss* dengan rongga dalam campuran berbanding lurus. Berdasarkan hasil pengujian, hanya gradasi A yang menghasilkan campuran beraspal yang memiliki ketahanan terhadap abrasi sesuai spesifikasi. Nilai VIM campuran A yang kecil menghasilkan *interlocking* yang baik antara agregat kasar dan halus sehingga campuran memiliki ketahanan terhadap abrasi. Lalu, rendahnya ketahanan terhadap abrasi pada campuran B dan C menunjukkan bahwa komposisi agregat halus yang sedikit menghasilkan nilai VIM yang tinggi sehingga permukaan agregat yang terkena pengaruh udara, temperatur, dll menjadi lebih luas dan campuran lebih cepat mengalami oksidasi.

Terkait dengan hasil pengujian Cantabro, dilakukan perhitungan terhadap nilai *bitumen film thickness* (BFT) asbuton murni yang bertujuan untuk mengetahui kadar aspal yang menyerap ke dalam pori agregat dan kadar aspal efektif yang menyelimuti agregat. Hasil perhitungan luas total permukaan agregat disajikan pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**. Gradasi yang memiliki luas permukaan paling tinggi adalah gradasi B, dengan komposisi agregat kasar 86%, agregat halus 10% dan *filler* 4% dan menghasilkan ketebalan film aspal paling tipis, yaitu 27,10 mikron. Nilai tersebut menunjukkan bahwa dengan kadar aspal yang sama banyaknya, selimut aspal menjadi lebih tipis pada campuran dengan permukaan yang luas. Apabila dihubungkan dengan hasil pengujian *Cantabro Loss*, ketebalan film aspal pada ketiga campuran tidak mencukupi sehingga menghasilkan campuran dengan ikatan lemah sehingga durabilitasnya kurang baik (Peng dkk., 2023).

4.5 Analisis data pengujian marshall

Hasil pengujian stabilitas disajikan pada **Gambar 8**. Berdasarkan **Tabel 3**, gradasi A tersusun atas agregat kasar dengan komposisi paling kecil dibandingkan gradasi B dan C namun komposisi agregat halus lebih

Tabel 5. Hasil perhitungan FLP

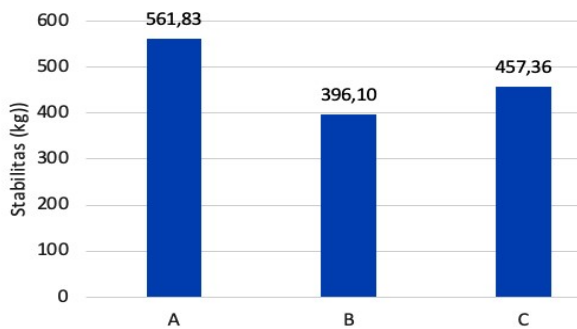
Ukuran Ayakan		% Lolos Gradasi Campuran			FLP	FLP X %Lolos (m ² /kg)		
ASTM	mm	A	B	C		A	B	C
¾ in	19	100	100	100	0,41	0,41	0,41	0,41
½ in	12,5	92	93	92				
3/8 in	9,5	60	40	60				
No. 4	4,75	25	14	20	0,41	0,10	0,06	0,08
No. 8	2,36	8	8	5	0,82	0,07	0,07	0,04
No. 200	0,075	3	4	2	32,77	0,98	1,31	0,66
Luas Permukaan Total Agregat						1,56	1,84	1,19

Tabel 6. Hasil perhitungan tebal selimut aspal asbuton murni

Gradasi	Gsb	Gse	Gmm	Pae	Pab	Tebal selimut aspal (mikron)
A	2,63	2,68	2,42	0,67	4,86	31,92
B	2,63	2,68	2,42	0,66	4,88	27,10
C	2,63	2,67	2,42	0,61	4,93	42,46

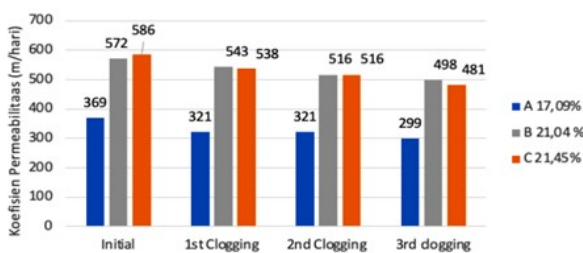
Keterangan:

- Gsb : berat jenis bulk dari agregat pembentuk beton aspal padat
 Gse : berat jenis efektif dari agregat pembentuk beton aspal padat
 Gmm : berat jenis maksimum dari beton aspal yang belum dipadatkan
 Pab : kadar aspal yang menyerap ke dalam pori butir agregat, % terhadap berat agregat
 Pae : kadar aspal efektif yang menyelimuti butir-butir agregat, % terhadap berat beton aspal padat

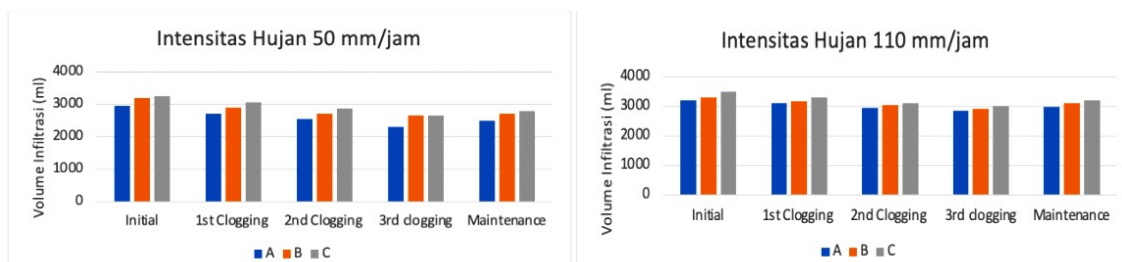


Gambar 8. Hasil pengujian Marshall

banyak sehingga dapat mengisi struktur rongga dalam campuran. Oleh sebab itu campuran A memiliki stabilitas paling tinggi diantara gradasi B dan C. Kemudian, secara berurutan gradasi C dan B tersusun atas agregat kasar dengan komposisi yang lebih tinggi dibandingkan gradasi A dan agregat halus yang semakin sedikit sehingga menghasilkan ikatan antar agregat yang lebih lemah. Hal tersebut menyebabkan penurunan stabilitas campuran.



Gambar 9. Nilai koefisien permeabilitas campuran A, B, C



Gambar 10. Volume air yang dapat dialirkan pada proses penyumbatan pori dengan intensitas hujan 50 mm/jam dan 110 mm/jam

4.7 Analisis data pengujian *rainfall simulator*

Hasil pengukuran terhadap volume air hujan yang dapat dialirkan melalui proses infiltrasi menggunakan *rainfall simulator* disajikan melalui diagram batang pada **Gambar 10**. Berdasarkan hasil pengukuran, dapat diketahui hubungan antara VIM dan kemampuan pengaliran campuran aspal porous, yaitu berbanding lurus. Dengan meningkatnya VIM campuran, semakin tinggi volume air hujan yang dapat dialirkan oleh campuran aspal porous melalui proses infiltrasi.

Simulasi penyumbatan pori dilakukan sebanyak 3 siklus dengan cara meratakan material partikulat sedimen pada permukaan benda uji sebanyak 260 g/m² pada siklus pertama, 520 g/m² pada siklus kedua, dan 760 g/m² pada siklus ketiga. Hidrograf *infiltration flow* pada simulasi penyumbatan pori dapat dilihat pada **Gambar 11** dan **Gambar 12**. Berdasarkan hidrograf, penambahan material penyumbat pori menyebabkan penurunan kapasitas infiltrasi seluruh campuran aspal porous. Dengan intensitas hujan 50 mm/jam, saat penyumbatan pori siklus pertama terjadi penurunan kapasitas infiltrasi sebesar 8%. Kemudian, siklus penyumbatan yang kedua dan ketiga juga menunjukkan tren yang sama, yaitu mengalami penurunan rata – rata sebesar 14% dan 19%.

Kemudian, ketika intensitas hujan pada pengujian *rainfall simulator* sebesar 110 mm/jam, penyumbatan pori juga menurunkan kapasitas infiltrasi campuran A, B, dan C masing – masing sebesar 4% pada siklus pertama, 9% pada siklus kedua, dan siklus ketiga sebesar 12%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, penambahan material penyumbat pori menyebabkan penurunan kinerja hidrolik aspal porous hingga 19% dalam kurun waktu 30 ADD.

Hidrograf *infiltration flow* campuran gradasi A, B, dan C pada **Gambar 11** dan **Gambar 12** menunjukkan bahwa pada menit awal pengujian, *infiltration flow* meningkat secara bertahap. Peningkatan tersebut disebabkan karena adanya tundaan antara *inflow* dan *outflow* yang merupakan waktu yang dibutuhkan air hujan untuk mengakses permukaan perkerasan aspal porous,

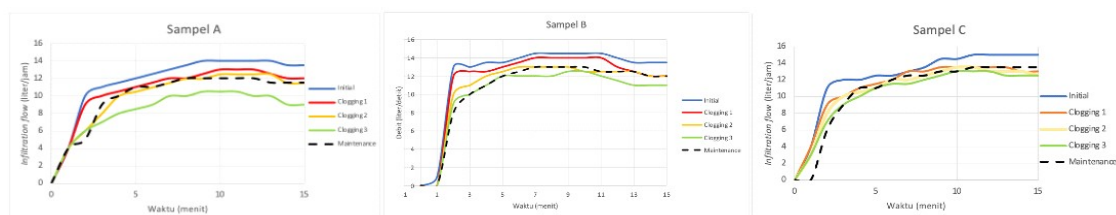
kemudian mengalir dalam pori – pori menerus, hingga mencapai titik outlet dan mengalir sebagai *outflow* (Alsuhbi dkk., 2017).

Mulai menit ketiga *infiltration flow* cenderung stabil. Perubahan *infiltration flow* tetap masih ada, namun tidak signifikan. Dalam fase ini, *flow* intensitas hujan yang mengalir pada benda uji mencapai nilai maksimum. Fenomena ini menunjukkan bahwa saat menit awal air hujan mengisi pori – pori menerus aspal porous dan mengalir melalui outlet setelah aspal porous mencapai kondisi jenuh (*saturated*). Kondisi jenuh adalah kondisi ketika seluruh pori – pori menerus dalam campuran terisi air sehingga *outflow* mengalir secara stabil (Afonso dkk., 2018).

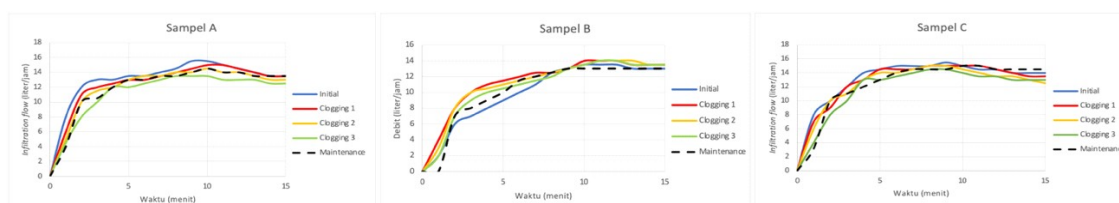
Sesuai dengan hasil pengujian, intensitas hujan berpengaruh terhadap kapasitas infiltrasi aspal porous. Hal ini ditunjukkan dengan adanya peningkatan volume air yang dapat mengalir dalam aspal porous seiring meningkatnya nilai intensitas hujan. Kejadian tersebut disebabkan karena terdapat proses pembersihan penyumbatan pori ketika hujan turun dengan intensitas tinggi. Dengan membandingkan antara **Gambar 11** dan **Gambar 12**, dapat dilihat bahwa intensitas hujan ekstrim 110 mm/jam mengembalikan kemampuan pengaliran air ketiga campuran rata – rata sebesar 11%. Sehingga dapat dikatakan bahwa intensitas hujan tinggi membantu pembersihan sedimen penyumbat pori namun tidak signifikan.

Pada kondisi normal, yaitu sebelum terjadi penyumbatan pori, campuran A, B, dan C mampu mengalirkan seluruh air hujan yang jatuh dengan intensitas 50 mm/jam maupun 110 mm/jam. Kapasitas infiltrasi seluruh campuran aspal porous mampu menampung intensitas hujan yang turun, sehingga sebelum terjadi kondisi jenuh, air hujan terinfiltrasi seluruhnya menjadi *outflow*. Oleh sebab itu, tidak terjadi limpasan permukaan perkerasan aspal porous.

Saat siklus pertama penyumbatan pori, limpasan permukaan pada campuran A, B, dan C juga tidak terjadi. Intensitas hujan 50 mm/jam maupun 110 mm/



Gambar 11. Hidrograf *infiltration flow* campuran A, B, C dengan intensitas hujan 50 mm/jam



Gambar 12. Hidrograf *infiltration flow* campuran A, B, C dengan intensitas hujan 110 mm/jam

Tabel 7. Perbandingan hasil pengujian lanjutan

Gradasi	VIM	K Permeabilitas		Cantabro Loss		Marshall
		Min. 100 m/hari	Keterangan	Maks. 20%	Keterangan	Stabilitas
A	19,60%	369	memenuhi	17,7%	memenuhi	561,83
B	22,10%	572	memenuhi	28,5%	tidak memenuhi	396,10
C	23,53%	586	memenuhi	36,8%	tidak memenuhi	457,36

jam seluruhnya dapat dialirkan menjadi *outflow*. Namun dapat dilihat pada **Gambar 11** dan **Gambar 12**, kapasitas infiltrasi masing - masing campuran mengalami penurunan dibandingkan kondisi awal sebelum terjadi penyumbatan pori. Hal yang sama juga terjadi pada saat material sedimen penyumbat pori ditambah. Saat siklus kedua dan ketiga berlangsung, campuran A, B, dan C masih memiliki kapasitas infiltrasi yang cukup baik sehingga tidak terjadi limpasan permukaan. Namun tetap terjadi penurunan kapasitas infiltrasi dibandingkan saat siklus pertama. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa penyumbatan pori berpengaruh terhadap kapasitas infiltrasi campuran aspal porous. Semakin bertambah massa *load* sedimen penyumbat pori, maka semakin tinggi penurunan kapasitas infiltrasi campuran aspal porous.

Setelah fase penyumbatan pori, benda uji dikeringkan selama empat hari lalu dilakukan simulasi *maintenance* pada permukaan aspal porous menggunakan *vaccum*. Penggunaan *vaccum* dipilih menjadi metode *maintenance* karena alat tersebut paling umum digunakan (Winston dkk., 2015). *Maintenance* dilakukan selama 1 menit untuk masing - masing benda uji berukuran 30 cm x 40 cm. Proses *maintenance* pada aspal porous memungkinkan material partikulat sedimen yang terperangkap di dalam pori bergerak keluar lapis perkerasan. Proses tersebut dapat membersihkan rongga dalam pori yang tersumbat sehingga dapat kembali mengalirkan air. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan alat *rainfall simulator*, *maintenance* menggunakan *vaccum* dapat mengembalikan kapasitas infiltrasi campuran aspal porous paling tinggi sebanyak 6% sesuai dengan data pada **Gambar 11** dan **Gambar 12**. Namun, hasil simulasi *maintenance* belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi di lapangan karena keterbatasan alat *vaccum* yang digunakan. Perlu dilakukan penyesuaian durasi pembersihan material partikulat sedimen dan spesifikasi alat *vaccum* yang digunakan agar sesuai dengan kondisi di lapangan.

4.8 Evaluasi komposisi gradasi aspal porous

Kriteria yang digunakan sebagai pertimbangan dalam mengevaluasi campuran antara lain ada tidaknya limpasan permukaan aspal porous, kapasitas infiltrasi dan permeabilitas setelah terjadi penyumbatan pori. Selain itu, sebagai pertimbangan tambahan adalah hasil pengujian *Cantabro Loss* yang menunjukkan durabilitas campuran dan pengujian Marshall meliputi parameter stabilitas.

Berdasarkan **Gambar 11** dan **Gambar 12** dapat dilihat bahwa campuran yang memiliki ketahanan paling tinggi terhadap penyumbatan pori adalah gradasi C

dengan VIM tertinggi, yaitu 23,53%. Kemudian terkait parameter limpasan permukaan, pada benda uji campuran A, B, dan C tidak terjadi limpasan permukaan, baik pada saat kondisi sebelum maupun sesudah terjadi penyumbatan pori. Oleh sebab itu, sebagai bahan pertimbangan lanjutan untuk mengevaluasi gradasi digunakan hasil pengujian permeabilitas, *Cantabro*, dan Marshall sesuai **Tabel 7**.

Apabila ditinjau dari koefisien permeabilitas, gradasi C menghasilkan campuran dengan kemampuan untuk meloloskan air paling baik. Selain itu, setelah mengalami penyumbatan pori dengan *load* sedimen ketiga, koefisien permeabilitas gradasi C juga masih memenuhi syarat minimum 100 mm/hari. Selanjutnya, terkait dengan durabilitas, hanya campuran A yang memenuhi spesifikasi. Begitu juga dengan hasil uji Marshall, gradasi A memiliki stabilitas paling baik diantara gradasi B dan C. Hal ini disebabkan karena gradasi A menghasilkan proporsi agregat yang tepat sehingga memiliki ikatan antar agregat dan bahan pengikat yang baik.

Berdasarkan penjelasan di atas, di antara ketiga desain campuran aspal porous, gradasi C menghasilkan kinerja fungsional paling baik, namun stabilitasnya rendah serta tidak memenuhi spesifikasi ketahanan terhadap abrasi. Dari aspek fungsional, gradasi A menghasilkan campuran aspal porous dengan ketahanan terhadap penyumbatan pori tidak sebaik campuran B dan C. Namun, dari aspek mekanis memiliki stabilitas paling baik serta memenuhi spesifikasi ketahanan terhadap abrasi. Oleh sebab itu, apabila pertimbangan hanya berdasarkan kinerja fungsional, gradasi C dengan VIM 23,53% dapat dipilih. Namun apabila mempertimbangkan aspek struktural, hanya gradasi A yang memenuhi spesifikasi. Alternatif lain apabila ingin mendapatkan campuran aspal porous yang memiliki kinerja fungsional baik dan tetap menghasilkan kinerja struktural sesuai spesifikasi dapat digunakan gradasi C dengan mengganti bahan pengikat menggunakan aspal modifikasi setara kinerja (Qian dkk., 2015 dan Punith dkk., 2012).

5. Kesimpulan

1. Aspal porous dengan rongga efektif yang lebih tinggi menghasilkan infiltrasi yang lebih tinggi dan ketahanan terhadap kinerja hidrologi yang lebih baik karena memiliki kapasitas penyumbatan pori yang disimulasikan;
2. Gradasi A, B, dan C menghasilkan campuran aspal berpori dengan kapasitas infiltrasi yang cukup untuk menahan penyumbatan pori hingga beban

sedimen 780 gram/m² tanpa menyebabkan limpasan permukaan;

3. Massa sedimen berpengaruh terhadap kapasitas infiltrasi campuran aspal porous. Semakin banyak massa sedimen yang menyumbat pori, maka kapasitas infiltrasi campuran aspal porous akan semakin menurun. Kapasitas infiltrasi campuran A dengan VIM terkecil (20,67%) dapat mengalami penurunan hingga 23% ketika disimulasikan dengan beban sedimen sebesar 780 gram/m² /30 ADD;
4. Intensitas curah hujan membantu pembersihan sedimen penyumbat pori namun tidak meningkatkan kapasitas infiltrasi secara signifikan. Simulasi dengan intensitas curah hujan 110 mm/jam hanya mampu mengembalikan kemampuan aliran air dari ketiga campuran aspal berpori rata-rata sebesar 11%;
5. Di antara ketiga rancangan campuran aspal porous, campuran C memiliki ketahanan penyumbatan pori yang paling baik terhadap beban sedimen yang disimulasikan. Profil gradasi C memiliki persen lolos agregat kasar mendekati batas atas kurva gradasi dan persen lolos agregat halus mendekati batas bawah.
6. Gradasi yang menghasilkan VIM tinggi didesain dengan koefisien keseragaman (Cu) yang rendah.
7. Asbuton murni menghasilkan campuran aspal porous dengan kehilangan abrasi yang tinggi karena daya lekatnya tidak cukup kuat untuk digunakan pada campuran dengan rongga udara yang tinggi. Oleh karena itu, lebih baik digunakan aspal yang dimodifikasi sebagai bahan pengikat campuran aspal porous.

Daftar Pustaka

- Abudi, I., Carmi, G., & Berliner, P. R. (2012). *Rainfall simulator for field runoff studies*. Journal of Hydrology, 76 - 81.
- Affandi. (2012). *Properties of Bituminous Mixes Using Indonesia Natural Asphalt*. ARRB Conference.
- Afonso, M. L., Fael, C. S., & Almeida, M. D. (2018). *Influence of clogging on the hydrologic performance of a double layer porous asphalt*. International Journal of Pavement Engineering, 736 - 745.
- Alsubih, M., Arthur, S., Wright, G., & Allen, D. (2017). *Experimental study on the hydrological performance of a permeable pavement*. Urban Water Journal, 14, 427 - 434.
- American Society for Testing and Materials. (1994). *ASTM D 3202-94 Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures*. Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (1999). *ASTM D 6390-99 Standard Test Method for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures*. Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM D7064/D7064M-08 Standard Practice for Open-Graded Friction Courses (OGFC) Design Mix*. Pennsylvania.
- Chopra, M., Kakuturu, S., Ballock, C., & Spence, J. (2010). *Effect of Rejuvenation Methods on the Infiltration Rates of Pervious Concrete Pavements*. Journal of Hydrologic Engineering, 15(6).
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
- Sihombing, A. V., Subagio, B. S., Hariyadi, E. S., & Yamin, A. (2021). *Chemical, morphological, and high temperature rheological behaviour of Bioasbuton as an alternative binder for asphalt concrete in Indonesia*. Journal of King Saud University.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design (Vol. 2)*. Pearson Prentice Hall.
- Khursheed, A., Firdous, S. E., & Aiman, E. (2018). *A Study on Effects of Saturation on Soil Subgrade Strength: A Review*. International Journal of Scientific Development and Research, 3(5).
- Koohmishi, M., & Shafabakhsh, G. (2018). *Drainage potential of reservoir course of porous pavement for various particle size distributions of aggregate*. Transportation Geotechnics, 16, 63 - 75.
- Lim, E., Tan, K. H., & Fwa, T. F. (2015). *Comparison of Permeability and Clogging Characteristics of Porous Asphalt and Pervious Concrete Pavement Materials*. Journal of the Transportation Research Board, 2511, 72 - 80.
- Matteo Brugin, M. M.-V. (2017). *Clogging Potential Evaluation of Porous Mixtures Surfaces Used in Permeable Pavement System*. European Journal of Environmental and Civil engineering.
- Ming Fai Chow, Z. Y. (2013). *Relationship between sediment build-up characteristics and antecedent dry days on different urban road surfaces in Malaysia*. Urban Water Journal, 12(3), 240 - 247.
- Muhammed, A. J., Qasim, Z. I., & A, R. H. (2022). *Modifying the Properties of Open-Graded Friction Course by Adding Cellulose Fiber*. Engineering and Technology Journal, 40(11), 1365 - 1375.
- Nnadi, E. O., Coupe, S. J., & Sañudo-Fontaneda, L. A. (2014). *An Evaluation of Enhanced Geotextile Layer in Permeable Pavement to Improve Stormwater Infiltration and Attenuation*.

International Journal of Pavement Engineering, 925-932.

- Peng, L., Ren, S., & Xueyan, L. (2023). *Effects of Bitumen Thickness on the Aging Behavior of High-Content Polymer-Modified Asphalt Mixture*. Polymers 2023, 15.
- Punith, V. S., Suresha, S. N., Raju, S., Bose, S., & Veeraragavan. (2012). *Laboratory Investigation of Open-Graded Friction-Course Mixtures Containing Polymers and Cellulose Fibers*. Journal of Transportation Engineering, 138(1), 67 - 74.
- Qian, Z., & Lu , Q. (2015). *Design and laboratory evaluation of small particle porous epoxy asphalt surface mixture for roadway pavements* Author links open overlay panel. Construction and Building Materials, 77, 110 - 116.
- Winston, R. J., Al-Rubaei, A. M., Blecken, T. G., & Viklander, M. (2015). *Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate e The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling*. Journal of Environmental Management, 169, 132 - 144.
- Yang, B., Li, H., Zhang, H., Xie, N., & Zhou, H. (2019). *Laboratorial investigation on effects of microscopic void characteristics on properties of porous asphalt mixture*. Construction and Building Materials, 213, 434 - 446.
- Yilmaz, A., & Sargin, S. (2012). *Water Effect on Deteriorations of Asphalt Pavements*. The Online Journal of Science and Technology, 2 (1).