

KINERJA PERKERASAN ASPAL BERPORI DENGAN CAMPURAN LIMBAH PLASTIK DAN KARET (THE PERFORMANCE OF POROUS ASPHALT PAVEMENT USING RUBBER AND PLASTIC WASTE)

Hery Awan Susanto¹⁾, Bagyo Mulyono²⁾, Arnie Widyaningrum³⁾, Widhiatmoko Herry Purnomo⁴⁾

^{1),2),3),4)}Universitas Jenderal Soedirman

^{1),2),3),4)}Jl. Raya Mayjen Sungkono No. KM 5, Dusun 2, Blater, Jawa Tengah 53371

¹⁾hery.susanto@unsoed.ac.id, ²⁾bagyo.mulyono@unsoed.ac.id, ³⁾arnie.widyaningrumi@unsoed.ac.id,

⁴⁾widhiatmoko.purnomo@unsoed.ac.id

Diterima: 10 Januari 2023 ; direvisi: 31 Maret 2023; disetujui: 14 April 2023.

ABSTRAK

Salah satu upaya penanganan dampak perubahan iklim adalah penerapan konstruksi campuran aspal berpori pada perkerasan jalan. Penggunaan campuran aspal berpori masih terbatas karena kinerjanya yang masih rendah dibandingkan konstruksi campuran aspal pada umumnya. Kajian secara komprehensif untuk meningkatkan kinerja campuran agar optimal dilakukan dalam rangka penggunaan yang lebih luas. Penelitian bertujuan untuk mengetahui kinerja campuran aspal berpori dengan menggunakan limbah plastik dan ban bekas yang dicampur ke dalam aspal melalui pengujian laboratorium (baik dalam kondisi kering dan basah) sesuai dengan AAPA 2004, Indirect Tensile Strength (ITS) (dalam kondisi kering dan basah), ravelling, dan permeabilitas diperoleh dengan variasi kadar limbah plastik dan ban bekas 1-3%. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa terjadi peningkatan kinerja Marshall, ketahanan terhadap retak, ravelling (berdasarkan uji abrasi) pada campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan ban bekas. Campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan ban bekas 2% menunjukkan tingkat durabilitas yang baik yang ditunjukkan oleh nilai Indeks Kekuatan Sisa (IKS) sedangkan tingkat keawetan yang baik yang diperoleh dari nilai Tensile Strength Ratio (TSR) pada semua kadar limbah plastik dan ban bekas. Dari nilai porositas dan ketahanan terhadap kelembaban, hasil menunjukkan penurunan tingkat porositas dan ketahanan kelembaban. Penurunan yang terjadi tersebut pada kadar limbah plastik dan ban bekas 2% tidak terlalu tinggi antara sampel kondisi kering dan basah. Hasil penelitian ini merekomendasikan penambahan limbah plastik dan ban bekas sebesar 2% dapat menghasilkan campuran aspal pori yang berkualitas baik.

Kata Kunci: campuran aspal berpori, limbah, Marshall, ITS, ravelling, permeabilitas.

ABSTRACT

One of the measures to mitigate climate change is to apply a porous asphalt mixture in pavement construction. The use of porous asphalt mixture is still limited, because of low performance compared to some other asphalt mixtures. A comprehensive study to improve the optimal performance necessary to problems improve the application. This research aims to determine the performance of porous asphalt using plastic and used tires waste mixed into asphalts by using some laboratory testings (both in dry and in wet conditions) according to AAPA 2004. Indirect Tensile Strength (ITS) (both in dry and wet conditions), ravelling, and permeability are obtained with variations plastic and used tires waste levels of 1-3%. There is an increase in Marshall performance, resistance to cracking, ravelling (based on abrasion test) on porous asphalt mixtures with plastic and used tires waste. A porous asphalt mixture with 2% of plastic and used tires waste has produced a good level of durability indicated by the Residual Strength Index (IKS) value and from the Tensile Strength Ratio (TSR) value at all levels of plastic and used tires waste. From the value of porosity and moisture resistance, a decrease in the level of porosity and moisture resistance are shown. The decrease that occurred at 2% plastic and used tires waste level was not too high between dry and wet condition samples. The results of this study recommend that the addition of plastic and used tires waste at 2% can produce a good quality of porous asphalt mixture.

Key words: permeable asphalt mixture, waste, Marshall, ITS, ravelling, permeability.

PENDAHULUAN

Teknologi konstruksi jalan terus berkembang untuk memberikan solusi terhadap beberapa tantangan yang dapat berakibat terhadap penurunan kinerja jalan. Beberapa tantangan tersebut dapat muncul yang diakibatkan oleh kondisi cuaca, beban kendaraan, dan ketersediaan material alam yang digunakan untuk pembuatan konstruksi jalan. Di sisi yang lain tuntutan kondisi jalan harus dapat terpenuhi yaitu konstruksi jalan yang kuat, aman, nyaman, dan ekonomis untuk menjamin pergerakan kendaraan. Sementara itu kondisi jalan yang tergenang air, tingkat kekesatan rendah dan memberikan efek kebisingan masih sering kita jumpai di Indonesia. Kondisi jalan yang tergenang air, tingkat kekesatan dan kebisingan yang tinggi dapat mengganggu kenyamanan dan berbahaya untuk keselamatan pengemudi. Salah satu jenis teknologi konstruksi jalan yang dapat mengurangi masalah tersebut adalah konstruksi perkerasan berpori (Ramadhan dan Purwo 2016).

Perkerasan berpori adalah konstruksi jalan dengan dominansi agregat kasar dan sedikit agregat halus sehingga didapatkan rongga yang cukup tinggi. Kadar rongga yang tinggi berhubungan dengan nilai permeabilitas campuran aspal berpori yang tinggi pula. Kemampuan permeabilitas yang tinggi dapat dimanfaatkan sebagai sistem saluran drainase bawah permukaan (*subsurface drain*) (Sarwono dan Wardhani 2007). Dari susunan agregat yang digunakan campuran aspal berpori termasuk ke dalam jenis gradasi terbuka (*open graded*) sehingga memiliki kekakuan struktur yang tidak terlalu tinggi. Kelebihan yang dimiliki oleh campuran aspal berpori diantaranya adalah mampu meningkatkan keselamatan kendaraan akibat terjadinya *aquaplaning* dan dapat menurunkan tingkat kebisingan (Ali dkk. 2013). Menurut beberapa penelitian terdahulu campuran aspal berpori memiliki nilai stabilitas *Marshall* yang lebih kecil jika dibandingkan campuran aspal bergradasi rapat (Martina, Hasan dan Setiawan 2019). Beberapa upaya perlu dilakukan dalam rangka mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya material alami, meningkatkan kekuatan mekanis, dan ekonomis campuran aspal berpori. Salah satunya adalah penggunaan material limbah secara bersamaan dalam campuran aspal berpori.

Dalam penelitian ini digunakan limbah yang terdiri dari kombinasi limbah plastik dan ban bekas. Pemilihan limbah tersebut dikarenakan potensi limbah plastik dan ban bekas yang cukup banyak di Indonesia. Proses penguraian kedua limbah tersebut juga sulit jika dibiarkan bertumpuk di atas tanah. Sementara itu jika dilakukan pembakaran limbah plastik dan ban bekas berdampak pada polusi udara. Oleh sebab itu perlu upaya untuk menggunakan limbah plastik dan ban bekas sebagai material aditif campuran beraspal dalam rangka mencari solusi terhadap keterbatasan material alami, upaya peningkatan kualitas campuran, dan ekonomis serta penyelesaian masalah lingkungan.

Beberapa penelitian tentang pemanfaatan limbah dalam konstruksi jalan dapat dikategorikan ke dalam dua kelompok. Kelompok pertama meneliti tentang penggunaan limbah plastik dalam campuran aspal berpori (Ramadhan 2016; Nashir 2013; Supriyadi, Rahardjo dan Pranoto 2018; Ismayalomi dkk. 2019; Erita Guswandi dan Lizar 2019) dan kedua adalah limbah ban bekas dalam campuran aspal berpori (Martina, Hasan dan Setiawan 2019; Anam dan Pratikno 2018).

Penggunaan plastik dalam campuran aspal berpori dapat meningkatkan stabilitas 7,4 % dan MQ 61,2%, sedangkan *flow* dan permeabilitas mengalami penurunan (Ramadhan, 2017). Dalam penelitian yang lain menyatakan bahwa penambahan limbah serat plastik dapat menghasilkan campuran yang memenuhi kriteria campuran aspal berpori (Nashir, 2013). Peneliti yang lain juga melaporkan bahwa stabilitas campuran aspal berpori mengalami peningkatan dan *flow* juga meningkat namun VIM dan permeabilitas menurun (Supriyadi, Rahardjo dan Pranoto 2018). Pada penelitian yang lain menyampaikan bahwa terpenuhinya syarat-syarat *Marshall* dalam penambahan limbah plastik (stabilitas, *flow* dan VIM) dan ketahanan abrasi meningkat namun permeabilitas mengalami penurunan (Ismayalomi dkk., 2019). Dan menurut penelitian yang lain juga disampaikan bahwa stabilitas dan MQ meningkat tetapi VIM dan *flow* menurun akibat penggunaan limbah plastik dalam aspal berpori (Ismayalomi, Rahardjo, dan Pranoto 2019). Apabila limbah plastik dicampur dengan aspal, maka dapat memberikan dampak yang positif kepada sifat-sifat properti aspal. Untuk pengaruh terhadap campuran beraspal penggunaan limbah plastik dapat meningkatkan

stabilitas dan menurunkan *flow* (Heydari dkk., 2021).

Pada kelompok kedua meneliti tentang limbah ban bekas dalam campuran aspal berpori. Dalam penelitian ini ditemukan bahwa penambahan limbah ban bekas ke dalam aspal memenuhi spesifikasi sebagai campuran aspal berpori. Sementara itu nilai kekesatan yang memenuhi dicapai pada persentase 6% limbah ban bekas dalam campuran aspal berpori (Martina, Hasan dan Setiawan 2019). Dalam studi yang lain menunjukkan bahwa hasil campuran aspal berpori dengan limbah ban bekas memberikan hasil yang sesuai dan memenuhi kriteria campuran aspal berpori dalam Bina Marga 2018 (Anam dan Pratikno 2018). Limbah ban bekas juga merupakan material bahan tambah yang efisien karena dapat menghasilkan peningkatan kekuatan dan kekakuan campuran beraspal (Alakhali dkk., 2021).

Studi tentang pemanfaatan limbah plastik dan karet dalam campuran beraspal masih sangat terbatas jumlahnya. Bahkan aplikasinya dalam limbah campuran aspal berpori belum pernah dilakukan. Beberapa peneliti masih fokus pada pengaruh satu jenis limbah dalam campuran aspal berpori, dan belum menggunakan pengujian secara lengkap yang dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan mutu campuran aspal berpori secara komprehensif. Pengujian secara menyeluruh dapat dijadikan pertimbangan dalam menentukan usulan *mix design* campuran aspal berpori dari bahan limbah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi dalam upaya peningkatan mutu campuran dan rancangan *mix design* aspal berpori.

HIPOTESIS

Hipotesis dari penelitian ini yaitu dengan penambahan limbah plastik dan ban bekas dalam campuran aspal berpori akan meningkatkan kinerja mekanis campuran yang meliputi *Marshall*, *ITS*, *ravelling*, permeabilitas, durabilitas dan ketahanan terhadap kelembaban.

METODOLOGI

Penelitian ini termasuk jenis eksperimental dengan skala model di laboratorium. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Transportasi Fakultas Teknik Universitas Jenderal Soedirman. Beberapa

tahapan dalam penelitian ini meliputi tahap pemilihan dan pengadaan material campuran aspal modifikasi, pengujian karakteristik material, perencanaan campuran (*mix design*), pembuatan benda uji, dan pengujian benda uji yang meliputi: *Marshall*, *ITS*, *ravelling*, dan permeabilitas. Tahap selanjutnya adalah pengolahan dan analisis data, pembahasan dan kesimpulan.

Limbah Plastik dan Karet

Limbah yang digunakan dalam penelitian ini merupakan campuran plastik jenis *polyethylene terephthalate* (PET) dan ban dalam bekas kendaraan. Potensi limbah plastik dan ban bekas yang tinggi menjadi masalah lingkungan apabila tidak tertangani dengan baik. Peningkatan limbah plastik diakibatkan ketergantungan terhadap plastik yang masih tinggi. Limbah ban bekas juga tinggi yang diakibatkan peningkatan jumlah kendaraan, sehingga kebutuhan ban kendaraan juga akan mengalami peningkatan. Limbah plastik dan karet yang digunakan dalam campuran beraspal harus bersih, kering, dan memiliki tekstur yang baik. Limbah plastik dan ban bekas dipotong dan dibentuk dalam ukuran 1 cm, kemudian limbah plastik dan ban bekas ini dicampur kedalam aspal penetrasi 60/70 yang sudah dipanaskan pada temperatur 170 °C, dan dilakukan pengadukan selama 30 menit untuk memastikan campuran yang terbentuk menjadi homogen dan menyatu dengan aspal. Gambar 1 menunjukkan bentuk limbah plastik dan ban bekas.



Gambar 1. Limbah plastik dan ban bekas

Pengujian Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material yang dilakukan meliputi agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (*filler*), dan aspal. Hasil pengujian karakteristik material akan menentukan pemilihan material yang bisa digunakan dalam *mix design*. Karakteristik material yang memenuhi spesifikasi dapat digunakan dalam *mix design*, sedangkan yang tidak memenuhi diganti dengan material lain. Pemenuhan karakteristik material terhadap spesifikasi akan

menentukan kualitas campuran beraspal, meliputi: kekuatan, keawetan, dan kedap air.

Mix Design

Campuran aspal berpori yang digunakan dalam penelitian ini adalah untuk lapisan *Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC)*. Tahapan *mix design* I adalah pembuatan benda uji *Marshall* untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO). Penentuan KAO dilakukan melalui dua tahap, yaitu perhitungan KAO perkiraan dengan rumus empiris dan KAO riil yang diperoleh dari hasil pengujian *Marshall* tahap I. Pada tahapan penentuan KAO aspal yang digunakan adalah aspal pen 60/70 tanpa limbah. Tahap *mix design* II adalah pembuatan benda uji untuk pengujian karakteristik *Marshall*, ITS, *ravelling*, dan permeabilitas. Dalam tahapan ini aspal pen 60/70 dicampur dengan limbah plastik dan karet.

Variasi persentase kadar limbah plastik dan karet yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1%, 2%, 3% terhadap kadar aspal dalam campuran. Dalam variasi persentase tersebut kontribusi komposisi limbah plastik dan karet masing-masing 50%. Penentuan rentang variasi kadar limbah plastik dan karet dilakukan dengan cara trial and error dengan melihat pemenuhan spesifikasi hasil pengujian aspal polimer. Pencampuran limbah plastik dan karet ke dalam campuran aspal berpori dilakukan dengan metode basah, yaitu dengan mencampur limbah plastik dan karet ke dalam aspal panas sampai campuran terlihat menyatu secara visual. Metode ini dipilih agar campuran aspal berpori modifikasi yang dihasilkan memiliki kualitas campuran yang baik.

Campuran Aspal Berpori

Campuran aspal berpori merupakan salah satu jenis campuran aspal yang dikembangkan untuk menurunkan temperatur permukaan jalan dan kemampuan untuk mengurangi genangan air dipermukaan jalan. Campuran aspal berpori menggunakan tipe gradasi terbuka, sehingga memiliki pori yang tinggi. Dengan pori yang tinggi, maka campuran aspal berpori memiliki tingkat permeabilitas yang tinggi pula yang berfungsi untuk mengalirkan air limpasan permukaan ke dalam sistem saluran drainase.

Aplikasi campuran aspal berpori sebagai lapisan permukaan jalan jenis AC-WC biasanya untuk melayani beban lalu lintas rendah dan sedang. Kemampuan campuran aspal berpori untuk menahan beban lalu lintas

tinggi masih perlu dilakukan kajian lebih mendalam. Salah satu upaya yang bisa dilakukan adalah melakukan modifikasi campuran aspal berpori dengan bahan polimer. Untuk meningkatkan nilai ekonomis pemilihan bahan polimer bisa menggunakan limbah plastik dan ban bekas secara bersama-sama. Persentase limbah terdiri dari 50% limbah plastik dan 50% limbah ban bekas.

AC-WC adalah Hot Mix Asphalt (HMA) yang proses pencampuran materialnya dilakukan pada suhu 145-155°C. (Sukirman, 2016). AC-WC merupakan lapisan perkerasan lentur yang paling atas dan bersentuhan langsung dengan beban kendaraan dan lingkungan jalan. Oleh karena itu AC-WC selain harus kuat menahan beban dan aus juga harus kedap air serta tidak cepat rusak akibat faktor cuaca panas dan curah hujan.

Perencanaan campuran aspal berpori meliputi perencanaan gradasi agregat sesuai dengan standar yang dipakai yaitu gradasi aspal berpori menurut NCHRP 49 (1987) dalam Tabel 1 dan spesifikasi karakteristik campuran aspal berpori menurut AAPA di dalam Tabel 2.

Tabel 1. Gradasi NCHRP 49

Ukuran Ayakan	Persen Lolos
1/2 in. (12,5 mm)	100
3/8 in. (9,5 mm)	95-100
No. 4 (4,75 mm)	30-50
No. 8 (2,36 mm)	5-15
No. 200 (75 µm)	2-5

Tabel 2. Spesifikasi Campuran Aspal Berpori

No.	Kriteria Perencanaan	Nilai
1	Stabilitas <i>Marshall</i> (kg)	Min. 500
2	Kelelehan <i>Marshall</i> (mm)	2 – 6
3	Kekakuan <i>Marshall</i> (MQ kg/mm)	Maks. 400
4	Kadar Rongga Udara (VIM %)	18 – 25
5	Jumlah Tumbukan Perbidang	50
6	Permeabilitas (cm/detik)	Min. 0,1

Sumber: (Australian Asphalt Pavement Association, 2004)

Pengujian Marshall

Untuk menentukan kemampuan dalam menerima beban (daya dukung), deformasi, dan kadar rongga campuran aspal berpori dilakukan melalui pengujian *Marshall*. SNI 06-2489-1991. Pengujian *Marshall* menggunakan prinsip pembebanan vertikal yang dilengkapi dengan proving ring berkapasitas 22,2 KN untuk

mengukur stabilitas dan *flowmeter* untuk mengukur nilai *flow*. Sedangkan kadar rongga ditentukan melalui perhitungan volumetrik sampel *Marshall* yang berbentuk silinder dengan diameter 10,2 cm dan tinggi 7,6 cm. Gambar 2 menunjukkan alat pengujian *Marshall*.



Gambar 2. Alat pengujian *Marshall*.

Nilai stabilitas yang diperoleh dari pengujian *Marshall* menunjukkan kemampuan campuran aspal berpori dalam menerima beban kendaraan. Semakin tinggi nilai stabilitas maka campuran aspal berpori yang dibuat semakin baik mutunya. Nilai *flow* menunjukkan deformasi vertikal yang dapat dikategorikan jika nilai *flow* kecil mampu meredam lendutan, sebaliknya jika *flow* besar berarti lendutanya semakin tinggi. Lendutan yang kecil menunjukkan mutu campuran aspal berpori yang semakin baik, demikian pula sebaliknya. Untuk kadar rongga harus memenuhi syarat ketentuan sebagai campuran aspal berpori yaitu berkisar antar 18-25% (AAPA 2004).

Untuk melihat pengaruh kelembaban akibat faktor air dalam lapisan campuran aspal berpori, maka selain dilakukan pengujian *Marshall* pada sampel dalam keadaan kering juga terhadap sampel keadaan basah. Sesuai dengan standar pengujian *Marshall* untuk pengujian sampel kering dan terendam temperatur yang digunakan adalah 60 °C. Pengujian rendaman pada penelitian ini dilakukan untuk periode pendek, yaitu selama 24 jam. Campuran aspal berpori yang baik tentu memiliki ketahanan terhadap kelembaban yang tinggi.

Dalam pengujian *Marshall* dengan rendaman dilakukan analisis stabilitas untuk mengetahui durabilitas/keawetan campuran dengan menentukan Indeks Kekuatan Sisa (IKS). IKS dapat dihitung dengan Persamaan 1 sebagai berikut:

$$IKS = \frac{Sw_1}{Sw_2} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

dengan:

- IKS = indeks kekuatan sisa
- Sw₁ = stabilitas rata-rata sampel terendam selama 30 menit
- Sw₂ = stabilitas rata-rata sampel terendam selama 24 jam
- IKS yang disyaratkan harus ≥ 75% sebagai batas kerusakan yang ditimbulkan oleh air.

Pengujian ITS

Campuran aspal juga rentan terhadap kerusakan retak (*cracking*). Untuk mengetahui seberapa besar potensi retak yang terjadi pada campuran aspal berpori dilakukan dengan pengujian *indirect tensile strength* (ITS). Prinsip pengujian ITS adalah pembebanan tekan yang menciptakan tegangan tarik pada benda uji silinder. Pengujian ITS menggunakan alat *Marshall* dengan modifikasi pada proving ring untuk pengujian sampel silinder.

Perhitungan nilai kuat tarik tidak langsung menggunakan Persamaan 2 sebagai berikut:

$$ITS = \frac{2 \times p}{\pi \times d \times h} \dots \dots \dots (2)$$

dengan:

- ITS = kuat tarik tidak langsung (N/mm²)
- p = stabilitas (N)
- h = tinggi sampel (mm)
- d = diameter sampel (mm)

campuran dengan nilai kuat tarik tinggi menunjukkan kemampuan menahan retakan, sehingga campuran aspal berpori memiliki mutu yang baik.

Dalam pengujian ITS juga dilakukan analisis *tensile strength ratio* (TSR), yaitu perbandingan nilai kuat tarik sampel kondisi kering dan basah. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh rendaman terhadap kekuatan tarik. Nilai TSR diperoleh melalui persamaan 3 sebagai berikut:

$$TSR = \frac{ITS_d}{ITS_w} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

dengan:

- TSR = indeks kuat tarik tidak langsung
- ITS_d = kuat tarik kondisi kering (kg/cm²)
- ITS_w = kuat tarik kondisi basah (kg/cm²)
- Asphalt institute mensyaratkan nilai TSR ≥ 80%.

Pengujian *Ravelling*

Kerusakan *ravelling* sering disebabkan akibatnya lepasnya butiran pada lapisan perkerasan jalan. Beberapa penyebab terjadinya *ravelling* karena gesekan laju roda kendaraan yang terjadi secara berulang, lemahnya ikatan material penyusun campuran beraspal, dan perubahan cuaca. Perlu dilakukan pengujian yang tepat untuk bisa memperkirakan terjadinya *ravelling* di laboratorium. Beberapa peneliti

menggunakan metode cantabro untuk menguji abrasi di laboratorium (Winayati, Hendri dan Alfian 2018).

Pemodelan yang tepat dalam pengujian akan memberikan hasil yang mendekati dengan fenomena di lapangan. Pengujian dengan alat abrasi modifikasi perkerasan jalan memodelkan ketahanan perkerasan aspal menahan gesekan antara roda kendaraan dengan permukaan jalan. Dalam alat ini beban berputar dengan kecepatan tertentu dan kondisi perlakuan terhadap beban dalam kondisi kering dan terendam air. Dalam pengujian *ravelling* ini perlu dipertimbangkan beberapa variabel beban roda, waktu putaran, dan kecepatan mesin pemutarnya (Susanto, Yang and Chou 2019). Gambar 3 menunjukkan alat abrasi modifikasi perkerasan jalan yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3. Alat uji *ravelling*.

Selanjutnya nilai abrasi hasil pengujian dapat ditentukan melalui Persamaan 4 sebagai berikut:

$$\text{Nilai keausan} = \frac{A-B}{L} \dots\dots\dots (4)$$

dengan:

- A : berat benda uji semula (gr)
- B : berat benda uji setelah di uji (gr)
- L : luas area (Cm²)

Pengujian Permeabilitas

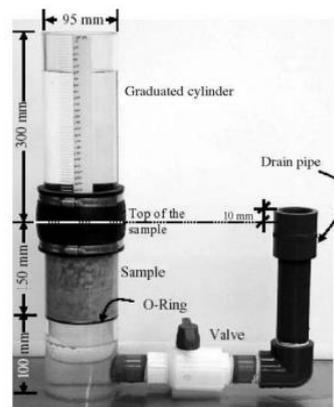
Permeabilitas perkerasan jalan adalah kemampuan lapisan perkerasan dalam meloloskan air. Untuk bisa dikatakan sebagai konstruksi perkerasan berpori, maka harus dipenuhi syarat nilai permeabilitas sesuai dengan spesifikasi. Permeabilitas perkerasan jalan dapat diukur menggunakan alat falling head. Gambar 4 menunjukkan bentuk alat uji permeabilitas falling head. Nilai koefisien

permeabilitas umumnya dinyatakan dengan notasi k. Untuk menghitung koefisien permeabilitas dapat digunakan Persamaan 5 sebagai berikut.

$$K = 2,303 \times \frac{a \times L}{A \times t} \times \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

dengan:

- K = koefisien permeabilitas (cm/s)
- a = luas potongan melintang tabung (cm²)
- L = tebal spesimen (cm)
- A = luas potongan spesimen (cm²)
- T = waktu yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari h₁ ke h₂ (s)
- h₁ = tinggi batas air paling atas pada tabung (cm)
- h₂ = tinggi batas air paling bawah pada tabung (cm)



Gambar 4. Alat Uji Permeabilitas

HASIL DAN ANALISIS

Hasil Pengujian Material

A. Agregat

Hasil dari pengujian material yang terdiri dari pengujian agregat halus, agregat kasar, filler dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 3. Hasil pengujian agregat kasar

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Abrasi dengan mesin Los Angeles (%)	100 Putaran	3 Maks. 8
Berat jenis bulk (gr/cc)	2,8	>2,5
Berat jenis SSD (gr/cc)	2,84	>2,5
Berat jenis apparent (gr/cc)	2,92	>2,5
Penyerapan (%)	1,49	<3
Kelekatan agregat terhadap aspal (%)	100	Min. 95

Tabel 4. Hasil pengujian agregat halus

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Berat jenis bulk (gr/cc)	2,61	>2,5
Berat jenis SSD (gr/cc)	2,64	>2,5
Berat jenis apparent (gr/cc)	2,69	>2,5
Penyerapan (%)	1,13	<3
Material lolos ayakan no.200 (%)	8,91	Maks. 10%

Tabel 5. Hasil pengujian filler

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Berat jenis	2,40	2,25-2,7
Filler lolos ayakan No.200	81,30	>75%

Terlihat bahwa seluruh persyaratan fisik agregat yang akan digunakan dalam campuran aspal berpori telah memenuhi spesifikasi yang ditentukan.

B. Aspal

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini yaitu aspal penetrasi 60/70. Hasil pengujian karakteristik aspal dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengujian aspal

Pemeriksaan aspal	Hasil	Syarat
Penetrasi pada 25° (0,1 mm)	68,7	60-70
Titik Lembek (°C)	56,5	≥ 48
Daktilitas pada 25°C (cm)	117,2	≥ 100
Titik Nyala (°C)	240,6	≥ 232
Viskositas Kinematis (cSt)	1302,7	≥ 300
Berat Jenis	1,144	≥ 1,0

Dari hasil pengujian sifat fisik aspal maka didapatkan bahwa aspal pen 60/70 memenuhi spesifikasi yang ada, sehingga dapat digunakan dalam campuran aspal berpori.

Hasil pengujian kadar aspal optimum (KAO)

Penentuan KAO dimulai dari perhitungan KAO perkiraan. Dari perhitungan diperoleh Pbe 5,5%. Selanjutnya dibuat sampel dengan variasi kadar aspal menggunakan rentang 4,5%; 5%; 5,5%; 6%; dan 6,5%. Masing-masing variasi kadar aspal dibuat 3 sampel *Marshall*. Penentuan KAO yang sebenarnya atau KAO riil dilakukan dengan menganalisis parameter *Marshall* untuk masing-masing variasi kadar aspal. Hasil analisis penentuan Pbr terlihat dalam Tabel 7.

Tabel 7. Hasil pengujian *Marshall* untuk KAO

Paramete r <i>Marshall</i>	Syarat	Kadar aspal				
		4%	4,5%	5%	5,5%	6%
Stabilitas	> 500	447	477	492	551	541
Flow	2-6	4,5	4,0	3,6	3,3	3,4
MQ	< 400	100	123	139	168	162
VIM	18-25	22	21	20	19	17
VMA	-	28,3	28,4	28,7	28,9	29,2
VFA	-	24	27	30	33	35
Density	-	1,942	1,949	1,952	1,956	1,959
KAO		5,5 %				

Satuan: stabilitas (kg); flow(mm); MQ (kg/mm); VIM, VMA, VFA (%); density (g/cm³)

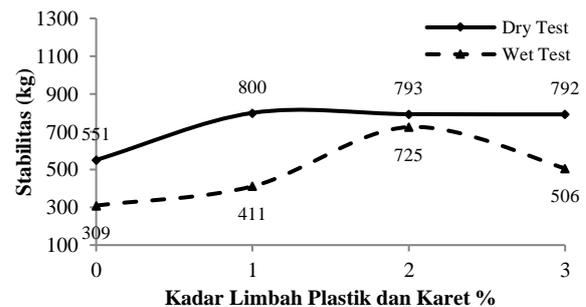
Dari Tabel 7 terlihat bahwa yang memenuhi syarat parameter *Marshall* secara keseluruhan hanya pada kadar aspal 5,5%. Sehingga diambil KAO untuk pengujian *Marshall* tahap II sebesar 5,5%.

Hasil pengujian *Marshall*

Hasil pengujian *Marshall* menggambarkan perbandingan benda uji dalam kondisi kering dan basah. Proses perendaman selama 24 jam dilakukan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang diakibatkan oleh air pada perkerasan jalan.

A. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan suatu perkerasan dalam menerima beban sampai terjadinya kelelahan. Nilai stabilitas yang didapatkan dalam setiap kadar limbah plastik dan karet dalam aspal dapat dilihat pada Gambar 5.

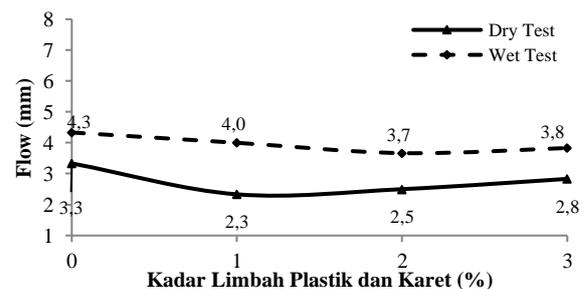


Gambar 5. Grafik stabilitas pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Berdasarkan Spesifikasi AAPA 2004, persyaratan untuk nilai stabilitas pada campuran laston (AC) aspal berpori minimum 500 kg. Dalam kondisi kering baik campuran aspal berpori non dan limbah plastik dan karet memenuhi persyaratan nilai stabilitas, namun pada kondisi basah yang memenuhi nilai stabilitas hanya pada kadar 2-3% limbah plastik dan karet.

B. Flow

Flow menunjukkan besarnya deformasi pada lapisan perkerasan akibat pembebanan vertikal. Flow diperoleh dari pembacaan arloji pada saat pengujian *Marshall*. Nilai flow dapat dilihat pada Gambar 6.

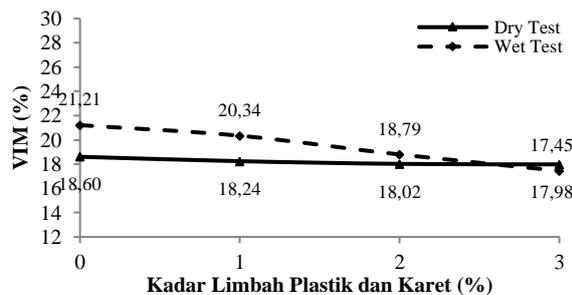


Gambar 6. Grafik flow pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Nilai *flow* yang disyaratkan dalam AAPA 2004 untuk campuran aspal berpori yaitu 2-6 mm, sehingga semua campuran aspal berpori baik dalam kondisi kering maupun basah telah memenuhi spesifikasi.

C. VIM (Void in the Mix)

Nilai VIM merupakan persentase banyaknya rongga dalam campuran aspal. Nilai VIM mempengaruhi nilai durabilitas, semakin besar nilai VIM maka campuran aspal bersifat keropos dan menyebabkan udara dan air mudah masuk kedalam lapis perkerasan. Nilai VIM dapat dilihat pada Gambar 7.

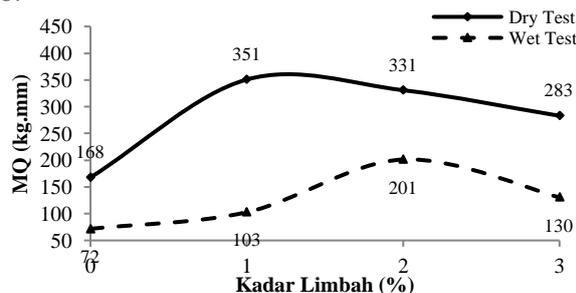


Gambar 7. Grafik VIM pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Syarat untuk nilai VIM menurut AAPA 2004 untuk aspal berpori berkisar antara 18-25% sehingga campuran ini memenuhi spesifikasi. Hasil pengujian menunjukkan semua campuran aspal berpori baik dalam kondisi kering maupun basah telah memenuhi spesifikasi.

D. MQ (Marshall Quotient)

Nilai MQ merupakan rasio dari stabilitas terhadap *flow*. Nilai MQ akan memberikan nilai fleksibilitas suatu campuran. Semakin besar nilai MQ maka campuran semakin kaku, sebaliknya jika nilai MQ semakin kecil maka resiko kerusakan yang terjadi adalah retak permukaan dan pergerakan horizontal pada arah perjalanan. Nilai MQ dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik MQ pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Pada Gambar 8 terlihat bahwa semua campuran dengan berbagai variasi penggunaan limbah plastik dan karet memenuhi syarat spesifikasi yaitu kurang dari 400 kg/mm.

E. IKS

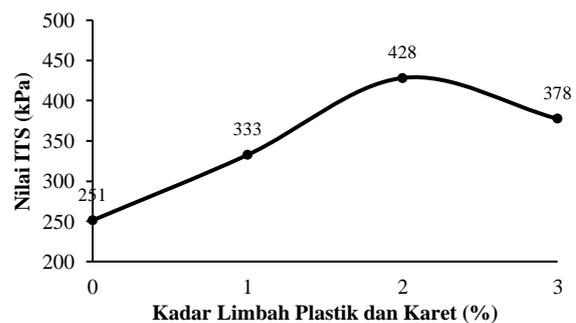
Nilai IKS terlihat dalam Tabel 8. Dalam Tabel 8 nilai IKS yang memenuhi syarat yaitu pada kadar limbah plastik dan karet 2% sebesar 91,39%. Sedangkan pada kadar limbah plastik dan karet 0%, 1%, dan 3% nilainya dibawah 75%, sehingga tidak memenuhi syarat spesifikasi yang ada.

Tabel 8. Nilai IKS pada berbagai variasi limbah plastik dan karet

Kadar Limbah plastik dan karet (%)	Stabilitas (Kg)		IRS (%)
	0,5 jam (<i>kering</i>)	24 jam (<i>basah</i>)	
0%	550,74	308,93	56,09
1%	799,73	411,18	51,42
2%	793,02	724,76	91,39
3%	791,88	506,05	63,91

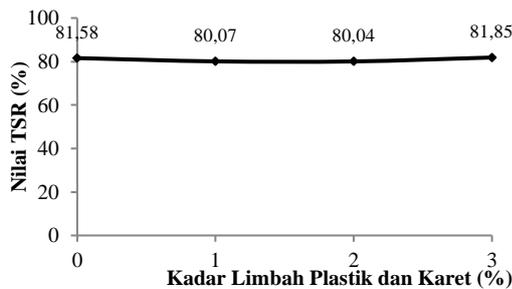
Hasil Pengujian ITS

Pada Gambar 9 menjelaskan hasil pengujian kuat tarik campuran aspal berpori non dan limbah plastik dan karet. Pada kadar limbah plastik dan karet 2% terlihat kuat tarik sebesar 428 kPa (tertinggi) lebih tinggi dari kadar plastik dan karet 1% dan 3% dan campuran nonlimbah.



Gambar 9. Grafik ITS pada variasi kadar limbah plastik dan karet

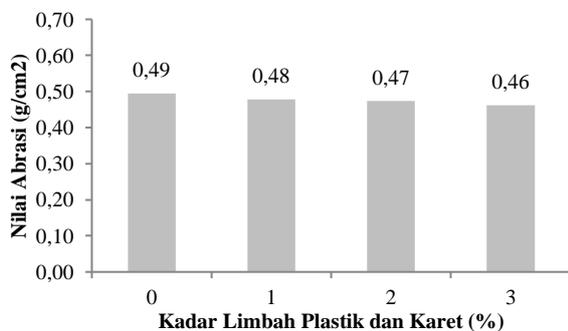
Kemudian dari hasil pengujian pengaruh rendaman terhadap kekuatan tarik campuran aspal berpori dapat diketahui bahwa baik campuran non maupun dengan limbah plastik dan karet nilai TSR $\geq 80\%$, sehingga telah memenuhi spesifikasi. Gambar 10 menunjukkan grafik TSR dengan kadar limbah plastik dan karet.



Gambar 10. Grafik IDT pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Hasil pengujian *ravelling*

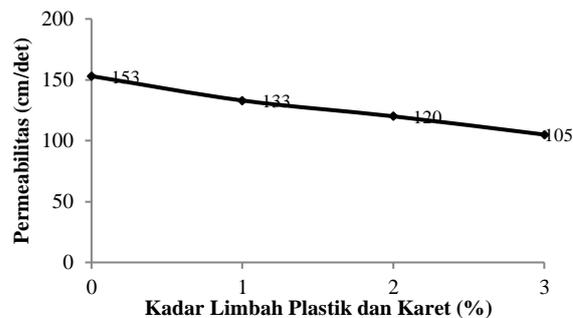
Untuk hasil pengujian *ravelling* dapat diperoleh gambaran bahwa nilai abrasi akan menurun seiring dengan penambahan kadar limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori. Nilai abrasi terkecil pada kadar 3% limbah plastik dan karet ($0,46 \text{ gr/cm}^2$), sedangkan nilai terbesar pada kadar 0% atau tanpa limbah ($0,49 \text{ gr/cm}^2$). Gambar 11 menunjukkan nilai abrasi pada berbagai kadar limbah plastik dan karet.



Gambar 11. Grafik abrasi pada variasi kadar limbah plastik dan karet

Hasil Pengujian Permeabilitas

Gambar 12 menunjukkan grafik hubungan kadar limbah plastik dan karet dengan permeabilitas. Dapat diketahui bahwa permeabilitas akan menurun seiring dengan penambahan kadar limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori. Nilai permeabilitas terkecil pada kadar limbah plastik dan karet 3% (105 cm/det), sedangkan nilai tertinggi pada kadar limbah 0% atau tanpa limbah (153 cm/det).



Gambar 12. Grafik permeabilitas pada variasi kadar limbah plastik dan karet.

PEMBAHASAN

Dari hasil pengujian dan analisis data yang dilakukan mengenai pengaruh penambahan limbah plastik dan karet terhadap kinerja aspal berpori menggunakan pendekatan kekuatan, deformasi, ketahanan retak, abrasi, durabilitas, kelembaban, dan kedekatan air maka dapat disampaikan pembahasan sebagai berikut ini.

Karakteristik Material

Dari hasil analisis data dapat disimpulkan bahwa semua material yang digunakan telah memenuhi spesifikasi Bina Marga. Agregat yang digunakan memiliki kekuatan yang baik, sehingga tidak mudah lapuk dan pecah. Nilai berat jenis agregat kasar, halus, dan filler juga memenuhi syarat spesifikasi yaitu tidak berongga, padat, dan kerapatan yang baik sehingga tidak membutuhkan aspal yang terlalu banyak. Jika dilihat dari nilai penyerapan air agregat yang dipakai memiliki kemampuan menyerap air yang kecil, sehingga dapat diikat oleh aspal dengan baik. Hasil ini didukung pula oleh hasil uji kelekatan agregat dengan aspal yang tinggi.

Kemudian hasil pengujian karakteristik aspal pen 60/70 menunjukkan bahwa aspal yang digunakan telah memiliki karakteristik yang baik sesuai dengan spesifikasi aspal 60/70. Kekuatan aspal pen 60/70 masih dalam rentang yang ada, sehingga masih memiliki kekuatan menahan beban yang ada. Dari nilai titik lembek menunjukkan pula bahwa nilainya diatas persyaratan, sehingga tidak mudah meleleh akibat suhu di lapangan yang dapat berakibat merusak struktur lapisan jalan. Sementara dari nilai daktilitas terlihat bahwa aspal pen 60/70 memiliki daya lekat yang baik. Sehingga akan memberikan ikatan dengan agregat yang cukup kuat. Demikian pula dengan titik nyala yang diperoleh menunjukkan temperatur yang aman

pada saat proses pencampuran. Terkait dengan nilai viskositas juga menunjukkan bahwa pada saat pencampuran dan pemadatan tingkat kekentalannya cukup baik, sehingga mudah diaduk dan dicampur dengan agregat. Untuk hasil berat jenis aspal pen 60/70 telah menunjukkan aspal memiliki berat jenis yang ideal dan tidak berongga sehingga tidak mudah terjadi oksidasi.

Dengan demikian dari hasil uji agregat dan aspal dapat disimpulkan bahwa kedua material tersebut memiliki karakteristik yang baik sehingga dapat menghasilkan campuran aspal berpori yang ideal.

Karakteristik Marshall

Hasil dari analisis data dapat dilihat penggunaan limbah plastik dan karet dapat meningkatkan stabilitas campuran aspal berpori baik pada sampel kering maupun terendam. Pada penelitian terdahulu dijelaskan bahwa pada penggunaan plastik dan ban bekas secara parsial dalam campuran beraspal telah mampu memenuhi kriteria *Marshall*. Stabilitas akan meningkat akibat penggunaan limbah plastik dalam campuran beraspal (Ramdhan 2017; Supriyadi, Rahardjo dan Pranoto 2018). Pada penelitian ini nilai stabilitas kemudian menurun jika kadar limbah plastik dan karet bertambah. Hal tersebut dikarenakan terjadinya peningkatan rongga akibat penambahan limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori. Peningkatan nilai stabilitas akibat penggunaan limbah plastik dan karet menunjukkan kemampuan campuran dalam menahan beban meningkat dengan baik. Hasil tersebut didukung pula oleh nilai *flow*, dimana pada nilai *flow* terlihat bahwa *flow* campuran aspal berpori dengan limbah hybrid lebih kecil dibandingkan yang non limbah baik pada sampel kering dan terendam. Nilai *flow* kemudian akan naik jika kadar limbah plastik dan karet bertambah. Penurunan nilai *flow* menunjukkan kemampuan perkerasan berpori dengan limbah plastik dan karet untuk tetap dan tidak mengalami deformasi vertikal yang tinggi. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya bahwa penggunaan limbah plastik dapat menurunkan nilai *flow* (Ramdhan 2017).

Selanjutnya dapat diketahui bahwa VIM campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan karet lebih kecil dibandingkan non limbah baik pada kondisi kering maupun basah. Pada kadar limbah plastik dan karet 3% nilai VIM tidak memenuhi syarat spesifikasi. Limbah

plastik dan karet dalam campuran aspal berpori menyebabkan rongga campuran mengecil, dikarenakan aspal menjadi lebih *flowable*. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya tentang penggunaan limbah plastik yang dapat menurunkan nilai VIM (Rusyda 2018). Pengaruh rendaman air menyebabkan VIM meningkat pada kadar limbah plastik dan karet 0% dan 1%. Hal ini dikarenakan air masuk dan melemahkan ikatan agregat dan aspal. Sementara itu jika dilihat dari nilai MQ terlihat bahwa fleksibilitas campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan karet lebih rendah dibandingkan dengan non limbah baik untuk sampel kering maupun basah. Fleksibilitas yang kecil menunjukkan bahwa campuran aspal berpori lebih kaku, sehingga mampu menahan perubahan bentuk akibat intervensi beban luar.

Dari karakteristik *Marshall* dapat disimpulkan bahwa kinerja perkerasan berpori dengan limbah plastik dan karet mengalami peningkatan berdasarkan parameter stabilitas, *flow*, VIM dan MQ.

Ketahanan Terhadap Retak

Dari hasil analisis terlihat bahwa penambahan limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori telah mampu meningkatkan ketahanan terhadap retak. Ketahanan terhadap retak akan naik dari 1% sampai kadar limbah plastik dan karet 2% dan menurun pada kadar 3%. Kadar 2% terlihat menunjukkan hasil yang optimum terkait ketahanan terhadap retak campuran aspal berpori. Dari hasil ini dapat diduga bahwa limbah *hybrid* dapat meningkatkan kemampuan ikatan yang cukup baik dalam campuran aspal berpori.

Kemudian dari hasil analisis terhadap TSR menunjukkan bahwa campuran aspal berpori dengan dan tanpa limbah memiliki ketahanan terhadap retak akibat pengaruh air cukup baik. Ada kecenderungan ketahanan terhadap retak dalam lingkungan yang lembab/berair masih cukup tinggi jika kadar limbah dalam campuran bertambah.

Ketahanan Terhadap Ravelling

Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin bertambahnya kadar limbah plastik dan karet dalam perkerasan berpori menyebabkan nilai abrasi semakin kecil. Hal ini dikarenakan semakin bertambahnya kadar limbah plastik dan karet, maka daya ikat antar agregat dalam campuran semakin baik sehingga pemisahan

antara agregat dengan aspal saat dilakukan pengujian abrasi semakin kecil.

Jika dihubungkan antara nilai VIM dan abrasi dapat disimpulkan bahwa VIM besar abrasi meningkat dan VIM kecil abrasi menurun. Hal ini disebabkan karena semakin banyaknya rongga dalam campuran aspal maka air dan udara akan lebih mudah masuk yang berdampak pada melemahnya ikatan aspal dan agregat, sehingga nilai abrasi yang terjadi juga akan semakin besar. (Arifin dan Wijanarko 2001).

Durabilitas

Dari analisis perhitungan IKS dapat diketahui bahwa hanya pada kadar limbah plastik dan karet 2% yang memiliki keawetan yang cukup tinggi. Pada campuran non dan limbah plastik dan karet 1% dan 3% tidak menghasilkan campuran yang awet terhadap faktor cuaca. Hal ini menunjukkan kadar 2% merupakan persentase yang cukup ideal untuk menghasilkan campuran aspal berpori yang baik dalam menerima beban dengan adanya perubahan faktor cuaca.

Namun jika dilihat dari hasil perhitungan TSR terjadi sebaliknya. Campuran aspal berpori baik non limbah maupun dengan limbah plastik dan karet memiliki ketahanan retak yang baik, walaupun terendam dalam air.

Ketahanan Terhadap Kelembaban

Dari hasil perbandingan sampel kering dan terendam dapat diketahui bahwa air berpengaruh terhadap penurunan stabilitas, kenaikan *flow* dan VIM, serta penurunan MQ. Dari parameter *Marshall* tersebut dapat disimpulkan bahwa kinerja *Marshall* campuran aspal berpori akan menurun akibat faktor destruktif air baik untuk non limbah maupun dengan limbah plastik dan karet. Ketika terendam air, maka ada fenomena melemahnya ikatan antar aspal dan agregat, sehingga menyebabkan penurunan kinerja secara menyeluruh pada campuran aspal berpori.

Porositas lapisan

Sifat porositas campuran aspal berpori akan menurun seiring bertambahnya kadar limbah plastik dan karet dalam campuran. Limbah plastik dan karet membuat aspal menjadi *flowable* sehingga mampu mengisi rongga-rongga campuran aspal berpori. Hal ini berdampak pada menurunnya rongga pada campuran, sehingga tingkat porositasnya

menurun. Hasil ini sesuai dengan pengujian VIM, dimana nilai VIM akan menurun seiring dengan penambahan kadar limbah plastik dan karet dalam campuran.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil pengujian, analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai pengaruh penambahan limbah plastik dan karet terhadap kinerja perkerasan aspal berpori dapat diambil kesimpulan bahwa hasil uji agregat dan aspal memiliki karakteristik yang baik sehingga dapat menghasilkan campuran aspal berpori yang ideal.

Dari karakteristik *Marshall* dapat disimpulkan bahwa terjadi peningkatan kinerja aspal berpori dengan limbah plastik dan karet berdasarkan parameter stabilitas, *flow*, VIM dan MQ.

Ketahanan terhadap retak campuran aspal berpori dengan limbah plastik dan karet mengalami peningkatan. Ketahanan terhadap abrasi campuran aspal berpori meningkat akibat penambahan kadar limbah plastik dan karet.

Keawetan campuran aspal berpori tercapai pada kadar limbah plastik dan karet 2%.

Ketahanan terhadap kelembaban campuran aspal berpori akan menurun baik pada non limbah dan dengan limbah plastik dan karet.

Kekedapan perkerasan aspal berpori meningkat akibat penambahan limbah plastik dan karet.

Dengan demikian dari hasil penelitian ini dapat diusulkan persentase rancangan kadar limbah plastik dan karet dalam campuran aspal berpori yang ideal adalah sebesar 2%.

Saran

Adapun saran yang dapat diberikan sebagai rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah dengan pengujian mikroskopik untuk melihat seberapa besar proses pencampuran antara limbah plastik dan karet dengan aspal. Pengaruh variasi temperatur pencampuran dan temperatur pengujian perlu dilakukan untuk mengetahui sensitifitas terhadap campuran aspal berpori. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengujian abrasi dengan menggunakan alat lain seperti alat uji Los Angeles dan *Stone Crusher*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alakhali, A. K., Fadzil Mat Yahaya, and M. A. Almalik. 2021. "Effects of Crumb Rubber at Different Sizes in Asphalt Mixtures on Mechanical Properties." *IOP Conference Series* 682 (1): 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012028>.
- Ali, N., Arfan, H., Patanduk, J., & Hustim, M. 2013. "Studi Permeabilitas Aspal Modifikasi." *Prosiding Seminar Nasional III Teknik Sipil*. 239–245. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Anam, S., dan Pratikno, H. 2018. "Pengujian Perkerasan Aspal Porus dengan Penambahan Tread Ban Bekas Pada Uji Marshall." *U KaRsT* 2(2): 154-163.
- Arifin, B., dan Wijanarko, D. 2001. "Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi sebagai Filler terhadap Karakteristik Campuran HRS". Skripsi. Universitas Islam Indonesia.
- Australian Asphalt Pavement Association (AAPA). 2004. *National Asphalt Specification*. April.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). 2003. Metode pengujian campuran aspal dengan alat Marshall RSNi-M-01-2003. Jakarta: BSN.
- Erita, I. A., Guswandi dan Lizar. 2019. "Pengaruh Pencampuran Limbah Plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) Terhadap Nilai Marshall Aspal Pori". *Jurnal Inovtek Seri Teknik Sipil dan Aplikasi* 1(1):1-8.
- Heydari, S., Hajimohammadi, A., Javadi, N.H.S., dan Khalili, N. 2021. "The Use of Plastic Waste in Asphalt: A Critical Review on Asphalt Mix Design and Marshall Properties". *Journal of Construction and Building Materials*, Vol.309, 125185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125185>.
- Ismayalomi, S., Rahardjo, B., dan Pranoto. 2019. "Kajian Eksperimental Penambahan Plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) dan Asbuton LGA (Lawele Granular Asphalt) pada Campuran Aspal Porus". *Jurnal Bangunan* 24(1):1-14
- Martina, N., Hasan, M. F. R., dan Setiawan, Y. 2019. "Pengaruh Serbuk Ban Bekas Sebagai Campuran Agregat Halus Pada Campuran Aspal Porous". *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil* 24(2): 144-152.
- Nashir, T. Muh. 2013. "Studi Eksperimental Campuran Aspal Berpori menggunakan Aspal Polimer Modifikasi (*Polimer Modified Binder*) dengan Stabilisasi Serat Polypropylene". *Prosiding Seminar Nasional III Teknik Sipil UMS*. Surakarta: UMS
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). 1987. *Synthesis of Highway Practice 49, Open-Graded Friction Course for Highways*. Washington DC: Transportation Research Board.
- Ramadhan, Rizky dan Purwo Mahardi. 2016. "Pengaruh Penambahan Limbah Plastik (PET) Terhadap Karakteristik Marshall dan Permeabilitas Pada Aspal Berpori". *Rekayasa Teknik Sipil*. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/rekayasa-teknik-sipil/article/view/17675/16093>.
- Supriyadi, I.R.D., Rahardjo, B., dan Pranoto. 2018. "Kajian Eksperimental Campuran Aspal Porus dengan Bahan Tambahan Plastik HDPE (*High Density Poly Ethylene*)". *Jurnal Bangunan* 23(2): 19-28.
- Sarwono, D., dan Wardhani, A. K. 2007. "Pengukuran Sifat Permeabilitas Campuran Porous Asphalt". *Media Teknik Sipil Universitas Kristen Petra*, 7(2), 131–138.
- Sukirman, S. 2016. *Beton Aspal Campuran Panas*. Edisi Ketiga, Cetakan Keempat. ISBN: 978-979-96088-9-5. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Susanto, H.A., Yang, S.H., and Chou, H.H., 2019. "Mechanical Properties of Thin Surface Treatment for Pavement Maintenance." *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 14(2).
- Winayati, Hendri Rahmat, dan Alfian Saleh .2018. "Analisis Penggunaan Abu Tandan Kelapa Sawit sebagai Filler ditinjau dari Nilai Keausan Perkerasan (Cantabro Test) ". *INA-Rxiv*. <https://osf.io/preprints/inarxiv/y7su9/> (Diakses 15 Juli 2021).