

PENGARUH UKURAN BUTIR KARET BAN BEKAS TERHADAP KARAKTERISTIK MARSHALL PADA CAMPURAN ASPHALT CONCRETE-BINDER COURSE

Heriadi
Universitas Gadjah Mada
heriadi@mail.ugm.ac.id

Agus Taufik Mulyono
Universitas Gadjah Mada
agus.taufik.mulyono@ugm.ac.id

Latif Budi Suparma
Universitas Gadjah Mada
lbsuparma@ugm.ac.id

Abstract

Crumb Rubber, obtained through retreading of used rubber tires, has the opportunity to be used in asphalt mixtures, thereby reducing the waste of used tire rubber. The purpose of this study was to analyze and compare the effect of adding Crumb Rubber with large particle sizes, which is passing sieve Number 4 and being retained by sieve Number 8, and small particle sizes, which is passing sieve Number 16, in the Asphalt Concrete-Binder Course mixture. The effect of Crumb Rubber is measured using the Marshall and Indirect Tensile Strength parameters. The proportion of addition of Crumb Rubber is 0% and 1.5% of the total weight of the aggregate. The binder used in this study was Penetration Grade Asphalt of 60/70, produced by Shell. This study shows that the addition of Crumb Rubber increases the values of Void in Mineral Aggregate, Void in Mix, and Marshall Flow, but decreases the values of density, Void Filled with Asphalt, Marshall Stability, Marshall Quotient, and Retained Marshall Stability, as well as decreases the values of Indirect Tensile Strength. Crumb Rubber with small particle size turned out to have a better effect than Crumb Rubber with large particle size.

Keywords: Crumb Rubber; asphalt mixture; Marshall Parameters; Indirect Tensile Strength

Abstrak

Crumb Rubber, yang didapat melalui vulkanisir ban karet bekas, mempunyai peluang untuk dipakai dalam campuran beraspal, sehingga dapat mengurangi limbah karet ban bekas. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis dan membandingkan pengaruh penambahan Crumb Rubber dengan ukuran butir besar, yaitu lolos ayakan Nomor 4 dan tertahan ayakan Nomor 8, dan ukuran butir kecil, yaitu lolos ayakan Nomor 16, pada campuran Asphalt Concrete-Binder Course. Pengaruh Crumb Rubber diukur dengan menggunakan parameter Marshall dan Indirect Tensile Strength. Proporsi penambahan Crumb Rubber adalah 0% dan 1,5% terhadap berat total agregat. Bahan pengikat yang digunakan pada studi ini adalah Aspal Penetrasi 60/70 produksi Shell. Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan Crumb Rubber meningkatkan nilai-nilai Void in Mineral Aggregate, Void in Mix, dan Marshall Flow, tetapi menurunkan nilai-nilai kepadatan, Void Filled with Asphalt, Marshall Stability, Marshall Quotient, dan Retained Marshall Stability, serta menurunkan nilai Indirect Tensile Strength. Crumb Rubber dengan butir kecil ternyata memberi pengaruh yang lebih baik daripada Crumb Rubber butir besar.

Kata-kata kunci: Crumb Rubber; campuran beraspal; Parameter Marshall; Indirect Tensile Strength

PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah kendaraan bermotor memerlukan peningkatan kualitas infrastruktur jalan agar mampu melayani lalu lintas yang semakin padat. Jalan memainkan peran penting dalam transportasi baik barang maupun orang, sebab menangani sekitar 80%-90% kebutuhan transportasi yang ada. Karena itu, perbaikan lapis perkerasan jalan yang memadai sangat diperlukan, supaya meningkatkan kekuatan, kenyamanan, dan keselamatan jalan di Indonesia (Martina et al., 2019; Sugiyanto, 2008).

Pertumbuhan transportasi darat memiliki kontribusi besar dalam menghasilkan banyak limbah ban bekas yang berasal dari kendaraan bermotor. Jumlah timbunan limbah ban bekas ini terus bertambah, seiring dengan penambahan jumlah kendaraan bermotor (Hariyadi et al., 2018). Saat ini Indonesia belum memiliki data akurat mengenai jumlah limbah ban bekas yang dibuang setiap tahun, namun dapat dipastikan bahwa produksi limbah ban bekas terus meningkat.

Limbah ban bekas mudah ditemukan di seluruh penjuru Indonesia dan dapat dimanfaatkan sebagai pengganti agregat halus untuk membuat perkerasan jalan yang memiliki kelenturan yang tinggi (Martina et al., 2019). Di sisi lain, limbah ban bekas dapat menjadi sumber sampah yang mencemari lingkungan, karena tidak larut dalam tanah (Yamali, 2017). Karena itu, diperlukan upaya untuk memanfaatkan limbah karet ban bekas dengan cara mengubahnya menjadi *Crumb Rubber* (CR) melalui proses vulkanisir yang kemudian dimanfaatkan dalam campuran perkerasan jalan (Oktaviastuti et al., 2020). Xiao et al. (2009) menyatakan bahwa penambahan CR pada campuran beraspal dapat meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen yang disebabkan oleh jejak roda, seperti alur atau *rutting*, serta meningkatkan daya tahan terhadap temperatur tinggi.

Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis dan membandingkan pengaruh penambahan CR ukuran butir besar dan ukuran butir kecil terhadap karakteristik Marshall dan *indirect tensile strength* (ITS) dalam campuran *asphalt concrete-binder course* (AC-BC) dengan proses kering (*dry process*) dengan penuangan di akhir (*end blending*). Hal ini dimaksudkan agar CR tidak mengalami perubahan bentuk akibat meleleh.

Material dalam Penelitian

ASTM (2002) menyatakan bahwa aspal adalah bahan perkerasan yang berwarna cokelat kehitaman yang berasal dari alam atau hasil pengolahan minyak bumi, yang berfungsi sebagai bahan perekat agregat, untuk menciptakan sifat solid dalam campuran dan mengisi rongga antarbutir agregat dan rongga dalam agregat. *Asphalt Institute* (2014) mengungkapkan bahwa terdapat 3 karakteristik aspal yang paling penting dalam perilaku pada campuran beraspal, yaitu kerentanan temperatur, viskositas, dan karakteristik penuaan. Penelitian ini menggunakan aspal penetrasi 60/70 produksi Shell, yang memiliki spesifikasi teknis yang sudah disesuaikan dengan kondisi alam Indonesia.

Asphalt Institute (2014) mendefinisikan agregat sebagai mineral padat dan keras yang digunakan pada campuran beraspal panas, yang berupa pasir, kerikil, batu pecah, *slag*, dan debu batu. Agregat menyumbang sekitar 90% hingga 95% terhadap berat total atau sekitar 75% hingga 85% terhadap volume total campuran beraspal, dan berfungsi sebagai pemikul beban lalu lintas pada perkerasan jalan. Terdapat 2 jenis agregat jika dilihat dari ukurannya, berdasarkan Spesifikasi Umum Rev. 2 (2020), yaitu agregat kasar dan agregat halus. Agregat kasar tertahan ayakan Nomor 8 (2,36 mm), yang berfungsi menahan beban kendaraan yang bekerja di atas perkerasan, dan agregat halus lolos ayakan Nomor 8 (2,36 mm) dan tertahan pada ayakan Nomor 200 (0,075 mm), yang berfungsi untuk mengisi rongga-

rongga yang tidak dapat terisi oleh agregat kasar. Agregat pada penelitian ini diperoleh dari pabrik pemecah batuan (*stone crusher*) di daerah Clereng, Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

Spesifikasi Umum Rev. 2 (2020) menjelaskan bahwa bahan pengisi (*filler*) adalah material yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm) dan yang tertahan pada pan atau wadah tidak kurang dari 75% terhadap beratnya. Bahan pengisi ini berfungsi mengisi ruang-ruang yang tidak terisi oleh agregat halus, sehingga campuran menjadi lebih padat dan stabil. *Filler* yang dipakai pada penelitian ini berupa debu dari pecahan batu, yang diambil dari Clereng, yaitu tempat yang sama dengan tempat pengambilan agregat kasar dan agregat halus.

Frida (2011) menjelaskan bahwa terdapat 3 proses untuk memperoleh CR, yaitu *ambient grinding* dengan cara diparut dan digiling, *cryogenic grinding* dengan cara dibekukan menggunakan hidrogen cair, dan *wet-ambient grinding* dengan melarutkan ban karet bekas. CR yang digunakan pada studi ini diperoleh melalui proses *ambient grinding* dengan cara diparut dan digiling pada temperatur ruangan, sampai mendapatkan ukuran partikel yang diinginkan serta dapat memisahkan komponen utama ban bekas, seperti karet, baja, dan tekstil (Picado-Santos, 2020). Neto et al. (2006) menemukan bahwa CR yang diperoleh melalui proses *cryogenic grinding* memiliki tekstur permukaan butir lebih halus daripada CR yang diperoleh melalui proses *ambient grinding*, yang cenderung relatif kasar seperti digaruk. Karena itu, CR hasil proses *ambient grinding* lebih baik jika digunakan dalam campuran beraspal, karena tekstur permukaan yang kasar dapat menghasilkan ikatan yang lebih kuat. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium dengan metode *energy dispersive x-ray fluorescence* (ED-XRF) di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada (LPPT UGM), komponen CR didominasi oleh 4 senyawa kimia, yaitu kalsium (Ca) 42,16%, *zincum* atau seng (Zn) 29,98%, sulfur (S) 14,17%, dan silikon (Si) 9,42%. Sedangkan 3,71% merupakan gabungan klorin (Cl), titanium (Ti), besi (Fe), nikel (Ni), tembaga (Cu), bromin (Br), dan stronsium (Sr).

Proses Pencampuran

Zoorob dan Suparma (2000) menjelaskan bahwa terdapat 2 metode pencampuran CR, yaitu proses basah (*wet process*) dan proses kering (*dry process*). Pada proses basah, CR dicampurkan ke dalam aspal panas, kemudian diaduk sampai homogen, sehingga menghasilkan *crumb rubber asphalt* (CRA). Selanjutnya, CRA ditambahkan pada agregat yang sudah direncanakan (*mixing plant*), seperti pencampuran konvensional pada umumnya. Proses kering merupakan proses pencampuran CR secara langsung ke dalam agregat yang sedang dipanaskan pada temperatur yang ditetapkan. Kemudian dicampurkan dengan aspal panas sampai merata atau homogen. Saputro (2022) menjelaskan bahwa proses kering adalah proses menambahkan CR dalam agregat sebagai aditif maupun sebagai substitusi agregat halus, sedangkan proses basah adalah penambahan CR dalam aspal panas sebagai *modifier* untuk menghasilkan CRA.

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Transportasi Universitas Gadjah Mada, dengan mengacu pada Spesifikasi Umum Revisi 2 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020). Dua jenis ukuran CR digunakan pada studi ini, yaitu butir besar (lolos ayakan Nomor 4, tertahan Nomor 8, yang selanjutnya diberi kode “B”, yang berasal dari kata “besar”) dan butir kecil (lolos ayakan Nomor 16, yang selanjutnya diberi kode “K”, yang berasal dari kata “kecil”), sebagai bahan tambah (aditif) dalam campuran AC-BC, dengan persentase penambahan 0% dan 1,5% terhadap berat total agregat. Bahan perekat yang digunakan adalah Aspal Penetrasi 60/70. Agregat kasar, agregat halus, dan *filler* yang digunakan berasal dari Clereng, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Proses pencampuran dilakukan secara kering, dengan penambahan CR di akhir (*end blending*) sebelum benda uji dipadatkan dengan *marshall compactor*. Pengujian yang diterapkan adalah uji Marshall dan *Indirect Tensile Strength* (ITS).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Marshall Sebelum Kondisi Kadar Aspal Optimum

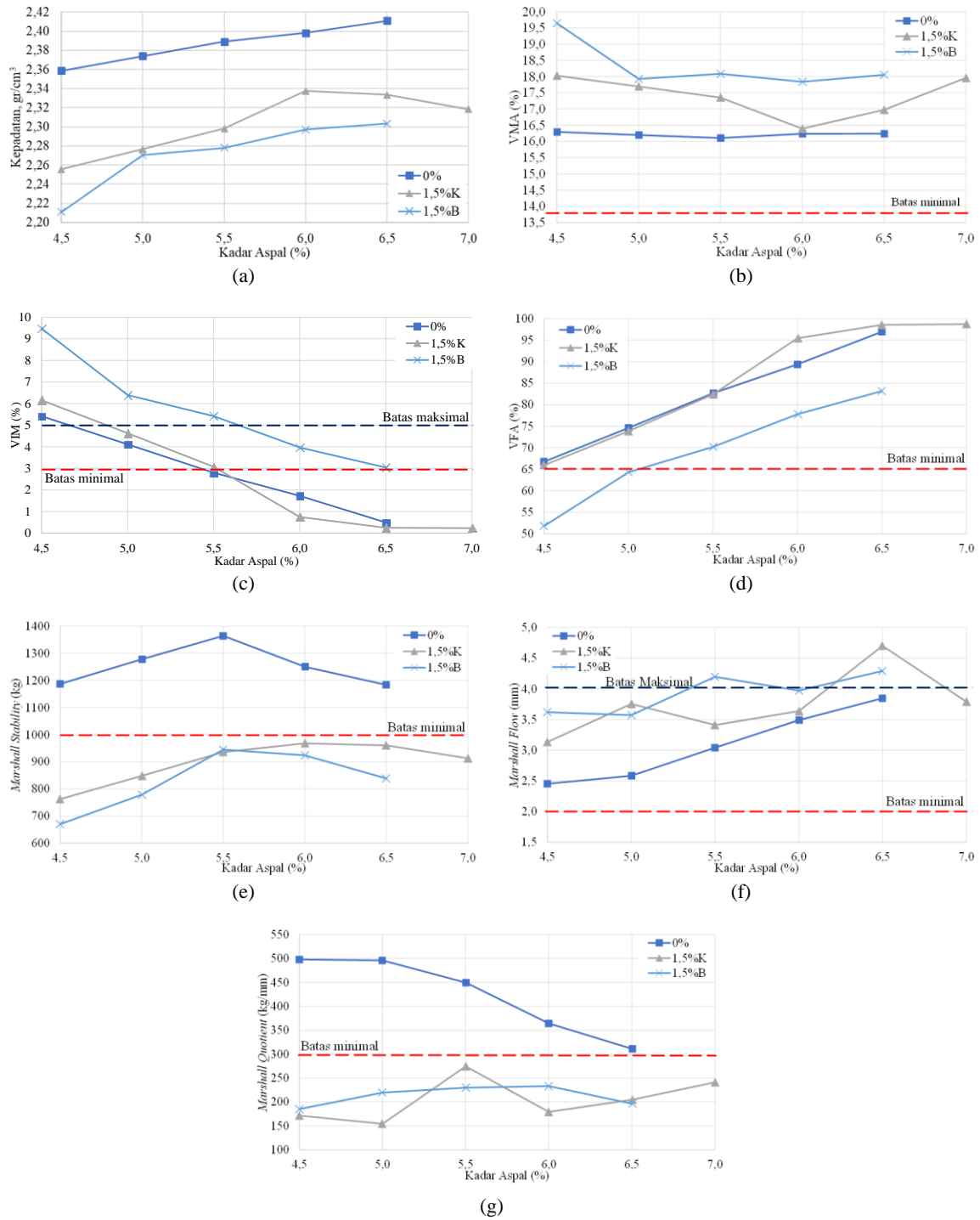
Kepadatan (*density*) didefinisikan sebagai ukuran kepadatan campuran beraspal. Semakin besar kepadatan suatu campuran beraspal, semakin mantap dan kuat campuran tersebut. Grafik kepadatan ditunjukkan pada Gambar 1 (a), yang memperlihatkan kepadatan campuran AC-BC turun ketika diberi aditif CR, karena CR memiliki sifat plastis. CR butir kecil memiliki nilai kepadatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan CR butir besar, karena butir kecil lebih baik dalam menutupi rongga dalam campuran.

Void in Mineral Aggregate (VMA) merupakan ukuran jumlah rongga udara dalam butir-butir agregat yang sudah dipadatkan dalam campuran beraspal jika seluruh aspal dalam campuran ditiadakan. Gambar 1 (b) menunjukkan bahwa penambahan CR dalam campuran membuat VMA meningkat, seperti yang diungkapkan Xiao et al. (2009) dan Yamali (2017), karena butir CR dapat menciptakan rongga tambahan antarmineral agregat. CR dengan ukuran butir besar sedikit menaikkan VMA, karena butir besar dapat menciptakan rongga udara yang besar dalam campuran daripada butir kecil.

Void in Mix (VIM) adalah volume udara di antara agregat yang berselimut aspal yang sudah dipadatkan. Jika rongga terlalu sedikit, udara tidak bisa masuk dalam campuran sehingga menjadi keras, namun rongga udara yang terlalu banyak dapat menyebabkan campuran mudah mengalami perubahan bentuk. Penambahan CR dalam campuran menyebabkan VIM meningkat, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (c). Penambahan CR dapat menciptakan rongga udara, dengan CR butir besar menaikkan nilai VIM daripada CR butir kecil, karena butir besar menciptakan rongga yang besar pula dalam campuran.

Void Filled with Asphalt (VFA) merupakan persen VMA yang terisi oleh aspal, dan tidak termasuk jumlah aspal yang terserap oleh agregat. Gambar 1 (d) menunjukkan penam-

bahan CR dalam campuran AC-BC, yang menurunkan nilai VFA, yang mana hal ini sesuai dengan pernyataan Yamali (2017). Hal ini disebabkan oleh butiran CR yang dapat menciptakan rongga lebih banyak dalam campuran. Butir CR berukuran besar lebih menurunkan nilai VFA daripada butir CR kecil, karena butir kasar menciptakan rongga udara lebih besar dalam campuran.



Gambar 1 Karakteristik Marshall: (a) Kepadatan, (b) VMA, (c) VIM, (d) VFA, (e) Marshall Stability, (f) Marshall Flow, dan (g) Marshall Quotient

Stabilitas Marshall (MS) merupakan ukuran kemampuan perkerasan untuk menerima beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen. Semakin besar nilai stabilitas, semakin mampu perkerasan menahan beban lalu lintas. Penambahan CR dalam campuran AC-BC menurunkan nilai stabilitas (Sesaria, 2018; Martina et al., 2019), yang ditunjukkan pada Gambar 1 (e), karena campuran menjadi semakin plastis. CR berukuran kecil menyebabkan nilai stabilitas sedikit meningkat daripada CR berukuran besar, karena sifat plastis butir kecil tidak terlalu berpengaruh daripada nilai plastis butir besar.

Marshall Flow (MF) atau kelelahan adalah ukuran besarnya perubahan suatu perkerasan menjadi bentuk plastis akibat adanya beban sampai stabilitas mengalami keruntuhan. Semakin besar nilai kelelahan, semakin mudah perkerasan mengalami perubahan bentuk. Sebaliknya jika nilai *flow* terlalu kecil, perkerasan semakin getas sehingga rawan mengalami kerusakan. Gambar 1 (f) menunjukkan pengaruh penambahan aditif CR dalam campuran AC-BC, yang menyebabkan *flow* meningkat, seperti hasil studi Yamali (2017), Heriyadi et al. (2018), Sesaria (2018), dan Martina et al. (2019), karena campuran semakin plastis. Butir besar sedikit meningkatkan kelelahan, sebab pengaruh sifat plastis CR butir besar lebih dominan daripada sifat plastis butir kecil.

Marshall Quotient (MQ) memberikan gambaran mengenai sifat kekakuan dan fleksibilitas perkerasan beraspal. Semakin besar nilai MQ, semakin kaku perkerasan lentur, dan sebaliknya semakin kecil nilai MQ, semakin plastis perkerasan. Pemberian aditif CR pada campuran AC-BC menurunkan nilai MQ secara signifikan. Hal ini sesuai dengan pernyataan Yamali (2017) dan Martina et al. (2019) yang mengindikasikan bahwa campuran semakin plastis, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (g). CR berukuran kecil terbukti menaikkan nilai MQ daripada CR berukuran besar, karena butir kecil membuat campuran relatif lebih kaku daripada butir besar.

Karakteristik Marshall Sesudah Kondisi Kadar Aspal Optimum

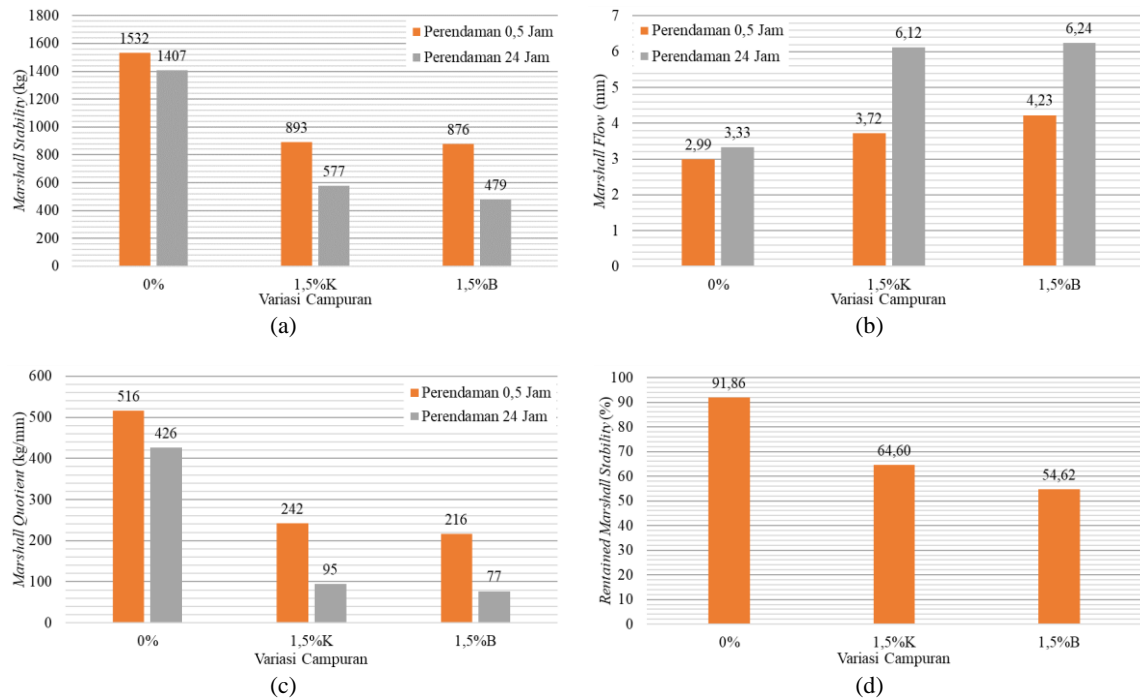
Penambahan aditif CR dalam campuran AC-BC menaikkan nilai Kadar Aspal Optimum atau KAO (Xiao et al., 2009; Bilema et al., 2021), seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Hal ini terjadi karena campuran memerlukan jumlah aspal yang lebih banyak untuk dapat menyelimuti butiran CR. Selisih nilai KAO pada butir kecil (1,5% K) adalah 0,1%, dan 0,4% pada butir besar (1,5% B).

Tabel 1 Nilai Kadar Aspal Optimum dengan penambahan CR dalam Campuran AC-BC

Variasi CR terhadap Berat Total Agregat (%)	Kadar Aspal Optimum, KAO (%)
0%	5,10
1,5% K	5,20
1,5% B	5,50

Gambar 2 (a) menunjukkan bahwa penambahan CR dalam campuran AC-BC menurunkan nilai stabilitas, sesuai dengan pernyataan Sesaria (2018) dan Martina et al. (2019), karena campuran semakin plastis. CR butir kecil menyebabkan stabilitas sedikit meningkat

daripada CR butir besar, berlaku untuk kondisi semua perendaman, karena butir kecil menyebabkan campuran lebih kaku daripada butir besar.



Gambar 2 Karakteristik Marshall Sesudah KAO: (a) Marshall Stability, (b) Marshall Flow, (c) Marshall Quotient, dan (d) Retained Marshall Stability

Penambahan CR dalam campuran AC-BC menyebabkan nilai kelelahan meningkat sesuai dengan pernyataan Yamali (2017), Heriyadi et al. (2018), Sesaria (2018), dan Martina et al. (2019). Hasil tersebut ditunjukkan pada Gambar 2 (b). Peningkatan nilai kelelahan menunjukkan bahwa campuran menjadi semakin plastis. CR butir besar sedikit meningkatkan kelelahan daripada CR butir kecil.

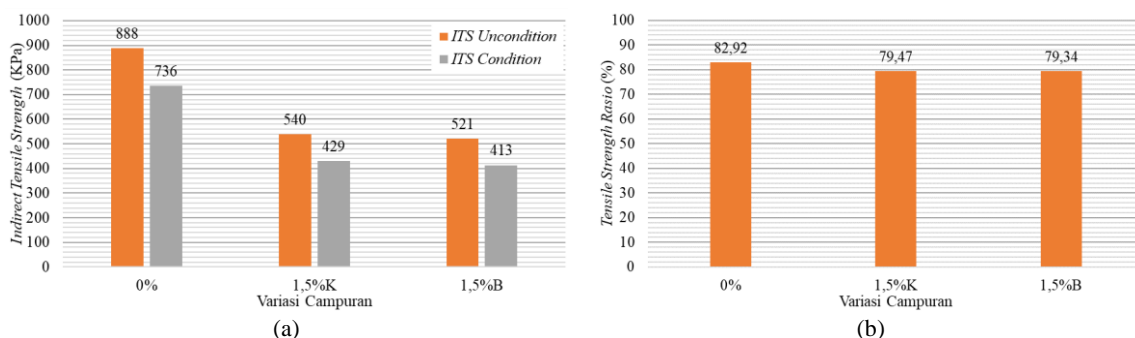
Pemberian CR pada campuran AC-BC menurunkan nilai Marshall Quotient (MQ) secara signifikan (Yamali, 2017 dan Martina et al., 2019), seperti ditunjukkan pada Gambar 2 (c), karena campuran semakin plastis. Penambahan CR berukuran kecil menaikkan nilai MQ daripada CR butir besar, karena butir kecil membuat campuran relatif lebih kaku daripada butir besar.

Retained Marshall Stability (RMS) atau Stabilitas Marshall Sisa (SMS) merupakan salah satu indikator ketahanan terhadap keausan, cuaca, air, dan perubahan temperatur pada perkerasan lentur. Angka RMS yang semakin besar menandakan perkerasan mampu menahan keausan, air, serta perubahan cuaca dan temperatur. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan CR dalam campuran AC-BC menurunkan nilai RMS secara signifikan, karena campuran menjadi lebih plastis, seperti ditunjukkan pada Gambar 2 (d). CR dengan butir besar lebih menurunkan nilai RMS, karena campuran relatif lebih plastis dibandingkan dengan CR butir kecil.

Indirect Tensile Strength

Indirect Tensile Strength (ITS) atau Kuat Tarik Tak Langsung adalah kemampuan mekanik lapisan perkerasan untuk menahan kuat tarik yang disebabkan oleh beban. Terdapat 2 bagian pada pengujian ITS. Pertama, benda uji direndam selama 24 jam dalam *waterbath* dengan temperatur (60 ± 1) °C, yang disebut dengan *conditioned*. Kedua, kondisi benda uji tidak direndam atau *unconditioned*. Perbandingan hasil pengujian ITS *unconditioned* dengan hasil pengujian *conditioned* disebut Tensile Strength Rasio (TSR), yang digunakan untuk mengetahui tingkat stabilitas campuran ketika mengalami perendaman air. Hasil pengujian ITS *conditioned* lebih rendah daripada hasil pengujian ITS *unconditioned*, karena sampel *conditioned* terendam air hangat dalam waktu lama, yang menyebabkan aspal berubah menjadi lembek dan menyebabkan gaya adhesi dan gaya kohesi aspal menjadi berkurang. Penambahan CR dalam campuran AC-BC menurunkan nilai ITS, seperti ditunjukkan pada Gambar 3 (a), karena campuran menjadi lebih plastis. CR butir kecil menghasilkan nilai ITS lebih besar daripada CR butir besar, karena campuran dengan butir kecil relatif lebih rapat daripada campuran dengan butir besar.

Penambahan CR menurunkan TSR, karena sifat adhesi aspal (kerekatan aspal dengan agregat) dan sifat kohesi aspal (kemampuan aspal dalam mengikat agregat ditempatnya setelah terjadi pengikatan) menurun akibat pengaruh air perendaman yang menyebabkan kuat tarik campuran berkurang (Syaripin, 2021). Penambahan CR butir kecil sedikit meningkatkan nilai TSR.



Gambar 3 Nilai ITS (a) dan Nilai TSR (b)

KESIMPULAN

Penggunaan Crumb Rubber (CR) dalam campuran Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) meningkatkan nilai Void in Mineral Aggregate (VMA), Void in Mix (VIM), dan Marshall Flow (MF). Tetapi penambahan CR menurunkan nilai kepadatan (*density*), Void Filled with Asphalt (VFA), Marshall Stability (MS), Marshall Quotient (MQ), dan Retained Marshall Stability (RMS), karena campuran menjadi lebih plastis dan memiliki banyak rongga daripada campuran normal. Nilai Kuat Tarik Tak Langsung atau Indirect Tensile Strength (ITS) mengalami penurunan, yang berimbas pada nilai Tensile Strength Rasio (TSR) yang

ikut turun, karena berkurangnya sifat adhesi dan sifat kohesi aspal, yang menunjukkan bahwa campuran relatif kurang stabil terhadap pengaruh air.

Crumb Rubber berbutir kecil memberikan pengaruh yang lebih baik daripada Crumb Rubber butir besar. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai VMA, VIM, dan MF yang lebih rendah daripada Crumb Rubber berbutir besar, dan nilai kepadatan, VFA, MS, MQ dan RMS Crumb Rubber berbutir kecil lebih tinggi daripada yang dihasilkan oleh Crumb Rubber berbutir besar. Nilai ITS dan TSR campuran dengan Crumb Rubber butir kecil lebih tinggi dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh campuran dengan Crumb Rubber butir besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Asphalt Institute. 2014. *MS-2 Asphalt Mix Design Methods (7th ed.)*. Lexington, KY.
- American Standard Testing and Material. 2002. *Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements; ASTM D 8-02*. West Conshohocken, PA.
- Bilema, M., Aman, M., Hassan N., Haloul, M., dan Modibbo, S. 2021. *Influence of Crumb Rubber Size Particles on Moisture Damage and Strength of the Hot Mix Asphalt*. *Materials Today: Proceedings* 42: 2387-2391.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2020. *Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Jakarta.
- Frida, E. 2011. *Penggunaan Anhidrida Maleat-Grafted-Polipropilena (AM-g-PP) dan Anhidrida Maleat-Grafted-Karet Alam (AM-g-KA) pada Termoplastik Elastomer (TPE) Berbasis Polipropilena, Kompon Karet Alam SIR-20 dan Serbuk Ban Bekas*. Disertasi tidak dipublikasikan. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Hariyadi, H., Pratama, Y., Sigit., Fadhilah, L., Maryunani, W.P., dan Sudarno. 2018. *Pengaruh Ukuran Crum Rubber Mesh #80 dan Mesh #120 (Serbuk Limbah Ban Karet) pada Penambahan Campuran Laston untuk Perkerasan Jalan*. *Reviews in Civil Engineering*, 2 (2): 82-85.
- 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*, 24 (2): 144–152.
- Neto, S. A. D., Farias, M. M., Pais J. C., Pereira, P. A. A., dan Sousa, J. B. 2006. *Influence of Crumb Rubber and Digestion Time on the Asphalt Rubber Binders*. *Road Materials and Pavement Design*, 7: 131–148.
- Oktaviastuti, B., Leliana, A., dan Abid, L. 2020. *Pengaruh Bahan Tambah Serbuk Ban Bekas pada Konstruksi Hot Rolled Sheet-Wearing Course*. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Universitas Madura*, 5 (1): 7–12.
- Picado-Santos, L. G., Capitaio, S. D., dan Neves, J. M. C. 2020. *Crumb Rubber Asphalt Mixture. Literature Review*. *Construction and Building Materials* 247: 1–13.

- Saputro, D. T. 2022. *Pengaruh Campuran AC-WC Limbah Plastik LDPE Film terhadap Skid Resistance*. Tesis tidak dipublikasikan. Fakultas Teknik, Magister Teknik Sipil. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Sesaria, D. A. 2018. *Pengaruh Gradasi Crumb Rubber pada Karakteristik Campuran Aspal*. Tugas Akhir tidak dipublikasikan. Fakultas Teknik, Bidang Studi Transportasi. Medan: Univeristas Sumatera Utara.
- Sugiyanto, G. 2008. *Kajian Karakteristik Campuran Hot Rolled Asphalt Akibat Penambahan Limbah Serbuk Ban Bekas*. Jurnal Teknik Sipil, 8 (2): 91–104.
- Syaripin. 2021. *Pemanfaatan Limbah Kaca sebagai Substitusi Agregat Halus Campuran Perkerasan Beraspal Laston AC-BC (Asphalt Concrete-Binder Course)*. Tesis tidak dipublikasikan. Program Magister Sistem dan Teknik Transportasi. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Xiao, F., Amirkhannian, S. N., Shen J., dan Putman, B. 2009. *Influences of Crumb Rubber Size and Type on Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures*. Construction and Building Materials, 23 (2): 1028–1034.
- Yamali, F. R. 2017. *Pengaruh Penambahan Limah Karet Ban Luar pada Lapis Tipis Aspal Pasir (Latasir) terhadap Karakteristik Marshall*. Jurnal Civronlit-Universitas Batanghari, 2 (2): 54–63.
- Zoorob, S. E. dan Suparma, L. B. 2000. *Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphalt Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastifelt)*. Cement and Concrete Composite, 22 (4): 233–242.