Karakteristik Marshall dari aspal termodifikasi *crepe rubber*

Marshall characteristics of crepe rubber modified asphalt

Bahrudin^{1*}, Arya Wiranata¹, Alfian Malik², Robby Kumar³

¹Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru 28923, Riau, Indonesia

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru 28923, Riau, Indonesia

³Balai Pengembangan Produk dan Standardisasi Industri, Pekanbaru 28281, Riau, Indonesia

*Penulis Korespondensi. Telp +62 852-7174-3938

E-mail: bahrudin@lecturer.unri.ac.id

Diterima: 9 April 2020

Direvisi: 3 Juli 2020

Disetujui: 15 Juli 2020

ABSTRACT

Natural rubber can be used as an asphalt additive in the form of latex, cup lump, and solid rubber. This study aimed to explore the effect of crepe rubber and antioxidant 1,2-dihydro-2,2,4-trimethyl-quinoline (TMQ) addition on the Marshall characteristics. Raw natural rubber in the form of cup lump was treated to obtain dry rubber content >95%, then the crepe masticated. The crepe rubber was melted first at 200 °C before mixed. The crepe rubber content was varied on 8, 10, and 12% (w/w). TMQ was added with levels of 1%, 2%, 3% (w/w). The samples were tested by using ASTM D6927 standard. The results showed the addition of crepe rubber to asphalt can increase the stability of asphalt in holding loads. The results were optimum with 10% crepe rubber, 2% TMQ, and 5.50% of asphalt, which had Marshall stability 1,403.96 kg, VFA 75.90%, VIM 3.07%, VMA 15.34%, flow 3.370 mm, and MQ 416.605 kg/mm.

Keywords: 1,2-dihydro-2,2,4-trimethyl-quinoline antioxidant, crepe rubber, Marshall stability, rubber asphalt.

ABSTRAK

Karet alam dapat dimanfaatkan sebagai aditif aspal, baik dalam bentuk lateks, *cup lump*, dan karet padat (*crumb rubber*, *block skim rubber*, dan lain-lain). Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh penambahan *crepe rubber* dan antioksidan 1,2-dihydro-2,2,4-trimethyl-quinoline (TMQ) terhadap karakteristik Marshall. Karet alam mentah dalam bentuk *cup lump* digiling menggunakan *creeper* hingga didapatkan *crepe rubber* dengan *dry rubber content* >95%, lalu dimastikasi menggunakan *open mill*. Selanjutnya, *crepe rubber* dilelehkan pada 200 °C sebelum dicampur dengan aspal pada 165 °C. Kadar *crepe rubber* dalam campuran aspal bervariasi, yaitu 8, 10, dan 12% (b/b). Selama proses pencampuran ditambahkan antioksidan TMQ dengan kadar 1%, 2%, 3% (b/b). Sampel aspal karet diuji karakteristik Marshall sesuai ASTM D6927. Hasil pengujian menunjukkan penambahan *crepe rubber* meningkatkan stabilitas aspal dalam menahan beban. Hasil optimum diperoleh dengan perlakuan 10% *crepe rubber*, 2% TMQ, dan 5,50% aspal, dimana memiliki stabilitas Marshall 1.403,96 kg, VFA 75,90%, VIM 3,07%, VMA 15,34%, *flow* 3,370 mm, dan MQ 416,605 kg/mm.

Kata kunci: antioksidan 1,2-dihydro-2,2,4-trimethyl-quinoline, aspal karet, *crepe rubber*, stabilitas Marshall.

PENDAHULUAN

Terjadinya kelebihan beban pada jalan dapat menyebabkan kerusakan konstruksi jalan (Pais *et al.*, 2013). Faktor lain yang mendukung terjadinya kerusakan pada konstruksi jalan beraspal adalah kinerja aspal yang menurun. Penurunan kinerja

aspal diakibatkan oleh iklim, genangan air pada permukaan jalan, kelembapan udara, UV, oksidasi, dan kualitas aspal yang jelek (Tauste *et al.*, 2018). Kualitas aspal memiliki peran penting dari semua faktor dalam menentukan kinerja fisik aspal setelah diaplikasikan. Oleh sebab itu, diperlukan

peningkatkan kualitas aspal dengan menambahkan karet alam. Aspal yang dimodifikasi dengan karet alam memiliki durabilitas tinggi. Namun, aspal yang dimodifikasi karet alam rentan terhadap pengusangan dini setelah diaplikasikan (Lin *et al.*, 2019). Jenis karet alam seperti lateks, *cup lump*, dan karet padat (*crumb rubber*, *crepe rubber*, *block skim rubber*, dll) merupakan jenis karet alam yang sering digunakan dalam memodifikasi aspal (Azahar *et al.*, 2019). Penggunaan karet alam dipilih dengan mempertimbangkan beberapa alasan, diantaranya untuk meningkatkan produksi karet Indonesia, jumlah karet yang tersedia sangat banyak, tidak menimbulkan emisi setelah digunakan sebagai aditif aspal, harga yang lebih kompetitif, dan performa aspal yang dihasilkan jauh lebih baik setelah penambahan karet alam.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk meninjau daya tahan aspal di lapangan setelah penambahan karet alam yang difokuskan pada karakteristik Marshall dan *rutting*. Penambahan 8% *cup lump* dalam aspal penetrasi 80/100 memberikan dampak peningkatan kinerja aspal modifikasi. Kinerja aspal modifikasi meningkat dari segi ketahanan terhadap *rutting* hingga mengurangi kedalaman *rutting* mencapai 41% dan turut meningkatkan ketahanan terhadap leleh (Azahar *et al.*, 2019). Hal tersebut tidak lepas dari peran penambahan *cup lump* dalam aspal yang meningkatkan kekakuan campuran aspal modifikasi dan peningkatan potensi adhesi (Azahar *et al.*, 2019; Shaffie *et al.*, 2017). Penambahan 5-7% lateks ke dalam aspal penetrasi 60/70 memberikan peningkatan pada stabilitas Marshall (Nursandah & Zaenuri, 2019; Prastanto *et al.*, 2019). Kandungan air yang tinggi dalam *cup lump* dan lateks menimbulkan percikan dan asap saat pencampuran ke dalam aspal sehingga diperlukan perlakuan khusus untuk mengurangi kadar air pada kedua bahan tersebut sebelum pencampuran dengan aspal, seperti penggilangan *cup lump* pada mesin *creeper* dan sentrifugasi untuk lateks.

Penggunaan karet alam yang memiliki kandungan air cukup tinggi membutuhkan pengolahan khusus sebelum dicampurkan dalam aspal. Namun, hal tersebut menjadikan penggunaan *cup lump* dan lateks tidak efisien. Oleh sebab itu, beberapa penelitian telah dilakukan dengan penggunaan karet padatan sebagai campuran dalam aspal. Karet padatan yang digunakan sebagai campuran aspal umumnya berjenis *crumb rubber* alam ataupun bekas pakai.

Penggunaan *crumb rubber* alam padat seperti *Standard Indonesian Rubber 20* (SIR 20) memberikan peningkatan dari segi stabilitas Marshall campuran aspal modifikasi, dimana stabilitas Marshall terbaik diperoleh pada penambahan 8-10% SIR 20 (Bahrudin *et al.*, 2019; Rochaei *et al.*, 2019; Sulaiman *et al.*, 2018). Penggunaan karet alam dalam bentuk padatan lebih praktis dan efisien dalam meningkatkan kualitas aspal modifikasi. Tetapi, penggunaan karet alam bentuk padatan menimbulkan masalah lain dalam pencampurannya. Salah satu masalah yang dihadapi adalah dibutuhkan waktu yang lama untuk proses pencampuran aspal dan karet hingga mencapai homogen (Ramadhan *et al.*, 2018). Selain itu, penggunaan karet SIR 20 menjadi tidak ekonomis dikarenakan harga karet SIR 20 yang terbilang cukup tinggi dibandingkan jenis karet alam konvensional lainnya.

Penggunaan karet alam secara umum sebagai aditif modifikasi aspal juga rentan terhadap degradasi, oksidasi, dan terbentuknya radikal bebas yang justru mempercepat pengusangan dini pada aspal termodifikasi karet alam. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan karet alam yang diolah dari *cup lump* menjadi *crepe rubber* untuk menekan biaya produksi menjadi lebih ekonomis. Pada proses pembuatan aspal modifikasi karet alam, diterapkan proses pelelehan karet alam padat sebelum pencampuran dengan aspal untuk mempercepat homogenisasi karet alam dalam aspal.

Penambahan antioksidan 1,2-dihidro-2,2,4-trimethyl-quinoline (TMQ) dilakukan pada proses pembuatan aspal modifikasi karet alam. Tujuan penambahan antioksidan TMQ adalah untuk meningkatkan ketahanan aspal modifikasi terhadap degradasi, oksidasi, terbentuknya radikal bebas, dan mencegah terjadinya pengusangan dini. Penelitian ini mempelajari pengaruh penambahan *crepe rubber* dan antioksidan TMQ terhadap karakteristik Marshall campuran aspal modifikasi.

BAHAN DAN METODE

Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan utama, yaitu aspal penetrasi 60/70, produksi PT. Pertamina (Persero). Bahan aditif yang digunakan untuk penelitian ini menggunakan karet alam yang diolah sendiri dari bahan dasar *cup lump* menjadi *crepe rubber*. *Cup lump* yang digunakan berasal

Tabel 1. Karakterisasi stabilitas Marshall.

Kode Sampel	Aspal (%)	<i>Crepe rubber</i> (%)	TMQ (%)	KAO (%)
A1	92	8	1	5,45
A2	92	8	2	5,45
A3	92	8	3	5,45
B1	90	10	1	5,50
B2	90	10	2	5,50
B3	90	10	3	5,50
C1	88	12	1	5,35
C2	88	12	2	5,35
C3	88	12	3	5,35

dari kebun karet di Kabupaten Kampar, Provinsi Riau, dan aditif lainnya yang digunakan yaitu antioksidan TMQ. Agregat yang digunakan dalam pembuatan sampel Marshall adalah agregat yang diolah oleh PT. Virajaya Riau Putra, Riau. Benda uji Marshall menggunakan komposisi agregat yaitu 15% *coarse aggregate*, 30% *medium aggregate*, 53% *fine aggregate*, dan 2% *filler cement*.

Peralatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan peralatan yang terdiri dari mesin *creeper*, *roll mill*, wadah pelelehan, wadah pencampuran, pemanas (kompor Rinnai Series RI-300HP), dan *hand mixer* 160MM 1600W EM16-160V merek Krisbow dengan diameter *paddle* 160 mm.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam dua tahap, yaitu pembuatan *crepe rubber* serta pencampuran dan karakterisasi aspal-*crepe rubber*. Pembuatan *crepe rubber* diawali dengan penggilingan *cup lump* pada mesin *creeper* hingga diperoleh kadar karet kering (KKK) >70%. Selanjutnya, *crepe rubber* setengah jadi dikeringkan tanpa terkena sinar matahari hingga berubah warna menjadi kecoklatan dan diperoleh KKK >95%. Setelah *crepe rubber* mencapai KKK >95%, selanjutnya *crepe rubber* dimastikasi untuk melunakkan karet dan membentuk *crepe rubber* dengan ketebalan 2 mm.

Sebelum memulai pencampuran aspal dan *crepe rubber*, terlebih dahulu dilakukan penimbangan aspal, *crepe rubber*, dan antioksidan TMQ dengan rasio yang telah ditentukan pada Tabel 1. Kemudian lembaran *crepe rubber* dipotong persegi dengan ukuran 1×1 cm. Potongan *crepe rubber* tersebut dilelehkan pada suhu 200 °C dan pada saat

bersamaan dilakukan pemanasan terhadap aspal dalam wadah yang berbeda pada suhu 165 °C. Selama proses pelelehan ditambahkan aspal untuk mempercepat proses pelelehan *crepe rubber*. Kemudian lakukan pendinginan terhadap lelehan *crepe rubber* hingga suhu turun menjadi 165 °C, dan selanjutnya lelehan *crepe rubber* dicampurkan dalam aspal pada suhu 165 °C dengan pengadukan 300 rpm selama 30 menit.

Selama pengadukan ditambahkan antioksidan TMQ sesuai dengan rasio yang telah ditentukan pada Tabel 1. Selanjutnya sampel aspal didinginkan sebelum pengujian karakterisasi aspal modifikasi dan diberi kode sesuai dengan Tabel 1. Karakterisasi sampel campuran aspal dan *crepe rubber* dilakukan dengan pengujian stabilitas Marshall (ASTM D6927) dengan kadar aspal optimum (KAO) yang dapat dilihat pada Tabel 1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aspal dengan pemodifikasi *crepe rubber* dalam aplikasinya untuk jalan raya harus memiliki kemampuan menahan beban lalu lintas tinggi dibandingkan aspal konvensional (Speight, 2015). Pendekatan kemampuan aspal modifikasi menahan beban lalu lintas dapat dilakukan dengan pengujian stabilitas Marshall skala laboratorium. Nilai stabilitas Marshall memberikan gambaran untuk melihat kemampuan aspal mengikat agregat dan mencegah terjadinya deformasi.

Gambar 1 menunjukkan peningkatan nilai stabilitas Marshall pada sampel A1, A2, A3, B1, dan B2, dibandingkan aspal konvensional. Nilai tertinggi stabilitas Marshall diperoleh sampel A2 dan B2 dengan nilai 1.426,53 kg dan 1.403,96 kg, atau naik 20-21% dari aspal konvensional yaitu 1.179,25 kg. Pergeseran nilai penetrasi menyebabkan pergeseran kadar aspal optimum

Gambar 1. Pengaruh nisbah *crepe rubber* dan TMQ terhadap stabilitas aspal modifikasi.

Gambar 2. Pengaruh kadar TMQ terhadap VFA.

untuk pencampuran. Tidak optimalnya kadar aspal dalam campuran mempengaruhi sifat kohesi dan adhesi dari aspal dalam mengikat agregat. Kadar optimum aspal yang tidak tepat mengakibatkan berkurangnya daya ikat agregat dan rentan mengalami deformasi ataupun *rutting* secara permanen (Irfan *et al.*, 2018).

Secara umum penambahan *crepe rubber* dalam campuran aspal modifikasi dapat mengeraskan pengikatan aspal dengan agregat yang ditunjukkan dengan peningkatan stabilitas Marshall. Namun penambahan *crepe rubber* yang melebihi optimum menyebabkan aspal bersifat lebih fleksibel dan tidak stabil saat diberi beban (Hassan *et al.*, 2019). Penambahan TMQ sama sekali tidak membantu menguatkan pengikatan aspal dengan agregat. Antioksidan TMQ hanya berperan mencegah terjadinya oksidasi pada aspal modifikasi. Selain itu, penambahan TMQ berlebih menurunkan stabilitas Marshall. Selain kadar aspal optimum, nilai stabilitas Marshall dipengaruhi oleh persentase rongga terisi aspal (*void filled aggregate*).

Persentase *void filled aggregate* (VFA) memiliki peranan penting dalam menjaga stabilitas campuran saat menahan beban. Gambar 2 menunjukkan peningkatan persentase VFA ketika nisbah *crepe rubber* meningkat. Namun, persentase VFA menurun pada penambahan 12% *crepe rubber*. Penurunan persentase VFA setelah penambahan 12% *crepe rubber* dikarenakan kadar aspal optimum yang ikut turun, seperti yang ditunjukkan Tabel 1. Kadar aspal optimum yang terlalu kecil akan membuat lapisan aspal yang menyelimuti agregat menjadi tipis dan menurunnya sifat adhesi dari aspal (Putri *et al.*, 2019). Penurunan

kadar optimum aspal mempengaruhi *filler* agregat untuk mengisi ruang diantara agregat. Persentase VFA tertinggi diperoleh sampel B dengan penambahan 10% *crepe rubber* dengan rata-rata persentase VFA 76,92%.

Penambahan *crepe rubber* dan TMQ dalam aspal memberikan perubahan yang cukup signifikan terhadap berat jenis dari aspal modifikasi seperti yang ditunjukkan Gambar 5. Peningkatan nisbah *crepe rubber* dan TMQ merubah berat jenis dari aspal modifikasi menjadi semakin menurun. Penurunan berat jenis menjadi penyebab turunnya persentase VFA (Movilla-Quesada *et al.*, 2019). Persentase VFA berkaitan erat dengan persentase rongga dalam campuran (*void in mixture*) dan rongga dalam mineral agregat (*void mineral aggregate*). Peningkatan persentase VFA dan penurunan nilai *void mineral aggregate* (VMA) berperan penting terhadap sifat mekanis campuran aspal. Gambar 3 memperlihatkan peningkatan *crepe rubber* menyebabkan penurunan persentase VMA. Persentase VMA terlalu besar juga tidak bagus untuk campuran aspal karena kestabilannya akan sangat rendah (Putri *et al.*, 2019).

Void in mixture (VIM) merupakan indikasi kekedapan aspal dan sifat pori aspal. VIM dipengaruhi oleh persentase VFA dalam campuran. Persentase VIM yang terlalu besar dapat menyebabkan aspal tidak kedap, rentan terjadi oksidasi, dan rentan mengalami deformasi saat diberi beban. Persentase VIM yang terlalu kecil juga memberikan dampak campuran menjadi kaku dan rentan retak, dikarenakan tidak adanya rongga untuk agregat bergeser. Persentase VIM terkecil diperoleh sampel B dengan rata-rata 3,30% seperti yang ditunjukkan Gambar 4. Rasio

Gambar 3. Pengaruh kadar TMQ terhadap VMA.

filler sangat mempengaruhi persentase VIM, dikarenakan *filler* memiliki peran penting mengisi rongga dan menciptakan campuran yang kepad. Pada sampel B terdapat rongga udara yang cukup besar, sehingga *filler* dan aspal tidak dapat mengisi ruang diantara butir agregat.

Stabilitas campuran aspal termodifikasi *crepe rubber* dipengaruhi beberapa faktor, diantaranya adalah kadar aspal optimum, gradasi dan komposisi agregat, penetrasi aspal yang digunakan, viskositas campuran, temperatur pencampuran, dan pemadatan (Siswanto *et al.*, 2017). Peningkatan stabilitas memberikan peningkatan durabilitas dalam menahan beban lalu lintas, peningkatan *anti-rutting* pada suhu tinggi, mengurangi resistensi terhadap kelelahan, dan mencegah pengusangan dini.

Kelelahan (*flow*) adalah indikator untuk meninjau deformasi vertikal campuran aspal modifikasi sebagai hasil penerapan pemuatan

Gambar 4. Pengaruh kadar TMQ terhadap VIM.

beban pada pengujian stabilitas. Hasil bagi Marshall atau *Marshall Quotient* (MQ) adalah rasio antara stabilitas dan *flow* yang menggambarkan fleksibilitas campuran dalam menahan beban. Nilai MQ yang besar mengindikasikan sifat campuran aspal yang keras, sedangkan nilai MQ yang kecil mengindikasikan campuran aspal lebih fleksibel (Putri *et al.*, 2019).

Gambar 6 memperlihatkan nilai *flow* meningkat seiring bertambahnya kadar nisbah *crepe rubber* dan TMQ. Nilai *flow* tertinggi diperoleh pada kadar *crepe rubber* 12% dan kadar TMQ 3%, dengan nilai *flow* sebesar 4,37%. Nilai *flow* yang meningkat mengindikasikan bahwa pengikat aspal memiliki kinerja yang tidak optimal. Nilai *flow* yang tinggi dalam kondisi pembebanan memiliki resistensi yang rendah terhadap deformasi permanen, seperti *rutting* ataupun *shoving* selama masa kerjanya (Ahmad *et al.*, 2019; Putri *et al.*, 2019). Namun nilai *flow* yang terlalu rendah cenderung bersifat

Gambar 5. Pengaruh kadar TMQ terhadap *bulk density* aspal termodifikasi.

Gambar 6. Pengaruh kadar TMQ terhadap *flow*.

Gambar 7. Pengaruh kadar TMQ terhadap MQ aspal modifikasi.

kaku dan rentan terhadap keretakan dalam kondisi pembebanan.

Nilai *Marshall Quotient* (MQ) diperlihatkan pada Gambar 7, nilai MQ tertinggi sebesar 416,605 kg/mm pada sampel kadar *crepe rubber* 10% dan kadar TMQ 2%. Nilai MQ yang tinggi mengindikasikan campuran aspal bersifat keras dan kaku. Secara keseluruhan nilai MQ berbanding terbalik dengan nilai *flow*. Nilai MQ pada Gambar 3b cenderung turun seiring meningkatnya kadar *crepe rubber* dan kadar TMQ. Namun hal tersebut tidak berlaku pada sampel dengan kadar *crepe rubber* 10% dan kadar TMQ 2% yang mengalami peningkatan nilai MQ.

Peningkatan nilai MQ dipengaruhi nilai stabilitas yang tinggi dan rendahnya nilai *flow*. Nilai MQ yang tinggi mengindikasikan aspal yang bersifat keras dan memiliki resistensi yang tinggi terhadap deformasi permanen, seperti *rutting*. Namun, MQ yang terlampaui tinggi sangat rentan terhadap keretakan, dikarenakan rendahnya fleksibilitas dari campuran aspal (Ahmad *et al.*, 2019; Putri *et al.*, 2019; Seyrek *et al.*, 2020). Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai *flow* dan MQ pada campuran aspal diantaranya kadar karet dalam campuran aspal, kadar aspal optimum (KAO), komposisi agregat, dan rongga pada campuran aspal agregat (Siswanto, 2019; Putri *et al.*, 2019).

KESIMPULAN

Penggunaan *crepe rubber* sebagai aditif aspal mampu meningkatkan performa aspal konvensional. Peningkatan yang paling terlihat adalah kemampuan menahan beban

yang ditunjukkan peningkatan nilai stabilitas Marshall. Tetapi penggunaan *crepe rubber* secara langsung sangat rentan terhadap pengusangan dini. Penambahan antioksidan TMQ dapat mencegah terjadinya pengusangan dini pada aspal termodifikasi. Namun, penambahan TMQ lebih dari 2% mempengaruhi sifat aspal menjadi lebih lembek dan kinerja aspal menjadi menurun. Sampel B2 merupakan kondisi paling optimum dalam penelitian ini dengan komposisi 10% *crepe rubber* dan 2% antioksidan TMQ. Sampel B2 memiliki stabilitas Marshall 1.403,96 kg dengan kadar aspal optimum 5,50%, VFA 75,90%, VIM 3,07%, VMA 15,34%, *flow* 3,370 mm, dan MQ 416,605 kg/mm. Peningkatan stabilitas aspal memberikan durabilitas lebih baik, peningkatan *anti-rutting* pada suhu tinggi, mengurangi resistensi terhadap kelelahan dan mencegah pengusangan dini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada DRPM Kemristekdikti dan LPPM Universitas Riau yang telah memberikan dukungan dana untuk pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Beddu, S., Hussain, S., Manan, A., & Itam, Z. (2019). Mechanical properties of hot-mix asphalt using waste crumbrer rubber and phenol formaldehyde polymer. *AIMS Materials Science*, 6(6), 1164–1175. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2019.6.1164>
- Azahar, N. M., Hassan, N. A., Jaya, R. P., Nor, H. M., Satar, M. K. I. M., Mashros, N., & Mohamed, A. (2019). Mechanical performance of asphalt mixture containing cup lump rubber. *Jurnal Teknologi*, 81(6), 179–185. <https://doi.org/10.11113/jt.v81.13857>
- Azahar, N. M., Hassan, N. A., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Puan, O. C., Shukry, N. A. M., & Hezmi, M. A. (2019). Engineering properties of asphalt binder modified with cup lump rubber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 220, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/220/1/012014>
- Bahrudin, Wiranata, A., Malik, A., Kumar, R., & Permata, D. S. (2019). Pembuatan aspal modifikasi polimer berbasis karet alam tanpa dan dengan mastikasi. *Prosiding Seminar Nasional Hasil Litbangyasa Industri II*, 2(2), 260–269.
- Hassan, N. A., Almusawi, A. A. A., Mahmud, M. Z. H., Abdullah, N. A. M., Shukry, N. A. M., Mashros, N., Jaya, R. P., & Yusoff, N. I. M. (2019). Engineering properties of crumb rubber modified dense-graded asphalt mixtures using

- dry process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 220, 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/220/1/012009>
- Irfan, M., Ali, Y., Ahmed, S., & Hafeez, I. (2018). Performance evaluation of crumb rubber-modified asphalt mixtures based on laboratory and field investigations. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(4), 1795–1806. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2729-2>
- Lin, P., Yan, C., Huang, W., Li, Y., Zhou, L., Tang, N., Xiao, F., Zhang, Y., & Lv, Q. (2019). Rheological, chemical and aging characteristics of high content polymer modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 207, 616–629. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.086>
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., Silva-Klein, L. T., Lastra-González, P., & Castro-Fresno, D. (2019). Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen. *Waste Management*, 87, 751–760. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.018>
- Nursandah, F., & Zaenuri, M. (2019). Penelitian penambahan karet alam (lateks) pada campuran laston ac-wc terhadap karakteristik Marshall. *Jurnal Civilla*, 4(2), 262–267.
- Pais, J. C., Amorim, S. I. R., & Minhoto, M. J. C. (2013). Impact of traffic overload on road pavement performance. *Journal of Transportation Engineering*, 139(9), 873–879. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000571](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000571)
- Prastanto, H., Firdaus, Y., Puspitasari, S., Ramadhan, A., & Falaah, A. F. (2019). Study of physical characteristic of rubberized hot mix asphalt based on various dosage of natural rubber latex and solid rubber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 509, 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012049>
- Putri, E. E., Idris, M., Makinda, J., & Gungat, L. (2019). Marshall properties of porous asphalt with gondorukem rubber addition. *Journal of Engineering Science and Technology*, 14(1), 167–180.
- Ramadhan, A., Cifriadi, A., Prastanto, H., & Kinasih, N. A. (2018). Effect of depolymerized block skim rubber (BSR) on the physical properties of modified asphalt. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, 34(2), 69–76. <http://doi.org/10.20543/mkkp.v34i2.4179>
- Rochaeti, Utami, R., & Febrianty, L. (2019). Karakteristik Marshall campuran asphalt concrete wearing course dengan modifikasi karet alam padat SIR 20. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 10, 615–623.
- Seyrek, E. S., Yalçın, E., Yilmaz, M., Kök, B. V., & Arslanoğlu, H. (2020). Effect of activated carbon obtained from vinasse and marc on the rheological and mechanical characteristics of the bitumen binders and hot mix asphalts. *Construction and Building Materials*, 240, 117921. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117921>
- Shaffie, E., Wan Hanif, W. M. M., Arshad, A. K., & Hashim, W. (2017). Rutting resistance of asphalt mixture with cup lumps modified binder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271, 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012056>
- Siswanto, H. (2019). Effect of latex to minimize the use of asphalt in asphalt concrete wearing course. *Materials Science Forum*, 961, 39–44. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.961.39>
- Siswanto, H., Supriyanto, B., Pranoto, Chandra, P. R., & Hakim, A. R. (2017). Marshall properties of asphalt concrete using crumb rubber modified of motorcycle tire waste. *AIP Conference Proceedings*, 1887, 020039. <https://doi.org/10.1063/1.5003522>
- Speight, J. G. (2015). *Asphalt materials science and technology*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Sulaiman, S., Utami, R., & Yulianti, N. P. (2018). Karakteristik asphalt concrete wearing course akibat penambahan karet alam padat SIR20 dengan metode eksperimental. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 9, 203–207.
- Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2018). Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, 192, 593–609. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.169>