

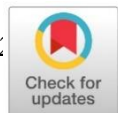


PENGARUH JENIS DAN KADAR ANTIOKSIDAN TERHADAP KARAKTERISTIK MARSHALL ASPAL KARET

Devika Faradina Siregar, Natasya Falda Dani, Arya Wiranata, Adrianto Ahmad, Syarfi Daud, Bahruddin*

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru, Riau – 28293
Korespondensi: e-mail: bahruddin@lecturer.unri.ac.id

Received: 10 November 2024; Revised: 18 November 2024; Accepted: 25 November 2024
Available online: 30 November 2024; Published regularly: November 2024



Abstrak

Infrastruktur jalan merupakan sarana penting untuk menghubungkan suatu daerah ke daerah lainnya dan sering mengalami kerusakan. Kerusakan yang terjadi berupa jalan berlubang, retak, bergelombang, penurunan bahu jalan, serta amblas. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh antioksidan dalam aspal karet menggunakan crumb rubber jenis SIR-20 terhadap karakteristik produk aspal karet. Pembuatan kompon diawali dengan penggilingan crumb rubber menggunakan open mill. Pelunakan kompon karet dibantu dengan penambahan aspal sebagai plasticizer, lalu ditambahkan antioksidan trimethyl quinolone (TMQ), butylated hydroxytoluene (BHT) dan polyethylene glycol (PEG). Proses pelelehan crumb rubber dilakukan pada suhu 160°C selama 1 jam dengan kecepatan pengadukan 500 rpm. Aspal modifikasi karet alam dilakukan pengujian marshall dan Fourier Transform Infrared Analysis (FTIR) pada keadaan short term dan long term aging. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan kadar antioksidan dalam aspal dapat meningkatkan stabilitas marshall dan didapatkan hasil terbaik pada penambahan antioksidan TMQ 2% sebesar 1877,8 kg pada short term dan 1948,2 kg pada long term, VFA sebesar 79,1% pada short term dan 79,4% pada long term, VMA sebesar 14,999% pada short term dan 14,956% pada long term, dan VIM sebesar 3,138% pada short term dan 3,089% pada long term.

Kata kunci : antioksidan, aspal karet, karet alam, marshall

<https://doi.org/10.29103/jtku.v13i2.19574>

1. Pendahuluan

Infrastruktur jalan adalah sarana penting untuk menghubungkan satu daerah ke daerah lain, untuk melakukan proses distribusi dan mendukung perekonomian (Hatmoko et al., 2019). Aspal yang dimodifikasi dengan menambahkan polimer



dapat meningkatkan sifat pengikat aspal (Zhu *et al.*, 2017). Salah satu contoh aspal modifikasi polimer adalah aspal karet, yang dapat mengurangi kerusakan jalan dan mengurangi biaya perawatan (Wiranata, 2021). Teknologi aspal modifikasi polimer menawarkan keunggulan dalam meningkatkan ketahanan alur (*rutting*) dan retak panas melintang (*thermal cracking*) serta menurunkan kerusakan akibat kelelahan (*fatigue damage*), pengelupasan (*stripping*) dan kepekaan pada suhu dibandingkan dengan aspal murni (Prastanto *et al.*, 2018).

Aspal adalah senyawa hidrokarbon berbentuk bahan padat atau semi padat, berwarna coklat gelap atau hitam pekat dan tersusun dari *asphaltenes* dan *maltenes* (Indriani *et al.*, 2022). Aspal modifikasi polimer adalah aspal yang dihasilkan dari modifikasi antara polimer alam atau polimer sintetis dengan aspal (Widi *et al.*, 2022). Karet alam yang diproses secara kimia untuk digunakan sebagai bahan tambah dalam aspal disebut aspal karet. Proses ini melibatkan penambahan karet alam ke dalam aspal untuk meningkatkan kualitas dan fungsi aspal. Karet alam merupakan polimer alami yang berpotensi digunakan sebagai bahan aditif aspal pengganti polimer sintetis impor (Pravianto, 2022). *Crumb rubber* digunakan sebagai aditif aspal dimana dapat meningkatkan kinerja aspal (Bahruddin *et al.*, 2021). *Crumb rubber* membutuhkan waktu dalam pencampuran sehingga dibutuhkan proses depolimerisasi dengan proses mastikasi (Bahruddin *et al.*, 2019).

TMQ merupakan antioksidan yang sangat baik dengan biaya relatif rendah dan memiliki berbagai kegunaan dalam proses pembuatan karet. Bereaksi dengan oksida atau ujung rantai polimer putus yang dihasilkan oleh reaksi dengan oksigen (Rohayzi *et al.*, 2023). Polietilen glikol (PEG) merupakan bahan aditif yang dapat meningkatkan atau memodifikasi sifat mekanik, kimia, dan fisik. Polietilen glikol adalah zat aditif yang berfungsi sebagai porogen, yaitu membantu meningkatkan keteraturan pori-pori sehingga lebih rapat dan akan menghasilkan pori yang bagus serta dapat mengatur struktur serta ukuran partikel pori (Syarifat *et al.*, 2015). Polietilen glikol digunakan sebagai aditif untuk meningkatkan viskositas larutan polimer, meningkatkan stabilitas dan

meningkatkan jumlah pori yang terbentuk (Noviawati *et al*, 2015). *Butylated hydroxytoluene* juga mengandung senyawa hidrokarbon sehingga dapat menghambat oksidasi dan menjaga kestabilan (Fitri, 2013). Berdasarkan beberapa penelitian tersebut menunjukkan bahwa modifikasi aspal dengan menggunakan karet alam memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kualitas aspal. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh *crumb rubber* jenis *Standard Indonesian Rubber* (SIR) 20 dengan penambahan antioksidan terhadap karakteristik produk aspal karet yang dihasilkannya.

2. Bahan dan Metode

Bahan

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal Penetrasi 60/70 dengan spesifikasi sesuai pada Tabel 1, produksi CV. Sejahtera Multi Usaha. Karet alam yang digunakan adalah *Crumb Rubber* dengan spesifikasi *Standard Indonesian Rubber* 20, produksi PT. Nata Kimindo Pratama, Provinsi DKI Jakarta. Asam stearat, *zinc oxyde*, $C_{14}H_{33}NO_4S$ (MTBS), *2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline* (TMQ), polietilen glikol (PEG), dan *butylated hydroxytoluene* (BHT), produksi PT. Nata Kimindo Pratama, Provinsi DKI Jakarta. Agregat yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan agregat olahan dari PT. Riau Mas Bersaudara, Provinsi Riau. Spesifikasi agregat yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi Aspal Penetrasi Aspal 60/70

Karakteristik	Standar Uji	Hasil Uji
Penetrasi pada 25°C (mm)	SNI-2456-2011	53,88
Titik Lembek (°C)	SNI-2434-2011	53,45
Kehilangan berat, TFOT (%)	SNI-06-2440-1991	0,118
Daktalitas (cm)	SNI-2432-2011	>160

Tabel 2. Komposisi Agregat Pengujian Stabilitas Marshall

Karateristik	Standar Uji	Hasil Uji
<i>Coarse Aggregate</i> (%)	SNI-03-4142-1996	1,02
<i>Medium Aggregate</i> (%)	SNI-03-4142-1996	8,42
<i>Fine Aggregate</i> (%)	SNI-03-4142-1996	13,44

Persiapan sampel aspal modifikasi

Pembuatan kompon *crumb rubber* diawali dengan penggilingan *crumb rubber* pada mesin *open mill* untuk dimastikasi. Pelunakan *crumb rubber* dibantu dengan penambahan aspal sebagai *plasticizer*, digunakan aspal 4 phr. Setelah *crumb rubber* menjadi lunak, ditambahkan antioksidan (TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1% dan PEG 2%) dari berat *crumb rubber*. Proses pelelehan *crumb rubber* dilakukan pada suhu 160°C selama 1 jam. Selama proses pelelehan *crumb rubber* sejumlah aspal ditambahkan dengan rasio 1:1 terhadap berat *crumb rubber*. Selanjutnya lelehan *crumb rubber* dan aspal diumpungkan kedalam wadah pencampuran dengan rasio 1:9. Suhu pencampuran dan pengadukan diatur konstan pada suhu 160°C dengan kecepatan pengadukan 500 rpm. Pengadukan aspal dan lelehan *crumb rubber* berlangsung 1 jam.

Pembuatan Benda Uji Marshall dan Karakterisasi Marshall

Aspal antioksidan dicampurkan ke dalam aspal karet pada suhu 160°C hingga homogen. pembuatan benda uji marshall dilakukan setiap pencampuran aspal karet antioksidan 1,2 phr dengan agregat dan dilakukan proses pemadatan menggunakan benda uji yang telah dipanaskan. Karakterisasi sampel campuran aspal karet yang dilakukan yaitu pengujian Stabilitas marshall, yang terdiri dari VFA, VMA, VIM, *Flow* dan MQ.

Sifat-sifat Campuran	Laston		
	Lapis Aus	Lapis Antara	Fondasi
Jumlah tumbukan per bidang	75		112 ⁽³⁾
Rasio partikel lolos ayakan 0,075mm dengan kadar aspal efektif	Min.	0,6	
	Maks.	1,2	
Rongga dalam campuran (%) ⁽⁴⁾	Min.	3,0	
	Maks.	5,0	
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min.	15	14
			13
Rongga Terisi Aspal (%)	Min.	65	65
Stabilitas Marshall (kg)	Min.	800	
		2	1800 ⁽³⁾
Pelelehan (mm)	Min.	3	
	Maks.	4	6 ⁽³⁾
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C ⁽⁵⁾	Min.	90	
Rongga dalam campuran (%) pada kepadatan mencubal (refusal) ⁽⁶⁾	Min.	2	

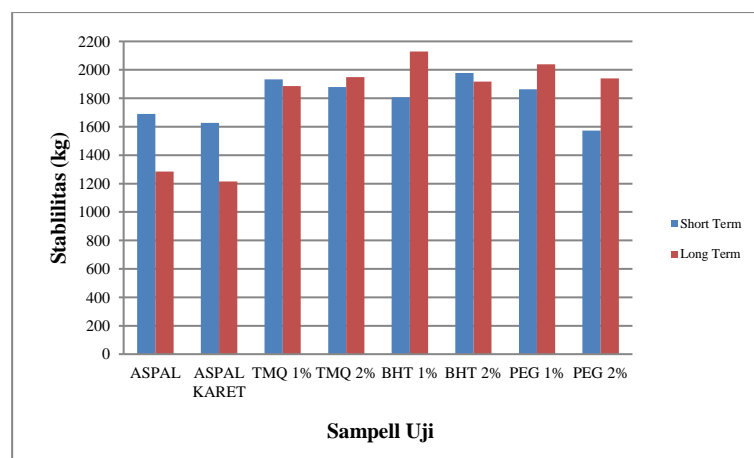
Gambar 1. Spesifikasi Uji Stabilitas Marshall (Standar Bina Marga 2018 Revisi 2, 2020)

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Stabilitas Marshall Aspal Karet

Stabilitas merupakan besar nilai beban yang diterima campuran beton aspal hingga terjadi kelelahan plastis atau kekuatan aspal beton untuk menahan deformasi akibat besarnya beban lalu lintas yang berada di atasnya tanpa mengalami perubahan bentuk secara tetap (Ibrahim et al., 2020).

Nilai stabilitas pada Gambar 2 menunjukkan bahwa sampel aspal, aspal karet TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1%, dan PEG 2% memenuhi persyaratan standar spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 untuk aspal modifikasi yaitu 800-1800 kg untuk pengujian *short term* maupun *long term*. Gambar 4.1 menunjukkan peningkatan stabilitas pada sampel TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1%, serta mengalami penurunan pada sampel aspal karet dan PEG 2%. Penurunan ini dapat dihubungkan dengan viskositas masing-masing jenis aspal. Aspal biasa memiliki viskositas yang lebih rendah, yang memungkinkan aliran dan pengisian rongga agregat (*void filled asphalt*) yang lebih baik selama proses pemadatan. Aspal karet memiliki viskositas yang lebih tinggi yang menyebabkan kesulitan dalam proses pemadatan dan pengisian rongga (Widiyanto & Faishal, 2021).

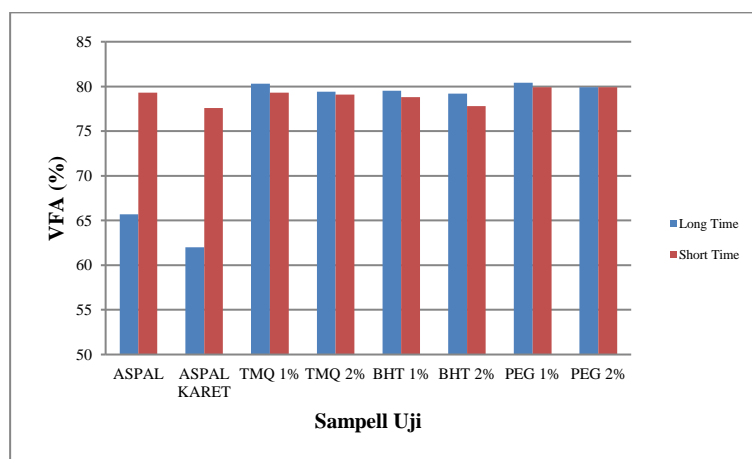


Gambar 2. Nilai Stabilitas Marshall Aspal Modifikasi Karet Alam dan Antioksidan

Nilai VFA pada Gambar 3 menunjukkan bahwa sampel aspal, TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1%, dan PEG 2% memenuhi persyaratan standar spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 untuk aspal modifikasi yaitu minimum 65% untuk pengujian *short term* dan *long term*. Sampel aspal karet tanpa penambahan antioksidan pengujian *short term* memenuhi syarat sedangkan *long term* tidak memenuhi syarat standar minimum. Nilai VFA tertinggi terjadi pada kondisi *long term* PEG 1% sebesar 80,4% dan terendah pada kondisi *long term* aspal karet sebesar 62%. Aspal antioksidan mampu mengisi rongga dalam

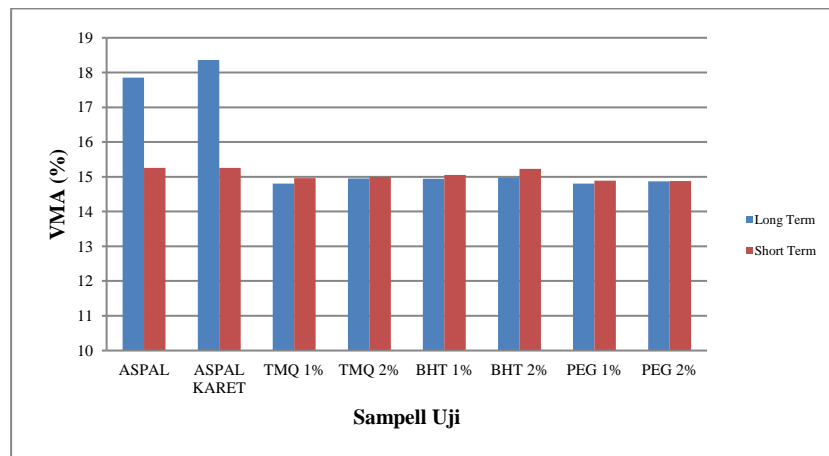
agregat sehingga ikatan kohesi dan adhesi aspal dengan agregat semakin kuat dan membuat nilai stabilitas yang tinggi. Hal ini menyebabkan aspal lebih efektif mengisi rongga, sehingga nilai VFA memenuhi standar (Bahruddin et al., 2019).

Nilai VFA yang semakin tinggi menunjukkan bahwa banyaknya rongga yang terisi aspal sehingga kedekatan campuran terhadap air dan udara akan tinggi, tetapi nilai VFA yang terlalu kecil menyebabkan campuran tidak kedap terhadap air dan udara karena lapisan film aspal akan menjadi tipis serta mudah retak jika menerima penambahan beban sehingga lapis perkerasan tidak tahan lama (Nainggolan, 2020).



Gambar 3. Persentase VFA Aspal Modifikasi Karet Alam dan Antioksidan

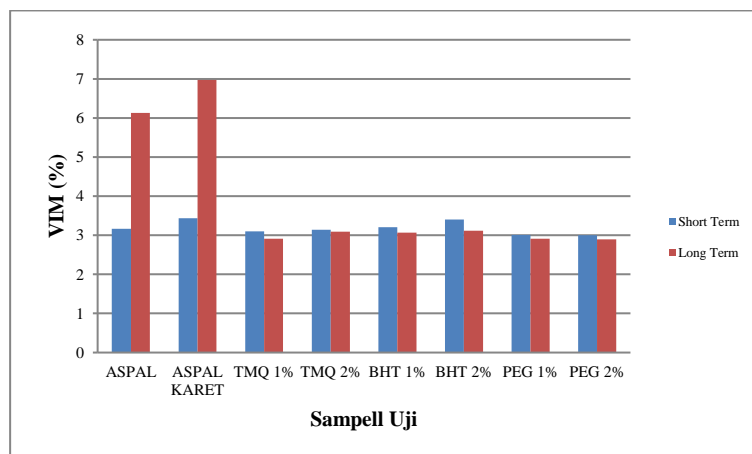
Gambar 4 menunjukkan bahwa persentase *Void In Mineral Agregate* (VMA) pada sampel aspal, TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1%, dan PEG 2% memenuhi standar spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 untuk aspal modifikasi yaitu sebesar 14-15% untuk pengujian *short term* dan *long term*. Sampel aspal serta aspal karet juga memenuhi standar minimum. Setelah pengujian *short time* yaitu selama 4 jam diperoleh persentase paling minimum dengan pada kadar antioksidan PEG 2% yaitu 14,876%.



Gambar 4. Persentase VMA Aspal Modifikasi Karet Alam dan Antioksidan

Setelah pengujian *long term* selama 120 jam, diperoleh persentase paling minimum dengan pada kadar antioksidan TMQ 1% dan PEG 1% yaitu 14,802%. Nilai VMA yang terlalu rendah akan mempengaruhi durabilitas aspal akibat dari lapisan pengikat aspal dan agregat yang terlalu tipis sehingga aspal mudah terlepas dan lapis perkerasan menjadi rusak. Namun nilai VMA yang terlalu besar juga akan menyebabkan nilai stabilitas yang rendah, dan membuat lapis film aspal menjadi tebal (Bahruddin *et al.*, 2020; Muldiyanto, 2011).

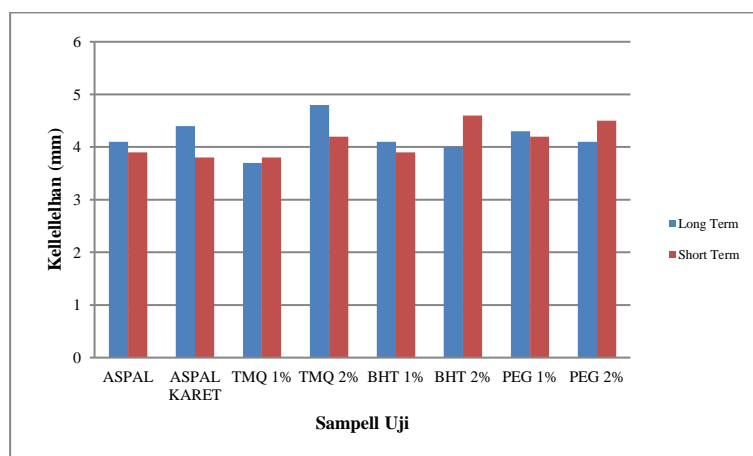
Gambar 5 menunjukkan bahwa persentase *Void In The Mix* (VIM) pada sampel aspal, TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1%, dan PEG 2% memenuhi standar spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 untuk aspal modifikasi yaitu sebesar 3-5% untuk pengujian *short term*. Persentase VIM yang tinggi dan melewati standar menyebabkan campuran aspal menjadi tidak kedap, rentan terhadap oksidasi, dan rentan mengalami deformasi saat diberi beban. Udara yang mengoksidasi aspal menyebabkan aspal menjadi tipis dan kohesi aspal berkurang. Okidasi yang terjadi oleh udara menyebabkan terjadinya lepasan butiran dan air akan melarutkan bagian aspal yang tidak teroksidasi. Nilai VIM paling maksimum dengan kadar antioksidan BHT 2% sebesar 3,403% dan persentase paling minimum dengan kadar antioksidan PEG 2% yaitu 2,999% (Hamzah *et al.*, 2016).



Gambar 5. Persentase VIM Aspal Modifikasi Karet Alam dan Antioksidan

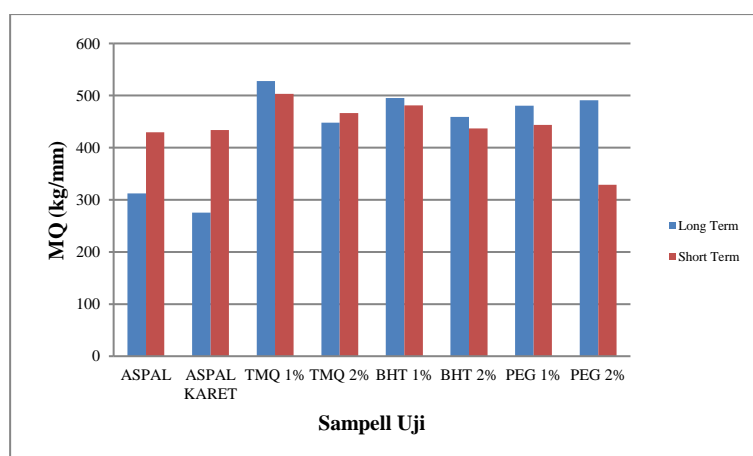
Pada pengujian *long time* terdapat beberapa sampel yang tidak memenuhi standar diantaranya TMQ 1%, PEG 1%, dan PEG 2%, diperoleh persentase paling minimum dengan kadar antioksidan TMQ 1% dan PEG 1% yaitu 2,914%. Hal ini disebabkan rongga yang terisi oleh aspal sehingga campuran aspal menjadi padat, kaku, dan mudah mengalami keretakan (*cracking*) (Bahruddin *et al.*, 2020; Wardana *et al.*, 2020; Weimintoro *et al.*, 2021).

Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai kelelehan pada sampel aspal, TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1%, dan PEG 2% memenuhi standar spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 untuk aspal modifikasi yaitu sebesar 2 mm untuk pengujian *short term* dan *long term*. Nilai kelelehan minimum dengan antioksidan TMQ 1% sebesar 3,7 mm pada pengujian *long term*. Nilai *flow* yang tergolong rendah akan menyebabkan campuran menjadi lebih kaku dan mudah retak. Nilai *flow* yang minimum diperlukan untuk memastikan campuran memiliki kandungan pengikat aspal yang cukup dan menghasilkan campuran yang lebih kaku sehingga dapat menahan beban. Sementara itu, nilai *flow* akan mempengaruhi campuran aspal menjadi lebih plastis dan elastis (Bahruddin *et al.*, 2020; Wardana *et al.*, 2020; Putri *et al.*, 2019).



Gambar 6. Nilai Kelelehan (*flow*) Aspal Modifikasi Karet Alam dan Antioksidan

Marshall Quotient (MQ) adalah hasil bagi antara nilai stabilitas Marshall (MS) dan nilai leleh Marshall (MF). *Marshall Quotient* digunakan sebagai indikator untuk menilai kinerja campuran aspal panas (Bahruddin *et al.*, 2020).



Gambar 7. Nilai MQ Aspal Modifikasi Karet Alam dan Antioksidan

Nilai MQ pada Gambar 7 menunjukkan bahwa TMQ 1% merupakan sampel dengan nilai MQ tertinggi sedangkan sampel aspal karet merupakan sampel dengan nilai MQ terendah. Nilai MQ yang tinggi dipengaruhi oleh gesekan antarpartikel dan kunci yang terjadi antar partikel (gaya kohesi antara partikel aglomerasi dan campuran zat penyusun). Peningkatan nilai MQ juga dipengaruhi oleh nilai stabilitas yang tinggi dan *flow* yang rendah. Nilai MQ yang terlalu tinggi sangat rentan terhadap keretakan karena elastisitas campuran aspal yang

rendah. Faktor yang mempengaruhi *flow* dan MQ yaitu kandungan karet dalam campuran aspal, KAO, komposisi agregat, serta rongga pada total campuran aspal agregat (Bahruddin *et al*, 2020; Putri *et al.*, 2019).

4. Simpulan

Stabilitas aspal karet meningkat pada sampel TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1%, namun mengalami penurunan pada sampel PEG 2%. Penambahan PEG dapat mengurangi kekentalan aspal, sehingga ikatan antara aspal dan agregat menjadi lebih lemah. Sampel aspal karet tanpa penambahan antioksidan pengujian *short term* memenuhi syarat sedangkan *long term* tidak memenuhi syarat standar minimum. Sampel aspal, aspal karet TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1%, dan PEG 2% memenuhi persyaratan standar spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 untuk aspal modifikasi untuk kategori stabilitas, VMA. Sampel aspal, TMQ 1%, TMQ 2%, BHT 1%, BHT 2%, PEG 1%, dan PEG 2% memenuhi persyaratan standar spesifikasi umum Bina Marga 2018 revisi 2 untuk aspal modifikasi kategori VFA dan VIM.

5. Daftar Pustaka

1. Bahruddin, 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.
2. Bahruddin, Helwani, Z. dan Wiranata, A. 2021. *Pengantar Teknologi Aspal Karet*. Unripress.
3. Bahruddin, B., Wiranata, A., Malik, A., & Kumar, R. (2020). Karakteristik Marshall dari aspal termodifikasi crumb rubber. *Indonesian Journal of Industrial Research*, 36(2), 57-64.
4. Fitri, N. (2013). Butylated hydroxyanisole sebagai Bahan Aditif Antioksidan pada Makanan dilihat dari Perspektif Kesehatan. *Jurnal Kefarmasian Indonesia*, 4(1), 41–50.
5. Hamzah, R. A., Kaseke, O. H., & Manopo, M. M. (2016). Pengaruh Variasi Kandungan Bahan Pengisi Terhadap Kriteria Marshall Pada Campuran Beraspal Panas Jenis Lapis Tipis Aspal Beton – Lapis Aus Gradasi Senjang. *Jurnal Sipil Statik*, 4(7), 447–452.

6. Hatmoko, J. U. D., Setiadji, B. H., & Wibowo, M. A. (2019). Investigating causal factors of road damage: a case study. *MATEC Web of Conferences*, 258, 02007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925802007>
7. Ibrahim, B., Wiranata, A., & Malik, A. (2020). The effect of addition of antioxidant 1,2-dihydro-2,2,4-trimethyl-quinoline on characteristics of crepe rubber modified asphalt in short term aging and long term aging conditions. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(20), 1–23. <https://doi.org/10.3390/app10207236>
8. Indriani, C. N., Purwandito, M., & Alamsyah, W. (2022). Pemanfaatan Ban Bekas Sebagai Bahan Tambah Campuran Aspal Pada Pekerasan Jalan AC-WC Terhadap Nilai Marshall. *Bisnis, Sosial dan Teknologi*, 12(1), 29–36.
9. Muldiyanto, A. (2011). Uji Stabilitas Terhadap Flow Campuran Aspal Dengan Marshall Test (Kadar Aspal 5 % , Penetrasi 60/70). *Jurnal Pengembangan Rekayasa Dan Teknologi*, 13(1), 11. <https://doi.org/10.26623/jprt.v14i1.535>
10. Nainggolan, K. (2020). Analisa Karakteristik Perkerasan Jalan Aspal Karet Lapisan Ac- Wc Dengan Menggunakan Filler Yang Berbeda Terhadap Nilai Marshall. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Medan*.
11. Noviawati, R. Putri, A. dan Sukanta. 2015. Sintesis Indikator Strip Formalin dengan Penambahan PEG. *Prosiding Penelitian SPeSIA Unisba*, ISSN:2460-6472. <https://karyailmiah.unisba.ac.id/index.php/farmasi/article/viewFile/1580/pdf>
12. Prastanto, H., Firdaus, Y., Puspitasari, S., Ramadhan, A., & Falaah, A. F. (2018). Sifat Fisika Aspal Modifikasi Karet Alam Pada Berbagai Jenis Dan Dosis Lateks Karet Alam. *Jurnal Penelitian Karet*, 36(1), 65–76. <https://doi.org/10.22302/ppk.jpk.v36i1.444>
13. Pravianto, W. (2022). Teknologi Aspal Karet Alam Padat Menjawab Kebutuhan Aspal Modifikasi Berbahan Karet Alam Padat Asli Indonesia. *Prosiding KRTJ HPJI*, 12-12.
14. Putri, E. E., Idral, M., Makinda, J., & Gungat, L. (2019). Marshall properties of porous asphalt with gondrukem rubber addition. *Journal of Engineering Science and Technology*, 14(1), 167–180.
15. Rohayzi, N. F., Katman, H. Y. B., Ibrahim, M. R., Norhisham, S., & Rahman, N. A. (2023). Potential Additives in Natural Rubber-Modified Bitumen: A Review. *Polymers*, 15(8), 1–23. <https://doi.org/10.3390/polym15081951>

16. Wardana, H. W., Mahardi, P. U. R. W. O., & Risdianto, Y. (2020). Penentuan Kadar Aspal Optimum (Kao) Dalam Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (Ac-Wc) Dengan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat. *Rekayasa Teknik Sipil*, 1(2).
17. Weimintoro, Sari, R. N. A., Hermawan, O. H., & Santoso, T. H. (2021). Pengaruh Lama Perendaman Benda Uji AC-WC Terhadap Nilai Stabilitas dan Nilai Kelelahan (Flow) dengan Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018. *SIGMA: Jurnal Teknik Sipil*, 1(2), 17–28. <https://journal.ummat.ac.id/index.php/sigma/article/view/5231>
18. Widi, P., Ghozali, Z., Amariansah, W., & Chasanah, U. (2022). Analisis Perbandingan Aspal AC-WC Dengan Bahan Perikat Modified Asbuton Granural B 5/20 Dan Aspal Emulsi JAP 57. *Neo Teknika*, 8(1), 34-38.
19. Widiyanto, B. W., & Faishal, M. I. (2021). Perubahan Karakteristik Aspal Pen 60/70 dengan Substitusi Getah Karet Alam Pangkalan Balai, Sumatera Selatan. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 6(3), 143. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v6i3.143>
20. Wiranata, A. (2021). Penentuan Stabilitas Penyimpanan Aspal Modifikasi Berbasis Karet Alam Padat Jenis Crumb Rubber. *Journal of Bioprocess, Chemical and Environmental Engineering Science*, 2(2), 1–14. <https://doi.org/10.31258/jbchees.3.1.1-14>
21. Zhu, J., Balieu, R., Lu, X., & Kringos, N. (2017). Numerical Prediction of Storage Stability of Polymer-Modified Bitumen: A Coupled Model of Gravity-Driven Flow and Diffusion. *Transportation Research Record*, 2632(1), 70-78. <https://doi.org/10.3141/2632-08>