

Penentuan Stabilitas Penyimpanan Aspal Modifikasi Berbasis Karet Alam Padat Jenis Crumb Rubber

Arya Wiranata^a, Bahruddin^b, Ida Zahrina^c

^aTeknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28291, Indonesia

^bTeknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28291, Indonesia

^cTeknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28291, Indonesia

INFO ARTIKEL

Keywords:

crumb rubber, natural rubber modified asphalt, softening point, storage stability, sulfur

*corresponding author:

Email: arya.wiranata7066@grad.unri.ac.id

ABSTRACT

The development of road infrastructure in Indonesia is very rapid to keep pace with the growth of vehicles. However, the structure of road pavements in Indonesia is not optimal and causes various problems due to overload and Indonesia's climate. Therefore, it is necessary to increase the performance of asphalt binders with additives such as natural rubber or better known as natural rubber modified asphalt. This study examines the effect of natural rubber content (crumb rubber standard Indonesian rubber 20), sulfur additive content, storage temperature, and storage time on the phase stability of natural rubber modified asphalt. Making crumb rubber modified asphalt samples begins with the mastication of crumb rubber in an open mill. Next, crumb rubber was melted at 200°C and mixed in asphalt with 8, 10, and 12% levels. The last stage is to test the stability of modified asphalt storage at a temperature of 160°C for 48 hours. The results showed that modified asphalt with various levels of rubber experienced storage stability problems after 48 hours. The addition of sulfur additives did not significantly affect storage stability. The optimum addition of natural rubber at 10% crumb rubber content with the difference in softening point ($T_{bottom} - T_{top}$) reached 11.6°C.

1. PENDAHULUAN

Aspal sebagai jaringan pengikat pada struktur perkerasan jalan dan kemampuannya dalam menahan beban, retak dan rutting, secara langsung dipengaruhi oleh sifat mekanik aspal. Oleh sebab itu, sifat mekanik aspal sangat mempengaruhi kinerja dan kualitas perkerasan jalan. Namun, aspal dengan sifat mekanik yang ada saat ini tidak lagi mampu mengimbangi beban yang diterima oleh struktur perkerasan jalan. Faktor yang mempengaruhinya adalah jumlah kendaraan yang terus meningkat, mobilitas kendaraan yang tinggi dan iklim yang semakin panas akibat pemanasan global. Hal tersebut menyebabkan semakin pendeknya masa pakai perkerasan jalan dan memperpendek siklus perawatan (*maintenance*).

Untuk meningkatkan masa pakai dan daya tahan perkerasan jalan, dapat dimulai dengan meningkatkan sifat mekanik aspal sebagai jaringan pengikat melalui proses modifikasi. Modifikasi paling umum dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik aspal adalah dengan penambahan polimer. Modifikasi aspal dengan penambahan polimer pada umumnya mempertimbangkan potensi polimer yang tersedia di negara tersebut. Di kawasan asia tenggara pada umumnya memanfaatkan karet alam sebagai sumber polimer yang berpotensi digunakan sebagai pemodifikasi aspal. Berbagai jenis karet alam (*lateks*, *lump cup*,

crumb rubber, *crepe rubber*) telah dilaporkan dapat meningkatkan sifat mekanik dari aspal yang dimodifikasi.

Lateks ataupun *lump cup* sangat umum digunakan sebagai pemodifikasi aspal yang menghasilkan peningkatan kekerasan aspal seiring meningkatnya kadar lateks dalam aspal. Penambahan lateks dan *lump cup* paling optimum pada kadar 8-12%, hal tersebut memberikan dampak terhadap meningkatnya sifat-sifat aspal dalam hal kerentanan *rutting* dan ketahanan terhadap beban (Abdulrahman et al., 2019; Shaffie et al., 2017a, 2018). Namun, kandungan air yang masih cukup tinggi pada dua bahan tersebut menimbulkan masalah dalam pencampurannya. Kandungan air yang tinggi menimbulkan *asphalt splash* saat dicampurkan dalam aspal panas dan hal tersebut meningkatkan resiko keselamatan.

Berbagai metode telah dilakukan untuk dapat mencampurkan karet alam sebagai pemodifikasi aspal yang efisien dan aman saat dicampurkan. Salah satu metode tersebut adalah menggunakan karet alam padat dengan nilai *dry rubber content* yang tinggi sebagai bahan baku utama pemodifikasi aspal. Karet alam padat yang umum digunakan sebagai pemodifikasi aspal berjenis *crumb rubber*, *technical specified rubber*, ataupun *crepe rubber*. Disamping keunggulan penggunaan karet alam padat, terdapat beberapa kekurangan dalam penggunaan karet alam padat sebagai pemodifikasi aspal diantaranya membutuhkan suhu yang lebih tinggi, waktu yang lebih lama dan kecepatan pengadukan tinggi untuk meningkatkan dispersi karet alam dalam aspal.

Penggunaan karet alam padat sebagai pemodifikasi aspal paling optimum berkisar pada kadar 8-10%. Karakteristik aspal modifikasi karet alam padat ini tidak jauh berbeda dari penggunaan polimer jenis lainnya, aspal modifikasi karet alam padat memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi, resisten *rutting*, kekuatan dalam menahan beban meningkat, dan peningkatan resisten terhadap penuaan (Ibrahim et al., 2020; Prastanto et al., 2019). Namun, penggunaan berbagai jenis karet alam pada dasarnya memiliki masalah utama yaitu ketidakstabilan dalam penyimpanan (*Instability Storage*). Ketidakstabilan penyimpanan aspal modifikasi polimer disebabkan kompatibilitas yang buruk dan perbedaan densitas yang cukup besar antara polimer dan aspal. Akibat dari ketidakstabilan penyimpanan aspal modifikasi polimer akan terjadi pemisahan yang membentuk sisi fasa kaya polimer (*Polymer Rich-Phase*) dan pada sisi lainnya akan membentuk fasa kaya aspal (*Asphalt Rich-Phase*). Pemisahan fasa pada aspal modifikasi polimer dipengaruhi oleh banyak faktor diantaranya gravitasi, difusi, densitas, viskositas. Namun, suhu penyimpanan menjadi faktor utama yang mempengaruhi pemisahan fasa antara aspal dan polimer. (Ding et al., 2017; Porto et al., 2019; Zhu et al., 2017).

2. METODOLOGI

2.1 Alat dan Bahan

Pembuatan sampel aspal modifikasi karet alam membutuhkan peralatan sebagai berikut: mesin roll mill, wadah pelelehan, wadah pencampuran, pemanas RI-300HP merek Rinnai, hand mixer 160MM 1600W EM16-160V merek Krisbow dengan diameter paddle 160 mm, *thermometer gun*. Sedangkan dalam pengujian aspal modifikasi karet alam membutuhkan alat sebagai berikut, penetrometer, satu unit alat pengujian titik lembek (gelas beaker, cincin, bola baja 3,5 g $\pm$ 0,05 g, pemanas dan termometer), oven, tabung pengujian stabilitas penyimpanan. Bahan yang digunakan dalam pembuatan sampel aspal modifikasi karet alam penelitian ini yaitu, aspal penetrasi 60/70 produksi pertamina dengan spesifikasi ditunjukkan

pada Tabel 1, *Crumb Rubber Standard Indonesian Rubber 20 (SIR 20) off grade* produksi dari daerah Kemuning, Provinsi Sumatera Selatan, sulfur, dan antioksidan trimetil quinoline (TMQ).

Tabel 1. Spesifikasi Aspal Penetrasi Aspal 60/70

Karakteristik	Standar Uji	Hasil Uji
Penetrasi pada 25°C (dmm)	SNI 2456:2011	70,2
Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	48
Kehilangan berat, TFOT (%)	SNI 06-2440-1991	0,365
Penetrasi setelah TFOT (dmm)	SNI 2456:2011	64,7
Daktilitas (cm)	SNI 2432:2011	110
Stabilitas Marshall (kg)	ASTM D6927	1160

2.2 Metodologi

2.2.1 Persiapan Alat dan Bahan

Proses pencampuran antioksidan dan aditif dalam karet sering disebut dengan pembuatan kompon karet. Pembuatan kompon karet diawali dengan memotong *crumb rubber SIR 20* terlebih dahulu menggunakan *bale cutter* untuk menyesuaikan besaran satuan lot berat proses di *open mil / roll mill*. Setelah dipotong sesuai besaran lotnya, potongan *crumb rubber* lalu diumpankan ke *open mill* untuk dimastikasi (dilunakkan). Proses mastikasi dalam *open mill* berlangsung sekitar 5-30 menit pada suhu ruang. Proses mastikasi biasanya membutuhkan waktu yang cukup lama sampai karet tersebut menjadi lunak. Pada umumnya proses pelunakan karet dapat dipersingkat dengan penambahan agen *plasticizer*. Dalam penelitian ini aspal digunakan sebagai *plasticizer* menggantikan agen *plasticizer* yang umum digunakan sebanyak 2 phr. Aspal dipilih sebagai agen *plasticizer* karena dapat melunakkan karet lebih cepat dan dapat menekan biaya produksi aspal modifikasi karet alam. Setelah *crumb rubber* menjadi lebih lunak, kemudian ditambahkan 2phr antioksidan TMQ ke dalam karet dengan cara ditaburkan saat proses mastikasi berlangsung. Antioksidan TMQ dipilih dalam pembuatan kompon *crumb rubber* karena kinerja antioksidan TMQ sangat spesifik terhadap karet alam. Setelah seluruh bahan-bahan aditif tadi tercampur rata dengan *crumb rubber*, kompon dikeluarkan dengan ketebalan 3-5 mm. Selanjutnya kompon dipindah ke rak-rak penyimpan, menunggu proses selanjutnya.

2.2.2 Produksi Aspal Modifikasi Karet Alam

Pencampuran kompon *crumb rubber SIR 20* dan aspal dilakukan dengan metode *wet process*. Pada Metode *wet process* ini, kompon *crumb rubber SIR 20* dicampurkan dalam bentuk lelehan untuk mempercepat proses homogenisasi. Proses pelelehan *crumb rubber* dilakukan pada suhu 200°C dan selama proses pelelehan *crumb rubber SIR 20* sejumlah aspal ditambahkan dengan rasio 1 : 1 terhadap berat *crumb rubber SIR 20*. Tujuan penambahan aspal dalam proses pelelehan *crumb rubber SIR 20* adalah untuk mempercepat proses

pelelehan. Selanjutnya lelehan *crumb rubber SIR 20* dan aspal diumpkan ke dalam wadah pencampuran dengan rasio 1 : 4 untuk variasi kadar karet 8, 10 dan 12%. Suhu pencampuran dan pengadukan diatur konstan pada suhu $160 \pm 5^\circ\text{C}$ dengan kecepatan pengadukan 500 rpm. Pengadukan aspal dan lelehan *crumb rubber SIR 20* berlangsung 2 jam untuk mendapatkan campuran aspal modifikasi karet alam yang homogen. Selanjutnya aspal modifikasi karet alam disimpan dalam wadah penyimpanan tertutup sebelum dilakukan pengujian.

2.2.3 Pengujian Karakteristik Aspal Modifikasi Karet Alam

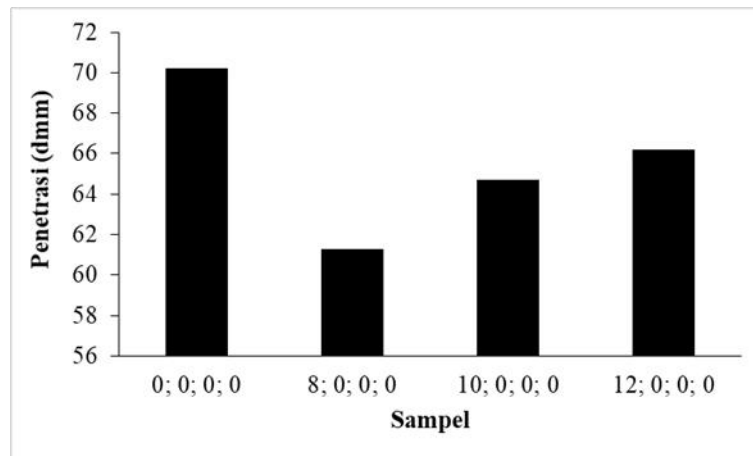
Karakterisasi aspal modifikasi karet alam yang diperlukan meliputi penetrasi (SNI 2456:2011), dan titik lembek (SNI 2434:2011). Sebelum memulai pengujian stabilitas penyimpanan aspal modifikasi karet alam, aspal modifikasi terlebih dahulu ditambahkan dengan aspal mengandung sulfur dengan variasi 0 phr dan 1 phr. Penambahan sulfur dilakukan pada suhu 120°C dengan kecepatan pengadukan 200 rpm selama 10 menit. Penambahan sulfur tidak disarankan dilakukan pada saat proses pembuatan aspal modifikasi dikarenakan *crumb rubber SIR 20* sangat mudah bereaksi dengan sulfur pada suhu diatas 140°C , yang menimbulkan endapan karet pada dasar campuran aspal modifikasi.

Pengujian stabilitas penyimpanan dilakukan dengan menggunakan ASTM D7173 yang dimodifikasi. Pengujian diawali dengan memasukkan aspal modifikasi karet alam ke dalam tabung pengujian stabilitas penyimpanan. Tabung pengujian yang digunakan dalam penelitian ini di modifikasi menyesuaikan kebutuhan sampel. Tabung pengujian terbuat dari material aluminium dengan ukuran diameter 90 mm dan tinggi tabung 180 mm. Kemudian tabung yang telah berisi aspal modifikasi tersebut dioven pada suhu 160°C dan lama pemanasan hingga 24, 48 dan 72 jam. Setelah pemanasan berakhir, sampel bagian atas (*top*) dan bawah (*bottom*) diambil dalam keadaan panas dan dilakukan karakterisasi berupa pengujian titik lembek.

3. PEMBAHASAN

3.1 Penetrasi Aspal Modifikasi Crumb Rubber SIR 20 Sebelum Uji Stabilitas Penyimpanan

Penetrasi menggambarkan tingkat kekerasan secara fisik dari aspal dan merupakan parameter untuk mengklasifikasikan mutu aspal. Selain itu, pengujian penetrasi di awal sebelum dilakukan uji stabilitas penyimpanan adalah untuk mengevaluasi kestabilan komponen yang terdapat dalam aspal modifikasi berbasis karet alam jenis *crumb rubber SIR 20*. Evaluasi dilakukan dengan meninjau kekerasan aspal pada bagian permukaan sampel aspal modifikasi. Hal ini dapat dijadikan indikasi awal pemisahan fasa yang terjadi sebelum dilakukan uji stabilitas. Hasil uji penetrasi aspal modifikasi sebelum dilakukan uji stabilitas dapat dilihat pada Gambar 1.



Keterangan : 0; x; x; x; angka digit pertama menunjukkan kadar *crumb rubber*
x; 0; x; x; angka digit kedua menunjukkan kadar aditif
x; x; 0; x; angka digit ketiga menunjukkan suhu penyimpanan
x; x; x; 0; angka digit keempat menunjukkan lama waktu penyimpanan

Gambar 1. Penetrasi Aspal Modifikasi Sebelum Uji Stabilitas Penyimpanan

Pada Gambar 1 terlihat penetrasi aspal modifikasi menurun di awal penambahan *crumb rubber* dan kemudian tren berubah menjadi meningkat seiring dengan meningkatnya kadar *crumb rubber*. Penambahan 8% *crumb rubber* ke dalam aspal modifikasi (8; 0; 0; 0) menurunkan nilai penetrasi aspal hingga mencapai 12,67% dari aspal pen 60/70 yang memiliki penetrasi 70,2 dmm. Selanjutnya penambahan 10% *crumb rubber* (10; 0; 0; 0) dan 12% *crumb rubber* (12; 0; 0; 0) meningkatkan penetrasi hingga 5 – 8% dari aspal modifikasi dengan 8% *crumb rubber* (8; 0; 0; 0). Peninjauan yang dilakukan terhadap beberapa penelitian mengungkapkan perubahan kekerasan aspal sangat dipengaruhi oleh rasio fraksi *asphaltene* dan *maltene* yang terdapat dalam aspal (Read & Whiteoak, 2003; Speight, 2016). Dalam penelitian ini perubahan kekerasan aspal setelah penambahan *crumb rubber* dipengaruhi oleh bergesernya kesetimbangan rasio *asphaltene* dan *maltene*. Hal ini dikarenakan penambahan sejumlah *crumb rubber* menyerap komponen fraksi *maltene* seperti *saturate* dan *aromatic* (Fang et al., 2016; Wang, et al., 2020; Xia et al., 2021).

Fasa aspal yang kehilangan sejumlah besar komponen *saturate* dan *aromatic*, pada akhirnya meningkatkan sejumlah besar komponen *asphaltene* dan *resin* (Pérez-Lepe et al., 2006; Ren et al., 2019; Zhu et al., 2014). *Resin* dalam fasa aspal memegang peranan penting dalam meningkatkan kekerasan aspal melalui pembentukan struktur koloid yang stabil dan meningkatkan kompatibilitas komponen *crumb rubber* dan aspal (Behnood & Modiri Gharehveran, 2019; Ren et al., 2019). Hal tersebut turut membuat sifat elastisitas aspal modifikasi meningkat, jaringan pengikat semakin kaku dan titik lembek meningkat (Behnood & Modiri Gharehveran, 2019; Pérez-Lepe et al., 2006; Wieser et al., 2021).

Peningkatan sejumlah *crumb rubber* dalam aspal modifikasi pada awalnya diyakini menyerap fraksi *maltene* (*saturate* dan *aromatic*) lebih besar dan menurunkan penetrasi aspal modifikasi (Behnood & Modiri Gharehveran, 2019; Wieser et al., 2021). Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa aspal yang dimodifikasi dengan penambahan *crumb rubber* lebih besar membuat penetrasi aspal meningkat dari sebelumnya. Dapat dilihat pada Gambar 1 penetrasi aspal modifikasi meningkat 5 – 8% pada penambahan 10 dan 12% *crumb rubber*. Peningkatan penetrasi aspal modifikasi seiring meningkatnya kadar *crumb rubber* disebabkan oleh proses *swelling* yang terjadi pada *crumb rubber*. Proses *swelling* mendorong

terbentuknya fasa *crumb rubber* kaya akan *saturate* dan *aromatic* yang membentuk gel. Pada akhirnya fasa *crumb rubber* yang mengembang (*swelling*) tersebut dalam jumlah besar akan membatasi interaksi antar komponen aspal dan perlahan akan menyebabkan terjadinya pemisahan fasa (Wang, et al., 2020; Wang, et al., 2020).

Mekanisme pembengkakan (*swelling*) pada *crumb rubber* memiliki 3 tahapan dalam prosesnya yaitu, tahap 0: konfigurasi awal, pada tahapan ini partikel *crumb rubber* hanya terendam dalam aspal. Tahap 1: pembengkakan *crumb rubber* (*swelling*), tahap ini partikel *crumb rubber* mulai mengembang dengan menyerap fraksi *maltene* (*saturate* dan *aromatic*) dalam aspal dan membentuk lapisan gel. Tahap 2: Pasca pembengkakan dan awal degradasi, pembengkakan partikel *crumb rubber* terus terjadi hingga *crumb rubber* mencapai kesetimbangannya. Sementara itu, degradasi kimia terjadi melalui putusnya jaringan ikatan silang dan rantai polimer. Partikel *crumb rubber* yang membengkak selanjutnya terbelah menjadi lebih kecil karena rusaknya struktur jaringan. Tahap 3: degradasi partikel *crumb rubber* terus berlanjut sampai benar-benar larut ke dalam fasa aspal, yang menghasilkan pengikat yang homogen (Wang, et al., 2020; Wang, Cheng, & Xiao., 2017).

Namun, perlu diperhatikan bahwa degradasi partikel *crumb rubber* sangat sulit dikontrol. Degradasi yang terjadi pada suhu tinggi dalam tempo waktu yang lama dapat membuat partikel *crumb rubber* dengan bobot molekul lebih rendah larut dalam fasa aspal (Xia et al., 2021). Akibatnya, partikel *crumb rubber* dengan bobot lebih rendah dalam jumlah besar mempengaruhi interaksi antar komponen aspal dan membuat kekerasan aspal modifikasi menurun dikarenakan peningkatan proporsi *viscous* (Shafii et al., 2017; Wang, et al., 2020; Wang & Ye, 2020; Xie et al., 2019). Kombinasi peningkatan jumlah partikel *crumb rubber* dengan bobot molekul rendah dan perubahan sifat *crumb rubber* yang awalnya padat menjadi gel, membentuk sifat baru pada campuran aspal modifikasi yang seharusnya keras dan kaku menjadi lebih fleksibel (Behnood & Modiri Gharehveran, 2019; Wieser et al., 2021). Hal tersebut turut membuat peningkatan nilai penetrasi dan penurunan viskoelastisitas aspal modifikasi seiring dengan peningkatan kadar *crumb rubber*. Selain itu, peningkatan penetrasi yang lebih tinggi dari aspal konvensional dapat diidentifikasi sebagai akumulasi fasa kaya *crumb rubber* pada satu bagian campuran aspal modifikasi yang merupakan indikasi pemisahan fasa antar komponen (Azahar, et al., 2019a; Ibrahim, Wiranata, & Malik 2020; Shaffie et al., 2017).

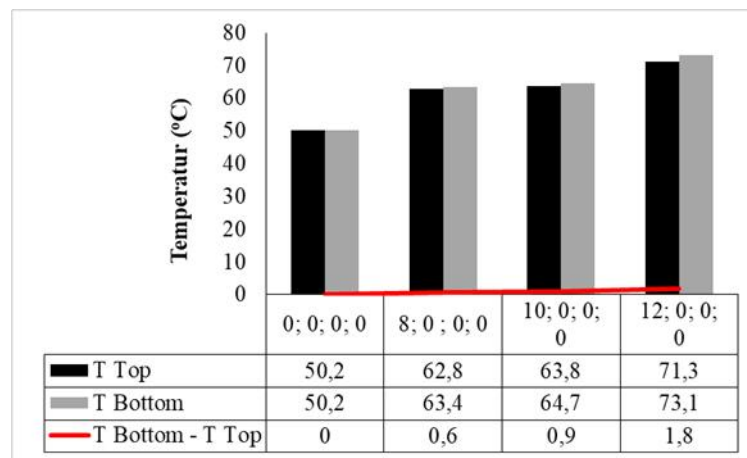
Berdasarkan pengamatan pada seluruh sampel, menunjukkan bahwa penambahan sejumlah *crumb rubber* menurunkan penetrasi aspal. Namun, penetrasi aspal meningkat seiring meningkatnya kadar *crumb rubber* tapi masih lebih rendah dari aspal pen 60/70. Sehingga diperoleh kesimpulan bahwa aspal modifikasi sebelum uji stabilitas tidak menunjukkan tanda pemisahan fasa antar komponen. Sehingga seluruh sampel dinyatakan layak untuk lanjut ke tahap selanjutnya yaitu uji stabilitas penyimpanan.

3.2 Titik Lembek (*Softening Point*) Aspal Modifikasi *Crumb Rubber* Sebelum Uji Stabilitas Penyimpanan

Modifikasi aspal dengan penambahan karet alam jenis *crumb rubber* dinyatakan berhasil apabila nilai titik lembek aspal modifikasi lebih tinggi dari pada nilai titik lembek aspal konvensional (Prastanto, 2014). Gambar 2 menunjukkan titik lembek aspal modifikasi meningkat seiring dengan meningkatnya kadar *crumb rubber* dalam campuran. Peningkatan titik lembek yang terjadi berkisar antara 25 – 45% dengan titik lembek tertinggi diperoleh pada sampel dengan penambahan *crumb rubber* 12% (12; 0; 0; 0) dengan nilai 72,2°C. Peningkatan titik lembek sebanding dengan meningkatnya kadar *asphaltene* dan *maltene*

(*resin*) disertai menurunnya kadar *maltene* secara linear. Hal tersebut turut membuat aspal semakin keras ditandai dengan menurunnya nilai penetrasi aspal (Ibrahim et al., 2020; Oyekunle, 2006).

Meningkatnya *asphaltene* dan menurunnya *maltene* secara linear dipengaruhi oleh difusi fraksi *maltene* ke dalam *crumb rubber*. Difusi fraksi *maltene* dalam *crumb rubber* menyebabkan fenomena ekspansi volume (*swelling*) pada *crumb rubber* (Wang, et al., 2020; Xia et al., 2021). Fenomena *swelling* yang terjadi pada *crumb rubber* oleh fraksi *maltene* berdampak pada rasio *asphaltene* dalam aspal yang meningkat dan membuat aspal semakin keras (Ghasemirad et al., 2020). Kekerasan aspal meningkat setelah penambahan *crumb rubber* mengindikasikan bahwa rata-rata berat dan kerapatan molekul campuran aspal juga turut meningkat (Fang et al., 2016; Hofko et al., 2016). Pada akhirnya rentetan fenomena yang terjadi meningkatkan sifat kohesi dan adhesi aspal setelah dimodifikasi dalam mencegah *rutting* dan kerentanan terhadap variasi suhu (Celauro et al., 2019).



Gambar 2. Titik Lembek Aspal Modifikasi Sebelum Uji Stabilitas Penyimpanan

Perbedaan titik lembek bagian bawah dan atas ($T_{\text{bottom}} - T_{\text{top}}$) campuran aspal modifikasi dapat digunakan sebagai evaluasi stabilitas penyimpanan (*stability storage*). Aspal modifikasi *crumb rubber* dapat dikategorikan memiliki stabilitas penyimpanan yang baik apabila *crumb rubber* tidak mengalami degradasi atau segregasi (pemisahan) dalam proses produksi, penyimpanan, maupun saat aplikasi (Fang et al., 2016). Stabilitas penyimpanan aspal modifikasi ditentukan oleh kompatibilitas antara komponen penyusunnya yaitu aspal dan *crumb rubber*. Semakin baik kompatibilitasnya, maka semakin kecil segregasi yang terjadi yang ditandai oleh perbedaan titik lembek yang kecil. Spesifikasi teknis untuk perkerasan jalan di Indonesia menetapkan bahwa perbedaan titik lembek antara bagian atas (T_{top}) dan bawah (T_{bottom}) tidak boleh lebih dari 2,5°C (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2018).

Berdasarkan Gambar 2 terlihat adanya perbedaan titik lembek ($T_{\text{bottom}} - T_{\text{top}}$) aspal modifikasi pada suhu penyimpanan ruang dan sebelum dilakukan uji stabilitas penyimpanan. Hasil yang terlihat perbedaan titik lembek ($T_{\text{bottom}} - T_{\text{top}}$) meningkat seiring dengan meningkatnya kadar *crumb rubber* dalam aspal. Perbedaan titik lembek paling besar terjadi pada sampel dengan kadar 12% *crumb rubber* (12; 0; 0; 0) dengan nilai 1,8°C. Perbedaan nilai titik lembek bagian *bottom* dan *top* pada sampel kadar 12% *crumb rubber* (12; 0; 0; 0) menjadi indikasi awal bahwa terjadi ketidakstabilan fasa (*instability phase*) yang lebih besar daripada sampel lainnya. Ketidakstabilan fasa disebabkan perbedaan densitas dan viskositas komponen, suhu penyimpanan dan kadar *crumb rubber* yang ditambahkan lebih tinggi dari

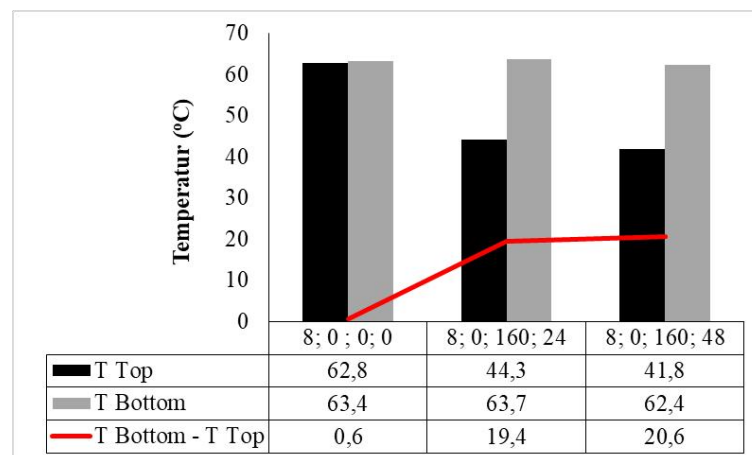
sampel lainnya (Lushinga et al., 2020; Zhu, 2016; Zhu et al., 2017, 2019). Namun, berdasarkan ketetapan Bina Marga tahun 2018, aspal modifikasi *crumb rubber* yang dihasilkan masih memenuhi spesifikasi yang ditetapkan.

3.3 Stabilitas Penyimpanan Aspal Modifikasi *Crumb Rubber*

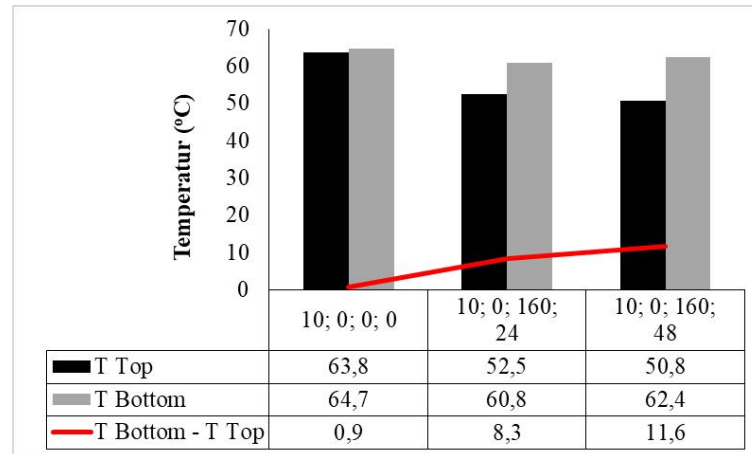
Stabilitas penyimpanan aspal modifikasi merupakan masalah yang menjadi perhatian utama bagi peneliti dan kontraktor dalam memproduksi dan menentukan kualitas *hotmix*. Permasalahan stabilitas penyimpanan ini muncul dikarenakan umumnya aspal disimpan pada suhu 150 – 180°C dengan waktu relatif lama sedangkan perkerasan konstruksi membutuhkan pengikat yang stabil (Xu et al., 2020). Oleh sebab itu, dilakukan uji stabilitas penyimpanan terhadap aspal modifikasi pada suhu 160°C selama 48 jam. Evaluasi yang dilakukan berupa uji titik lembek pada bagian *top* dan *bottom* dengan hasil dapat dilihat pada Gambar 3 – 5.

Secara visual tidak terlihat perbedaan antara sampel *top* dan *bottom* setelah uji stabilitas penyimpanan. Namun, perbedaan dapat dirasakan ketika kedua sampel tersebut diberi tekanan atau beban pada permukaannya. Sampel pada bagian *top* akan semakin lunak seiring dengan lamanya waktu penyimpanan. Hal tersebut berbanding terbalik dengan bagian *bottom* yaitu semakin keras yang berarti bahwa terjadi pemisahan fasa pada suhu tinggi seiring dengan lamanya waktu simpan (Wang, et al., 2020; Xie et al., 2019). Sampel aspal bagian *top* yang lebih lunak mengindikasikan bahwa akumulasi *crumb rubber* dengan densitas yang lebih kecil terdapat pada bagian permukaan sampel (Fang et al., 2016; Ibrahim et al., 2020; Xie et al., 2019).

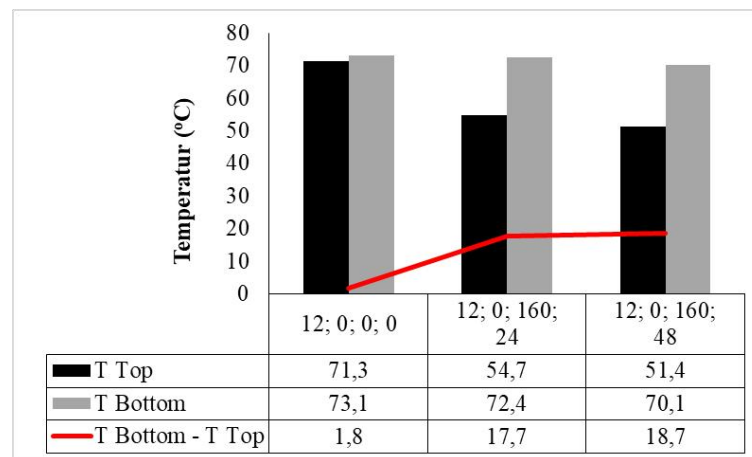
Berdasarkan Gambar 3 – 5 semua sampel mengalami masalah pada stabilitas penyimpanan. Seiring lamanya waktu penyimpanan pada suhu 160°C. Perbedaan titik lembek bagian *bottom* dan *top* ($T_{\text{bottom}} - T_{\text{top}}$) terlihat semakin besar. Membandingkan Gambar 3 - 5 terlihat tren perbedaan titik lembek paling besar terjadi pada 24 jam pertama waktu simpan. Hal tersebut menandakan ketidakstabilan penyimpanan dengan indikasi pemisahan fasa paling besar terjadi dalam kurun waktu 24 jam pertama (Pérez-Lepe et al., 2006). Akibat dari ketidakstabilan penyimpanan aspal modifikasi polimer akan terjadi pemisahan yang membentuk sisi fasa kaya polimer (*polymer rich-phase*) dan pada sisi lainnya akan membentuk fasa kaya aspal (*asphalt rich-phase*) (Fang et al., 2016; Zhu et al., 2014, 2017).



Gambar 3. Uji Stabilitas Penyimpanan Untuk Sampel 8% *Crumb Rubber* Pada Suhu 160°C Selama 48 Jam



Gambar 4. Uji Stabilitas Untuk Penyimpanan Sampel 10% *Crumb Rubber* Pada Suhu 160°C Selama 48 Jam

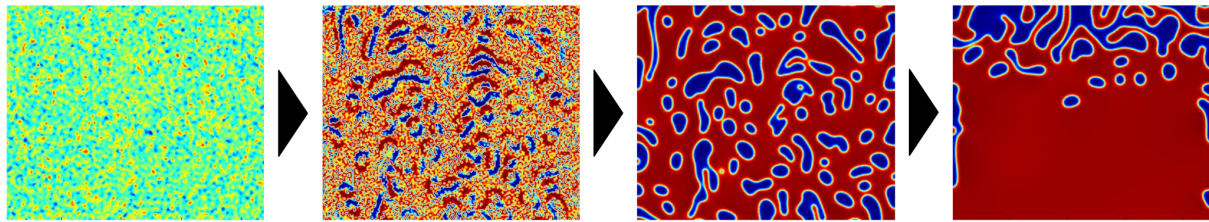


Gambar 5. Uji Stabilitas Untuk Penyimpanan Sampel 12% *Crumb Rubber* Pada Suhu 160°C Selama 48 Jam

Perbedaan titik lembek terbesar terjadi pada sampel dengan kadar 8% *crumb rubber* pada lama waktu simpan 24 dan 48 jam dengan perbedaan titik lembek mencapai 19,4°C dan 20,6°C. Namun, pada sampel dengan kadar 10% *crumb rubber* perbedaan titik lembek menurun dan kembali meningkat pada sampel dengan penambahan 12% *crumb rubber*. Stabilitas penyimpanan aspal modifikasi pada sampel dengan 8% *crumb rubber* sangatlah buruk, hal tersebut dipengaruhi oleh kompatibilitas antara komponen penyusunnya. Kompatibilitas aspal modifikasi *crumb rubber* alam sulit tercapai dikarenakan beberapa faktor yang mempengaruhinya diantaranya fenomena pembengkakan pada *crumb rubber* (*swelling*), stabilitas termal dari campurannya, densitas dan viskositas (Lushinga et al., 2020; Wang, et al., 2020; Wieser, Schaur, & Unterberger 2021; Xia et al., 2021).

Pembengkakan *crumb rubber* (*swelling*) yang terjadi pada sampel dengan kadar 8% *crumb rubber* menyebabkan sebagian besar fraksi *maltene* (*saturate* dan *aromatic*) terserap oleh komponen *crumb rubber*. Namun, semakin banyak fraksi *maltene* yang terserap, menciptakan fasa *crumb rubber* yang kaya akan *saturate* dan *aromatic*. Proses ini pada akhirnya akan menimbulkan ketidakstabilan fasa yang berujung terjadinya pemisahan fasa (Behnood & Modiri Gharehveran, 2019). Pemisahan fasa pada umumnya didahului oleh

fenomena koalensi dan flokulasi, partikel yang membengkak tersebut akan saling berikatan membentuk gumpalan gel (Behnood & Modiri Gharehveran, 2019; Pérez-Lepe et al., 2006). Simulasi fenomena koalensi dan flokulasi pada aspal modifikasi polimer dapat dilihat pada Gambar 6.



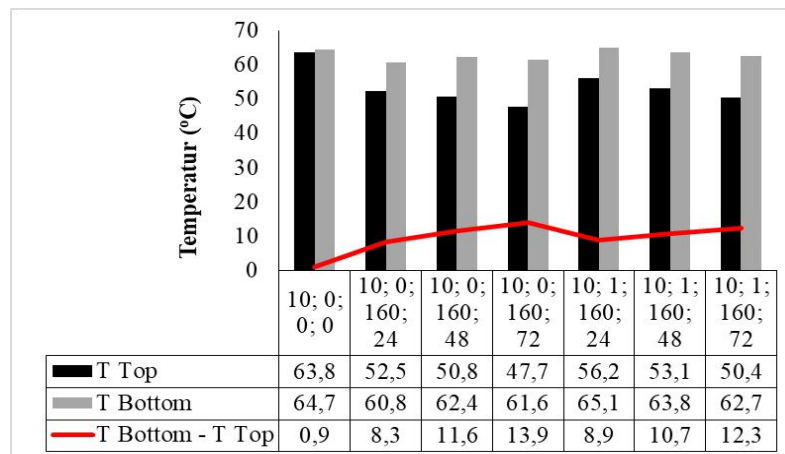
Gambar 6. Simulasi Fenomena Koalensi dan Flokulasi

Efek fenomena koalensi dan flokulasi tersebut, fasa *crumb rubber* yang kaya akan *saturate* dan *aromatic* memiliki ukuran partikel *crumb rubber* semakin besar, berat molekul meningkat dan stabilitas termal menurun. Pada kondisi suhu tinggi ukuran partikel yang besar diiringi stabilitas termal yang menurun mempercepat efek daya apung fasa *crumb rubber*. Sehingga pada akhirnya fasa kaya *crumb rubber* dengan kandungan *saturate* dan *aromatic* tinggi akan berada pada permukaan campuran (Behnood & Modiri Gharehveran, 2019; Ren et al., 2019; Wieser et al., 2021; Zhu et al., 2017). Faktor lainnya yang sangat mempengaruhi cepat atau lambatnya pemisahan fasa adalah densitas dan viskositas dari komponen yang bercampur. Fenomena koalensi dan flokuasi juga berdampak pada meningkatnya densitas dan viskositas *crumb rubber*. Namun, karena terbatasnya jumlah *crumb rubber* dan daya serap *crumb rubber* terhadap *saturate* dan *aromatic* membuat fasa aspal masih memiliki sejumlah besar *saturate* dan *aromatic* didalamnya. Hal tersebut membuat perbedaan densitas dan viskositas di antara dua fasa tersebut masih cukup besar dan kompatibilitas dari dua komponen tersebut belum dapat tercapai. Perbedaan densitas dan viskositas yang cukup besar antara komponen aspal dan *crumb rubber* membuat mobilitas fasa *crumb rubber* untuk terjadinya pemisahan fasa semakin cepat (Lushinga et al., 2020; Zhu, 2016; Zhu et al., 2017).

Disisi lain peningkatan kadar *saturate* dan *aromatic* pada fasa kaya *crumb rubber* akan mengakibatkan fasa kaya akan aspal kekurangan kandungan *saturate* dan *aromatic*. Fasa kaya aspal yang kekurangan *saturate* dan *aromatic* pada akhirnya akan meningkatkan rasio *resin* dan *asphaltene* (Pérez-Lepe et al., 2006; Wieser et al., 2021). Peningkatan rasio *resin* dan *asphaltene* tersebut menggeser suhu transisi gelas (T_g) dari aspal yang semakin tinggi (Wieser et al., 2021). Hal tersebut pada akhirnya akan meningkatkan titik lembek dari campuran aspal pada bagian *bottom*.

Dari evaluasi yang dilakukan pada aspal modifikasi dengan kadar 8 – 12% *crumb rubber*, diperoleh aspal modifikasi yang memiliki kinerja yang terbaik pada kadar 10% *crumb rubber*. Oleh sebab itu, dilakukan evaluasi lebih jauh terhadap stabilitas penyimpanan aspal tersebut hingga 72 jam penyimpanan. Kemudian dilakukan peninjauan lebih jauh terhadap penambahan aditif sulfur dalam campuran aspal modifikasi. Tujuan penambahan sulfur dalam aspal modifikasi adalah untuk pencegahan terjadinya oksidasi pada *crumb rubber* dalam campuran aspal modifikasi. Selain itu, penambahan sulfur diharapkan dapat meningkatkan kompatibilitas campuran antara komponen aspal dan *crumb rubber* (Kumar et al., 2021; Liang et al., 2017; Zhang et al., 2010). Hasil uji stabilitas penyimpanan pada suhu

160°C dengan waktu simpan hingga 72 jam pada sampel tanpa dan dengan penambahan aditif sulfur dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Uji Stabilitas Untuk Penyimpanan Sampel 10% *Crumb Rubber* Tanpa dan Dengan Penambahan Sulfur Pada Suhu 160°C Selama 72 Jam

Pada Gambar 7 terlihat bahwa pemisahan fasa masih berlangsung selama 72 jam ditandai dengan perbedaan titik lembek antara bagian *top* dan *bottom* yang semakin besar. Hal tersebut mengindikasikan bahwa sejumlah besar fasa *crumb rubber* dengan ukuran yang kecil dan berat molekul lebih rendah memiliki mobilitas fasa *crumb rubber* lebih kecil sehingga membutuhkan waktu lebih untuk terakumulasi pada bagian *top* (Zhu, 2016; Zhu et al., 2017, 2019). Pada Gambar 7 juga terlihat bahwa penambahan aditif sulfur tidak banyak mempengaruhi kompatibilitas antara komponen campuran. Hasil investigasi diperoleh fakta bahwa penambahan sulfur ke dalam aspal yang dimodifikasi *crumb rubber* berperan sebagai agen *stabilizer* (Kumar et al., 2021). Secara kimiawi, sulfur mengikat molekul polimer dan menghubungkannya dengan aspal melalui ikatan sulfida atau polisulfida dan mendorong peningkatan kompatibilitas antar komponen (Kumar et al., 2021; Liang et al., 2017; Zhang et al., 2010). Hasil pengamatan dan uji stabilitas penyimpanan menunjukkan penambahan 1 phr aditif sulfur tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap stabilitas penyimpanan.

Meskipun kestabilan fasa aspal modifikasi tidak tercapai, penambahan sulfur meningkatkan titik lembek dari aspal yang dimodifikasi. Hal tersebut dapat dilihat dengan membandingkan aspal modifikasi tanpa sulfur dan dengan penambahan sulfur pada Gambar 7. Pada gambar tersebut terlihat bahwa aspal dengan penambahan sulfur memiliki titik lembek lebih tinggi dibandingkan aspal modifikasi tanpa sulfur pada setiap bagiannya. Namun, mekanisme pasti mengenai peningkatan stabilitas penyimpanan oleh penambahan sulfur masih belum dipahami secara komprehensif dan hubungannya terhadap reaksi yang mengarah pada vulkanisasi (Kumar et al., 2021; Zhang et al., 2010). Penambahan aditif sulfur berlebih dapat mendestabilisasi fasa *crumb rubber* yang terdapat dalam aspal modifikasi. Destabilisasi yang terjadi dapat disebabkan oleh reaksi vulkanisasi spontan yang terjadi pada suhu tinggi dan mendorong terbentuknya fasa *crumb rubber* yang memadat. Pada akhirnya fasa *crumb rubber* yang memadat tersebut akan mengendap pada bagian *bottom* dan mempercepat terjadi pemisahan fasa.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai penentuan stabilitas penyimpanan aspal modifikasi *crumb rubber SIR 20* dapat disimpulkan bahwa aspal modifikasi dengan penambahan 8, 10, dan 12% *crumb rubber SIR 20* tanpa sulfur ataupun dengan sulfur menunjukkan adanya pemisahan fasa setelah uji stabilitas penyimpanan pada suhu 160°C selama 48 jam dengan perbedaan titik lembek ($T_{\text{Bottom}} - T_{\text{Top}}$) lebih besar dari yang standar Bina Marga 2018 yaitu 2,5°C. Aspal modifikasi dengan kinerja paling optimum diperoleh dengan penambahan 10% *crumb rubber SIR 20* tanpa sulfur dengan perbedaan titik lembek ($T_{\text{Bottom}} - T_{\text{Top}}$) setelah uji stabilitas mencapai 11,6°C.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrahman, S., Hainin, M. R., Idham, M. K., Hassan, N. A., Warid, M. N. M., Yaacob, H., Azman, M., & Puan, O. C. (2019). Physical properties of warm cup lump modified bitumen. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012048>
- Azahar, N. M., Hassan, N. A., Putrajaya, R. 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(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/220/1/012014>
- Behnood, A., & Modiri Gharehveran, M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766–791. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>
- Celauro, C., Bosurgi, G., Sollazzo, G., & Ranieri, M. (2019). Laboratory and in-situ tests for estimating improvements in asphalt concrete with the addition of an LDPE and EVA polymeric compound. *Construction and Building Materials*, 196, 714–726. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.152>
- Ding, X., Ma, T., Zhang, W., & Zhang, D. (2017). Experimental study of stable crumb rubber asphalt and asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 157(December 2017), 975–981. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.164>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). *Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Jalan dan Jembatan (General Specifications of Bina Marga 2018 for Road Works and Bridges)*. September.
- Fang, C., Qiao, X., Yu, R., Yu, X., Liu, J., Yu, J., & Xia, R. (2016). Influence of modification process parameters on the properties of crumb rubber/EVA modified asphalt. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(27), 1–13. <https://doi.org/10.1002/app.43598>
- Ghasemirad, A., Bala, N., & Hashemian, L. (2020). High-Temperature Performance Evaluation of Asphaltenes-Modified Asphalt Binders. *Molecules*, 25.
- Hofko, B., Eberhardsteiner, L., Füssl, J., Grothe, H., Handle, F., Hospodka, M., Grossegger, D., Nahar, S. N., Schmets, A. J. M., & Scarpas, A. (2016). Impact of maltene and asphaltene fraction on mechanical behavior and microstructure of bitumen. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0541-6>
- 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>
- Kumar, A., Choudhary, R., & Kumar, A. (2021). Characterization of thermal storage stability of waste plastic pyrolytic char modified asphalt binders with sulfur. *PLoS ONE*, 16(3 March), 1–27. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248465>
- Liang, M., Xin, X., Fan, W., Ren, S., Liang, M., & Shi, J. (2017). Effects of polymerized sulfur on rheological properties, morphology and stability of SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 150, 860–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.069>
- Lushinga, N., Cao, L., Dong, Z., & Assogba, C. O. (2020). Improving storage stability and physicochemical performance of styrene-butadiene-styrene asphalt binder modified with nanosilica. *Sustainability (Switzerland)*, 12(21), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su12218968>
- Oyekunle, L. O. (2006). Certain relationships between chemical composition and properties of petroleum asphalts from different origin. *Oil and Gas Science and Technology*. <https://doi.org/10.2516/ogst:2006043a>
- Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F. J., Attané, P., & Gallegos, C. (2006). Destabilization mechanism of polyethylene-modified bitumen. *Journal of Applied Polymer Science*, 100(1), 260–267. <https://doi.org/10.1002/app.23091>
- Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Rossi, C. O. (2019). Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/app9040742>
- Prastanto, H. (2014). Depolimerisasi Karet Alam Secara Mekanis Untuk Bahan Aditif Aspal. *Jurnal Penelitian Karet*. <https://doi.org/10.22302/jpk.v32i1.154>
- 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(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012049>
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). The Shell bitumen handbook. In *Read, J., & Whiteoak, D. (2003). The Shell bitumen handbook. Thomas Telford*. <https://doi.org/10.1680/sbh.32200>
- Ren, S., Liu, X., Fan, W., Wang, H., & Erkens, S. (2019). Rheological Properties, Compatibility, and Storage Stability of SBS Latex-Modified Asphalt. *Materials*, 12(22), 1–16.
- Shaffie, E., Arshad, A. K., Alisibramulisi, A., Ahmad, J., Hashim, W., Abd Rahman, Z., & Jaya, R. P. (2018). Effect of mixing variables on physical properties of modified bitumen using natural rubber latex. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), 1812–1821.
- Shaffie, E., Wan Hanif, W. M. M., Arshad, A. K., & Hashim, W. (2017a). Rutting resistance of asphalt mixture with cup lumps modified binder. *IOP Conference Series: Materials*

- Science and Engineering*, 271(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012056>
- Shaffie, E., Wan Hanif, W. M. M., Arshad, A. K., & Hashim, W. (2017b). Rutting resistance of asphalt mixture with cup lumps modified binder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012056>
- Shafii, M. A., Lai Yew Veng, C., Mohamad Rais, N., & Ab Latif, A. (2017). Effect of blending temperature and blending time on physical properties of NRL-modified bitumen. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(13), 3844–3849.
- Speight, J. . (2016). *Asphalt Materials Science and Technology*.
- Wang, H., Apostolidis, P., Zhu, J., Liu, X., Athanasios, Erkens, Skarpas, & Sandra. (2020). The role of thermodynamics and kinetics in rubber–bitumen systems: a theoretical overview. *International Journal of Pavement Engineering*, February.
- Wang, H., Liu, X., Apostolidis, P., Erkens, S., & Skarpas, A. (2020). Experimental Investigation of Rubber Swelling in Bitumen. *Transportation Research Record*, 2674(2), 203–212. <https://doi.org/10.1177/0361198120906423>
- Wang, H., Liu, X., Erkens, S., & Skarpas, A. (2020). Experimental characterization of storage stability of crumb rubber modified bitumen with warm-mix additives. *Construction and Building Materials*, 249, 118840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118840>
- Wang, S., Cheng, D., & Xiao, F. (2017). Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt. *Construction and Building Materials*, 131, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.077>
- Wang, Z., & Ye, F. (2020). Experimental investigation on aging characteristics of asphalt based on rheological properties. *Construction and Building Materials*, 231, 117158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117158>
- Wieser, M., Schaur, A., & Unterberger, S. H. (2021). Polymer-bitumen interaction: A correlation study with six different bitumens to investigate the influence of sara fractions on the phase stability, swelling, and thermo-rheological properties of sbs-pmb. *Materials*, 14(5), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma14051273>
- Xia, C., Chen, M., Geng, J., Liao, X., & Chen, Z. (2021). Swelling and Degradation Characteristics of Crumb Rubber Modified Asphalt during Processing. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6682905>
- Xie, J., Yang, Y., Lv, S., Peng, X., & Zhang, Y. (2019). Investigation on preparation process and storage stability of modified asphalt binder by grafting activated crumb rubber. *Materials*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/ma121222014>
- Xu, J., Li, R., Liu, T., Pei, J., Li, Y., & Luo, Q. (2020). Study on the effect of microwave processing on asphalt-rubber. *Materials*, 13(2), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma13020411>
- Zhang, F., Yu, J., & Wu, S. (2010). Effect of ageing on rheological properties of storage-stable SBS/sulfur-modified asphalts. *Journal of Hazardous Materials*, 182(1–3), 507–

517. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.061>

Zhu, J. (2016). *Storage stability and phase separation behaviour of polymer-modified bitumen: characterization and modelling*.

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>

Zhu, J., Balieu, R., & Wang, H. (2019). The use of solubility parameters and free energy theory for phase behaviour of polymer-modified bitumen : a review. *Road Materials and Pavement Design*, 0(0), 1–22. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1645725>

Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54(1), 18–38. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>