

## KINERJA REOLOGI ASPAL MODIFIKASI BELERANG BERDASARKAN PENGUJIAN STANDAR AASHTO

Hery Awan Susanto<sup>1,\*</sup>, Dani Nugroho Saputro<sup>1</sup>, Safety Husna Pangestika<sup>1</sup>, Gandjar Pamudji<sup>1</sup>  
Miftah Gita Bhagaskara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dosen Teknik Sipil, Universitas Jenderal Soedirman

<sup>2</sup>Mahasiswa S1 Teknik Sipil, Universitas Jenderal Soedirman

\*Corresponding authors: : [hery.susanto@unsoed.ac.id](mailto:hery.susanto@unsoed.ac.id)

**Abstract:** Rising demand for road infrastructure drives innovation in sulfur-modified asphalt (4-6%) to enhance pavement durability. Based on AASHTO/SNI property tests of PEN 60/70 as-phalt, 4% sulfur increased density (+7.7%) without segregation, while 5-6% sulfur improved flexibility (ductility +12.3%) and softness (penetration +17.7%). However, concentrations >4% reduced flash point (-39.8%) and viscosity (-30.01%), increasing fire risk and rutting susceptibility. A 4-5% sulfur content optimally balances rheological performance and risk, recommended for cold-climate applications with strict temperature monitoring and gas emission testing (H<sub>2</sub>S/SO<sub>2</sub>). Future research should combine sulfur with polymers like crumb rubber to address limitations.

**Keywords:** modified asphalt, sulfur, AASHTO, properties test

**Abstrak:** Peningkatan permintaan infrastruktur jalan mendorong inovasi aspal modifikasi belerang (4-6%) untuk meningkatkan ketahanan perkerasan. Berdasarkan uji propertis AASHTO/SNI pada aspal PEN 60/70, kadar 4% belerang meningkatkan densitas (+7,7%) tanpa segregasi, sedangkan kadar 5-6% meningkatkan fleksibilitas (daktilitas +12,3%) dan kelunakan (penetrasi +17,7%). Namun, kadar >4% menurunkan titik nyala (-39,8%) dan viskositas (-30,01%), meningkatkan risiko kebakaran dan rutting. Kadar 4-5% optimal untuk menyeimbangkan performa reologi dan risiko, direkomendasikan untuk aplikasi di iklim dingin dengan pengawasan suhu ketat dan uji emisi gas (H<sub>2</sub>S/SO<sub>2</sub>). Penelitian lanjutan dapat mengkombinasikan belerang dengan polimer seperti crumb rubber untuk mitigasi kelemahan.

**Kata kunci:** : aspal modifikasi, belerang, reologi, AASHTO, uji propertis

### 1. PENDAHULUAN

Tingginya permintaan pembangunan jalan, termasuk target 265,5 km jalan tol pada 2025 (PUPR, 2025), membutuhkan infrastruktur berkualitas guna mendukung konektivitas antardaerah. Namun, peningkatan beban lalu lintas mengancam kualitas perkerasan jalan. Aspal sebagai bahan pengikat utama memiliki keunggulan elastisitas (kemampuan kembali ke bentuk awal pasca deformasi) dan plastisitas (ketahanan terhadap keretakan) (Riadi, 2022). Kendati demikian, material ini rentan terhadap deformasi permanen di suhu tinggi dan retak termal di suhu rendah, sehingga inovasi aspal modifikasi menjadi krusial.

Kelayakan aspal sebagai bahan pengikat perkerasan ditentukan melalui uji propertis berbasis standar AASHTO, yang diadopsi dalam SNI dan spesifikasi Bina Marga Indonesia. Pengujian ini mengevaluasi parameter kritis seperti

berat jenis, penetrasi (PEN), daktilitas, viskositas, titik lembek, titik nyala, dan titik bakar untuk memastikan kepatuhan spesifikasi. Dalam upaya peningkatan kualitas, berbagai aditif seperti belerang (Lubis et al., 2024), serbuk arang tempurung kelapa (Mashuri & Maricar, 2006), abu sekam (Rianto, 2007), getah pinus (Yuniarti et al., 2023), limbah plastik (Mukhlis et al., 2022), dan lainnya telah diuji untuk memperbaiki karakteristik reologi aspal. Studi-studi membuktikan bahwa aditif tidak menurunkan kualitas aspal sebagai bahan pengikat jika digunakan dengan kadar tepat (Yuniarti et al., 2023).

Studi Malik (2023) menunjukkan penambahan belerang 4-6% pada campuran aspal meningkatkan kuat tarik tak langsung 50%, stabilitas Marshall, dan ketahanan retak, sekaligus mengurangi pengerasan aspal. Temuan ini sejalan dengan laporan FHWA (2012) yang menyatakan rasio belerang/aspal 20/80-50/50 menghasilkan kinerja setara dalam modulus dan ketahanan

deformasi, meski perlu evaluasi lebih lanjut untuk ketahanan kelelahan dan kelembaban. Berdasar penelitian Malik (2023), studi ini menganalisis pengaruh belerang (4%, 5%, 6%) terhadap sifat reologi aspal melalui uji propertis, sebagai kontribusi ilmiah untuk pengembangan aspal modifikasi berkualitas tinggi.

### Rumusan masalah

- Bagaimana pengaruh penambahan belerang terhadap sifat reologi aspal sebagai bahan pengikat perkerasan ?
- Bagaimana perbandingan sifat reologi aspal murni dan aspal modifikasi belerang?

### Tujuan penelitian

- Mengetahui proses pencampuran belerang terhadap aspal yang baik
- Mengetahui klasifikasi modifikasi aspal belerang
- Mengetahui proporsi penambahan belerang terhadap aspal yang memenuhi spesifikasi analisis Superpave
- Mengetahui pengaruh belerang terhadap karakteristik reologi aspal modifikasi
- Membandingkan kekuatan aspal murni dengan aspal modifikasi

### Tinjauan pustaka

#### A. Material Aspal

Aspal merupakan material perekat hitam dari residu minyak bumi atau sumber alami, berfungsi sebagai pengikat agregat dalam perkerasan jalan karena sifat viskoelastisnya, ketahanan terhadap cuaca, dan kedap air (Riadi, 2022). Komposisinya terdiri dari senyawa kompleks: asfalten (senyawa hitam termoplastis penentu kekerasan dan viskositas), resin (senyawa coklat tua larut dalam n-heptana), aromatik (cairan kental non-polar penyusun 40-65% aspal), dan saturat (cairan non-polar penyusun 5-20% aspal). Dalam konstruksi jalan, aspal berperan untuk: mengikat agregat agar tidak lepas, mencegah erosi (waterproofing), melapisi agregat (prime coat dan tack coat), serta mengisi rongga antar agregat.

#### 1. Sifat aspal

Aspal banyak digunakan dalam konstruksi perkerasan jalan karena berfungsi sebagai bahan pengikat dan pengisi rongga antar agregat. Sifat-sifat utama aspal meliputi (Riadi, 2022):

- Daya Tahan (Durability), Kemampuan aspal untuk mempertahankan karakteristik aslinya terhadap pengaruh cuaca selama masa layanan, bergantung pada mutu agregat,

interaksi aspal-agregat, dan pelaksanaan konstruksi.

- Kohesi dan Adesi, Kohesi adalah kemampuan aspal mengikat dirinya sendiri, sedangkan adesi adalah kemampuan aspal melekat pada agregat dan menjaga ikatannya..
- Kepekaan terhadap Temperatur, Aspal bersifat sensitif terhadap perubahan suhu, yang memengaruhi sifat viskoelastisnya dan dinyatakan melalui Indeks Penetrasi (IP).
- Viskoelastisitas, Sifat aspal yang bergantung pada suhu dan waktu pembebanan ini penting dalam menentukan suhu optimal pencampuran dan pemadatan agar menghasilkan ikatan yang kuat.

#### B. Material Belerang

Belerang (sulfur) merupakan unsur non-logam berwarna kuning dengan bau khas, tidak larut dalam air namun larut dalam pelarut organik seperti toluena, serta memiliki konduktivitas panas dan listrik yang rendah. Unsur ini secara alami dapat ditemukan di sekitar daerah gunung berapi, aktivitas penambangan, maupun dalam gas alam. Meskipun dalam kondisi normal tidak beracun, belerang dapat bereaksi membentuk senyawa berbahaya seperti hidrogen sulfida ( $H_2S$ ), sulfur dioksida ( $SO_2$ ), dan karbon disulfida ( $CS_2$ ) yang bersifat toksik bagi makhluk hidup (Mbhele et al., 2009).

Dalam penelitian ini, belerang yang digunakan diperoleh dari proses reduksi mineral gipsum menggunakan karbon aktif pada suhu tinggi sekitar  $1100^{\circ}C$ , menghasilkan kalsium sulfida ( $CaS$ ) yang kemudian dilarutkan dalam air dan direaksikan dengan gas  $CO_2$  untuk melepaskan  $H_2S$ . Gas tersebut kemudian direaksikan lebih lanjut dengan  $SO_2$  untuk menghasilkan belerang. Belerang memiliki berat molekul  $32,06 \text{ g/mol}$ , titik lebur  $115,21^{\circ}C$ , dan titik didih  $444,6^{\circ}C$ , dengan massa jenis berkisar antara  $1,92-2,07 \text{ g/cm}^3$  tergantung pada bentuk kristalnya (Rumus Kimia, 2025).

#### C. Pengujian Propertis Aspal

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian untuk mengetahui perbedaan karakteristik dan kualitas aspal kombinasi dengan aspal asli. Pengujian yang dilakukan merupakan uji penetrasi aspal, berat jenis aspal keras, titik lembek aspal, titik nyala dan titik bakar menggunakan cleveland open cup, daktilitas bahan aspal dan viskositas bahan aspal.

### 1. Uji Berat jenis

Berat jenis merupakan perbandingan antara massa suatu bahan dengan massa air pada volume dan suhu yang sama, dan dapat diuji menggunakan metode berdasarkan SNI 2441:2011 atau AASHTO T 228. Pengujian dilakukan dengan piknometer dan hasilnya dihitung dari massa benda uji serta massa air yang dipindahkan. Menurut AASHTO, berat jenis aspal umumnya  $\geq 1 \text{ g/cm}^3$  dan nilainya dipengaruhi oleh suhu serta tingkat penetrasi. Aspal penetrasi memiliki berat jenis antara 1,010 hingga 1,040, sedangkan aspal teroksidasi berkisar antara 1,015 hingga 1,035. Jenis aspal keras memiliki berat jenis  $\geq 1,045$ , dan cutback asphalt berada di kisaran 0,992–1,007.

### 2. Uji Penetrasi

Penetrasi merupakan ukuran kekerasan aspal yang dinyatakan sebagai kedalaman masuknya jarum standar secara vertikal ke dalam sampel pada kondisi beban, waktu, dan temperatur tertentu, dengan satuan 0,1 mm. Pengujian ini mengacu pada AASHTO T 49 dan SNI 2456:2011. AASHTO mengelompokkan aspal dengan nilai penetrasi 40–50 sebagai yang paling keras, sedangkan 200–300 sebagai yang paling lunak. Di Indonesia, jenis aspal yang umum digunakan adalah aspal penetrasi 60–70 dan 85–100, yang dibedakan berdasarkan kisaran nilai penetrasinya.

### 3. Uji Daktilitas

Uji daktilitas mengukur kemampuan aspal menahan gaya tarik sebelum putus dengan meregangkan sampel hingga jarak tertentu (100 cm), di mana ketahanan tarik dianggap tinggi jika aspal tidak putus setelah mencapai jarak tersebut. Pengujian ini mengevaluasi sifat mekanik aspal terkait fleksibilitas dan ketahanan terhadap retak fatik, dilaksanakan berdasarkan standar AASHTO T 51 dan SNI 2432:2011.

### 4. Uji Viskositas

Uji viskositas mengukur kekentalan aspal berdasarkan waktu yang diperlukan untuk mengalirkan 60 ml aspal (dalam detik), di mana kekentalan berkurang signifikan seiring kenaikan suhu—aspal menjadi lebih encer pada suhu tinggi. Pengujian ini membedakan viskositas absolut (satuan poise atau Pa·detik) dan viskositas kinematik (satuan stokes atau  $\text{cm}^2/\text{detik}$ ), dengan hubungan matematis: viskositas kinematik = viskositas absolut / berat jenis ( $\approx 1 \text{ cm}^2/\text{detik}$  untuk aspal). Berdasarkan standar AASHTO T 72 dan SNI 7729:2011, pengujian dilakukan pada suhu

120°C, 140°C, 160°C, dan 180°C untuk memprediksi perilaku aspal di lapangan, menentukan suhu optimal pencampuran dan pemadatan guna mencapai stabilitas, durabilitas, dan ketahanan deformasi campuran beraspal.

### 5. Uji Suhu Titik Lembek

Uji titik lembek mengukur suhu saat aspal mulai melunak secara gradual seiring kenaikan suhu, menggunakan metode Ring and Ball untuk bahan semi-padat hingga padat sesuai standar AASHTO T 53 dan SNI 2434:2011. Hasil uji ini menghitung Indeks Penetrasi (PI). Nilai PI menentukan sensitivitas termal aspal. Jika PI positif menunjukkan ketahanan terhadap perubahan suhu, sedangkan PI negatif mengindikasikan kepekaan tinggi. Rentang validitasnya adalah  $0,015 \leq A \leq 0,06$  dan  $-3 \leq PI \leq 7$ , yang menjadi dasar evaluasi performa aspal dalam kondisi termal bervariasi.

### 6. Uji Suhu Titik Nyala dan Bakar

Titik nyala merupakan temperatur terendah dimana uap benda uji dapat menyala (nyala biru singkat) apabila dilewati api penguji, sedangkan titik bakar merupakan temperatur terendah ketika benda uji terbakar selama minimum 5 detik apabila dilewati api penguji. Panduan untuk uji titik nyala dan titik bakar terdapat pada AASHTO T 48 dan SNI 2433:2011. Titik nyala aspal bersuhu minimal 232°C dan titik bakar biasanya berkisar 10°C - 20°C dari titik nyala.

### D. Studi Terdahulu

Penambahan belerang pada aspal terbukti dapat meningkatkan kuat tarik, stabilitas Marshall, dan ketahanan terhadap retak. Pada kadar tertentu, belerang juga membentuk struktur yang memperkuat campuran dan meningkatkan ketahanan terhadap deformasi. Selain belerang, berbagai bahan lain seperti limestone, abu cangkang kelapa sawit, briket Asbuton, crumb rubber, getah pinus, plastomer, dan biochar juga telah digunakan untuk memodifikasi aspal, umumnya dengan hasil yang positif terhadap sifat reologi dan daya tahan perkerasan. Temuan ini menunjukkan bahwa belerang merupakan salah satu bahan tambah yang potensial untuk meningkatkan performa aspal.

## 2. METODE PENELITIAN

### Bahan penelitian

#### A. Aspal

Aspal yang digunakan adalah aspal dengan PEN 60/70 yang sering digunakan dalam perkerasan jalan.



Gambar 1. Aspal

#### B. Belerang

Belerang yang digunakan merupakan belerang yang sudah disediakan oleh Laboraturium Transportasi Universitas Jenderal Soedirman, Belerang yang digunakan bersumber dari belerang pabrik.



Gambar 2. Belerang

### Peralatan penelitian

#### A. Piknometer

Alat ini digunakan untuk pengujian berat jenis aspal. Cara kerjanya dengan mengisi piknometer menggunakan aspal, lalu menghitung massanya.



Gambar 3. Piknometer

#### B. Gelas bejana

Digunakan untuk merendam aspal saat uji titik lembek. Fungsinya sebagai wadah untuk menampung air atau gliserin sebagai media pemanasan saat aspal dipanaskan secara terkontrol. Gelas ini dirancang tahan panas dan memastikan distribusi suhu merata, sehingga titik lembek aspal dapat diukur secara akurat.



Gambar 4. Gelas Bejana

#### C. Transfer dish

Merupakan wadah yang terdapat penyangga di dalamnya kemudian diisi air untuk merendam sampel saat pengujian penetrasi. Alat ini memastikan sampel aspal tetap konsisten dan siap untuk diuji, sehingga hasil pengujian penetrasi (kedalaman jarum yang masuk ke aspal) akurat dan dapat diandalkan.



Gambar 5. Transfer Dish

#### D. Cawan

Cawan digunakan sebagai wadah bahan material saat pengujian material berlangsung. Cawan ini memastikan sampel aspal siap diuji dengan jarum penetrasi untuk mengukur kekerasan dan konsistensinya.



**Gambar 6.** Cawan

#### E. Timbangan Digital

Memiliki ketelitian 0,1 gram dan digunakan untuk menimbang material saat pengujian. Timbangan ini memudahkan proses pengukuran dan meningkatkan keandalan hasil uji.



**Gambar 7.** Timbangan Digital

#### F. Kompor

Kompor digunakan dalam pengujian aspal untuk memanaskan sampel aspal hingga mencapai suhu tertentu sesuai standar uji. Fungsinya memastikan aspal mencair secara merata dan siap untuk proses pengujian lebih lanjut.



**Gambar 8.** Kompor

#### G. Termometer

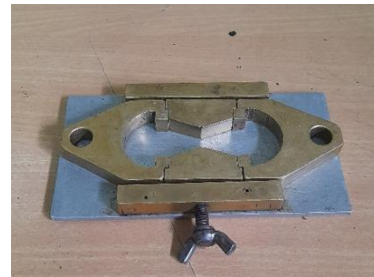
Merupakan alat yang digunakan untuk mengukur suhu aspal selama proses pengujian, seperti pemanasan atau pendinginan. Ketelitiannya memastikan suhu aspal sesuai dengan standar yang ditetapkan.



**Gambar 9.** Termometer

#### H. Cetakan Daktilitas

Merupakan mencetak aspal sebelum uji daktilitas. Fungsinya memastikan sampel aspal memiliki dimensi yang konsisten, sehingga hasil pengujian elongasi (daya tarik) aspal akurat dan dapat diandalkan.



**Gambar 10.** Cetakan Daktilitas

#### I. Cincin Kuningan dan Bola Baja

Merupakan komponen utama dalam pengujian titik lembek aspal. Cincin kuningan berfungsi sebagai wadah untuk menampung sampel aspal, sementara bola baja diletakkan di atas aspal. Saat dipanaskan, aspal melunak hingga bola baja turun ke titik tertentu, yang menunjukkan suhu titik lembek.



**Gambar 11.** Cincin Kuningan



**Gambar 12.** Bola Baja

**J. Dudukan Benda Uji Titik Lembek**

Alat yang digunakan untuk menahan cincin kuningan berisi sampel aspal dan bola baja selama pengujian titik lembek. Fungsinya memastikan posisi cincin dan bola baja tetap stabil dan vertikal saat dipanaskan.



**Gambar 13.** Dudukan Benda Uji Titik Lembek

**K. Saybolt Viskometer**

Alat yang digunakan untuk mengukur viskositas (kekentalan) cairan, termasuk aspal, dengan cara menghitung waktu yang dibutuhkan untuk sejumlah cairan mengalir melalui lubang kecil pada suhu tertentu.



**Gambar 14** Saybolt Viskometer

**L. Mesin Penetrometer**

Alat yang digunakan untuk mengukur kekerasan aspal dengan cara menekan jarum standar ke dalam sampel aspal pada suhu dan waktu tertentu. Hasilnya dinyatakan dalam satuan penetrasi (1/10 mm) yang menunjukkan seberapa dalam jarum masuk ke aspal.



**Gambar 15.** Mesin Penetrometer

**M. Daktilometer**

Alat yang digunakan untuk mengukur daktilitas (daya tarik) aspal dengan menarik sampel aspal berbentuk briket hingga putus. Alat ini mencatat panjang maksimum aspal dapat meregang sebelum putus.



**Gambar 16.** Daktilometer

**N. Cleveland Open Cup**

Alat yang digunakan untuk mengukur suhu nyala (*flash point*) dan suhu bakar (*fire point*) aspal atau cairan mudah terbakar lainnya. Alat ini terdiri dari cawan logam yang dipanaskan, di mana sampel aspal ditempatkan dan dipanaskan secara terkontrol.



**Gambar 17.** Cleveland Open Cup

**Pembuatan benda uji**

Penulis membuat sampel aspal modifikasi belerang sebanyak 1200 g atau 1,2 kg untuk setiap campuran 4%, 5%, dan 6%. 1200 g didapat dengan menjumlahkan kebutuhan aspal pada setiap pengujiannya dengan asumsi setiap pengujian dibutuhkan 2-3 sampel. Lalu jumlah belerang didapat dengan mengkalikan persen belerang modifikasi dengan total aspal. Perhitungan kebutuhan aspal dan belerang sebagai berikut:

**Tabel 1.** Kebutuhan Aspal Pengujian

Benda Uji	Kebutuhan Aspal
Berat Jenis	37,5 g
Uji Penetrasi	180 g
Daktilitas	120 g
Viskositas	720 g

Uji Suhu Titik Nyala dan Bakar	120 g
Uji Suhu Titik Lembek	15 g
Total (dibulatkan)	1200 g

**Tabel 2.** Kebutuhan Belerang Pengujian

Benda Uji	Kebutuhan Belerang
Sampel 4%	48 g
Sampel 5%	60 g
Sampel 6%	72 g

Tahapan dalam pembuatan sampel aspal modifikasi belerang sebagai berikut:

1. Siapkan 1200 g aspal pada wadah tahan panas
2. Panaskan aspal murni pada kompor hingga menyentuh suhu 90 °C, pada suhu tersebut aspal sudah berbentuk cair dan siap untuk dicampur dengan bahan tambah. Suhu yang terlalu tinggi ditakutkan akan merusak kualitas dari aspal.
3. Masukkan belerang yang sudah disiapkan ke aspal yang sudah bersuhu 90 °C.
4. Aduk sampel aspal modifikasi belerang dengan alat pengaduk searah jarum jam dengan kecepatan aduk yang konsisten selama 2 menit. Pengadukan jangan terlalu lama dikarenakan belerang yang dipanaskan terlalu lama akan menimbulkan bau tak sedap yang berbahaya untuk tubuh.
5. Setelah campuran belerang dan aspal bersifat homogen, aspal modifikasi siap digunakan untuk pengujian

**Pengujian dan analisis**

Analisis dimulai dengan menguji spesifikasi aspal murni dan aspal modifikasi belerang (4%, 5%, 6%) melalui parameter: nilai penetrasi (PEN), berat jenis, suhu titik lembek, suhu titik nyala/bakar, dan indeks penetrasi (PI) berdasarkan standar AASHTO dan SNI. Hasilnya divisualisasikan dalam grafik perbandingan untuk mengevaluasi pengaruh belerang terhadap sifat reologi aspal, khususnya dalam memperkuat atau melemahkan performanya sebagai bahan pengikat perkerasan.

**Diagram alir penelitian**

Pada penelitian ini diilustrasikan dalam diagram alir untuk mempermudah dalam penyusunan. Dalam penelitian ini secara ringkas memiliki tahapan berupa: tahapan penelitian, pelaksanaan penelitian di laboratorium beserta

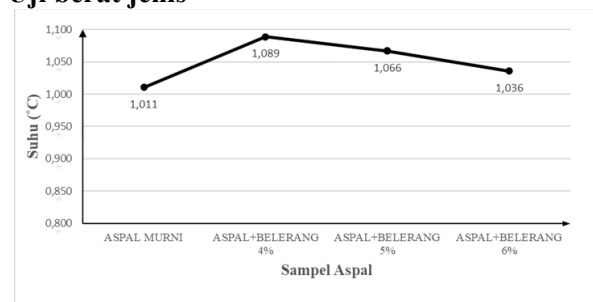
dengan kompilasi data, analisis data dan perumusan hasil yang nantinya menjadi luaran dari penelitian ini.



**Gambar 18.** Diagram Alir Penelitian

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

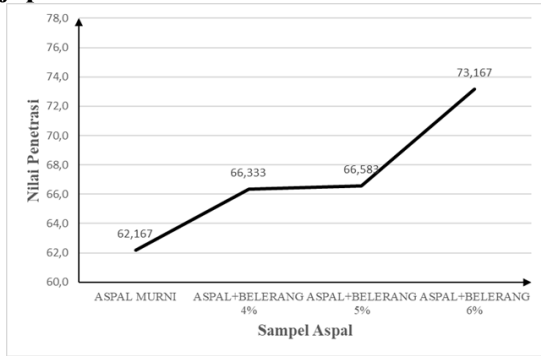
**Uji berat jenis**



**Gambar 19.** Grafik Hasil Uji Berat Jenis Aspal Modifikasi

Penambahan belerang 4% meningkatkan berat jenis aspal secara signifikan dibanding aspal murni dan menunjukkan nilai tertinggi jika dibandingkan dengan kadar 5% dan 6%. Peningkatan ini diduga karena efisiensi pengisian void dan pembentukan ikatan sulfida yang optimal pada kadar tersebut. Namun, kadar belerang berlebih (5-6%) berpotensi bertindak sebagai pengotor yang memicu segregasi fasa, agregasi kristal longgar, serta peningkatan volume rongga, sehingga menurunkan densitas meskipun massa bertambah.

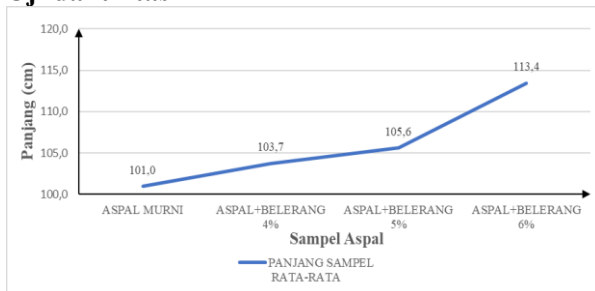
### Uji penetrasi



**Gambar 20.** Grafik Hasil Uji Penetrasi Aspal Modifikasi

Uji penetrasi membuktikan peningkatan nilai penetrasi seiring penambahan belerang: aspal murni, sebesar 62,167, meningkat menjadi 73,167 pada kadar 6% belerang. Kenaikan ini menunjukkan aspal modifikasi lebih lunak pada suhu ruang (25°C), sehingga sesuai untuk daerah dingin dengan volume kendaraan rendah. Namun, risiko *rutting* di daerah panas dengan lalu lintas padat menjadi tantangan.

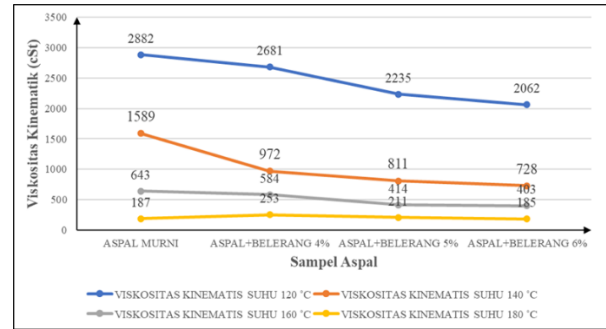
### Uji daktilitas



**Gambar 21.** Grafik Hasil Uji Daktilitas Aspal Modifikasi

Uji daktilitas mengonfirmasi peningkatan fleksibilitas aspal modifikasi. Panjang daktilitas aspal murni (101 cm) naik menjadi 103,7 cm pada aspal modifikasi belerang 4%, lalu menjadi 105,6 cm pada aspal modifikasi belerang 5% dan terakhir menjadi 113,4 cm pada kadar belerang 6%. Hal ini merefleksikan peningkatan ketahanan terhadap *fatigue cracking* akibat regangan, yang merupakan keunggulan reologi belerang.

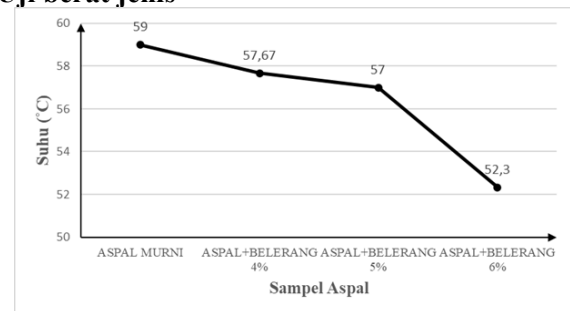
### Uji viskositas



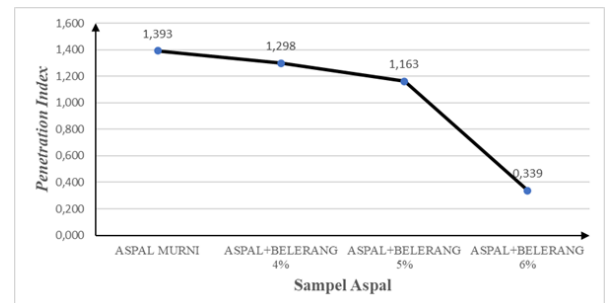
**Gambar 22.** Grafik Hasil Uji Viskositas Aspal Modifikasi

Dapat dilihat dari grafik perbandingan pada Gambar 4. 4, sebagai contoh, pada suhu 120 °C, nilai viskositas kinematik aspal murni didapat sebesar 2882 cSt, lalu turun pada aspal modifikasi belerang dimana penambahan 4% turun menjadi 2681 cSt, 5% menjadi 2235 cSt, dan penambahan belerang 6% turun menjadi 2062 cSt. Nilai viskositas kinematik pada aspal murni yang awalnya tinggi lama kelamaan menurun seiring bertambahnya penambahan belerang terhadap aspal. Hal ini menjelaskan bahwa penambahan belerang pada sifat reologi aspal dapat menurunkan kekentalan aspal.

### Uji berat jenis



**Gambar 23.** Grafik Hasil Uji Titik Lembek Aspal Modifikasi

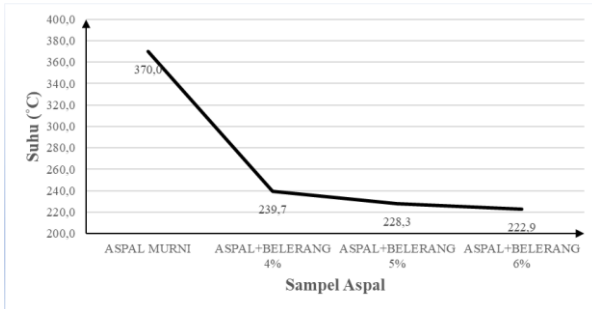


**Gambar 24.** Grafik Hasil Uji Penetration Index Aspal Modifikasi

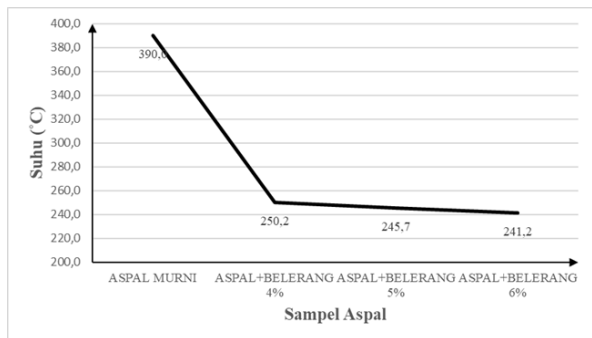
Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan belerang menurunkan suhu titik lembek aspal secara bertahap, dari 59 °C (aspal murni) menjadi 57,67 °C (4%), 57 °C (5%), dan

turun drastis menjadi 52 °C (6%) . Meskipun semua sampel aspal (murni dan modifikasi belerang 4%, 5%, 6%) memiliki *Penetration Index* (PI) di atas 0 sehingga diklasifikasikan kurang peka terhadap suhu menurut kriteria standar , nilai PI yang lebih rendah pada aspal modifikasi belerang menunjukkan sifat yang lebih peka terhadap suhu secara relatif dibandingkan aspal murni.

#### Uji titik nyala dan bakar



**Gambar 25.** Grafik Hasil Uji Titik Nyala Aspal Modifikasi



**Gambar 26.** Grafik Hasil Uji Titik Bakar Aspal Modifikasi

Penambahan belerang 4% meningkatkan berat Penambahan belerang menurunkan titik nyala dan bakar aspal secara signifikan, dari 370°C (titik nyala) dan 390°C (titik bakar) pada aspal murni menjadi 222,9°C (titik nyala) dan 241,2°C (titik bakar) pada kadar 6%. Berdasarkan persyaratan Bina Marga, aspal modifikasi belerang 5% dan 6% tidak memenuhi standar karena titik nyala kurang dari 232°C. Penurunan ini disebabkan penambahan belerang sehingga meningkatkan risiko kebakaran selama produksi dan memerlukan pengawasan suhu ketat di lapangan.

#### 4. PENUTUP

##### Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Suhu titik nyala dan titik bakar aspal modifikasi belerang 5% dan 6% tidak masuk dalam klasifikasi standar pada AASHTO atau SNI.

2. Aspal modifikasi belerang dapat meningkatkan fleksibilitas, ketahanan fatik, sensitivitas termal, workability dan kelunakan pada suhu ruang. Aspal modifikasi juga memiliki beberapa kekurangan dimana terdapat penurunan pada kekentalan, suhu titik nyala, dan suhu titik bakar yang beresiko kebakaran.
3. Nilai aspal modifikasi pada pengujian daktilitas dan penetrasi meningkat dibanding aspal murni. Untuk daktilitas meningkat sebesar 12,3% dan penetrasi sebesar 17,7%.
4. Suhu pada pengujian titik lembek, titik nyala, dan titik bakar, serta nilai viskositas aspal modifikasi menurun dibanding aspal murni. Untuk suhu titik lembek sebesar 11,9%, titik nyala dan bakar sekitar 39,8%, dan viskositas kinematik atau kekentalan sebesar 30,01%.
5. Melalui hasil pengujian propertis aspal modifikasi belerang, dapat diambil kesimpulan bahwa campuran aspal modifikasi belerang 4% adalah campuran yang paling ideal karena memenuhi semua persyaratan pengujian.

#### Saran

Setelah melaksanakan semua tahapan dalam penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat berikan, diantaranya adalah:

1. Penelitian aspal modifikasi belerang berikutnya dapat mencoba penambahan belerang pada 3% untuk melihat dan membandingkan keoptimalan kadar pencampuran belerang bagi aspal.
2. Penelitian berikutnya dapat dilakukan evaluasi penambahan polimer (crumb rubber) bersama belerang untuk mengompensasi efek pelunakkan (softening) dan meningkatkan ketahanan terhadap rutting..
3. Pada penelitian berikutnya perlu diterapkan pengawasan suhu ketat selama pencampuran/pemadatan untuk mitigasi risiko kebakaran dan harus diadakan uji emisi gas ( $H_2S/SO_2$ ) selama produksi guna menjamin keamanan penelitian.
4. Perlu diadakannya Implementasikan pada proyek percontohan di daerah beriklim dingin (sesuai karakteristik penetrasi tinggi) dengan pemantauan jangka panjang terhadap fatigue cracking dan deformasi.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. 2004. Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement. AASHTO Designation: M 20-70. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

- Federal Highway Administration. (2012). *An alternative asphalt binder, sulfur-extended asphalt (SEA)* (FHWA-HIF-12-037). U.S. Department of Transportation.
- Lubis, M., Bima Nusa, A., & Wenny, S. (2024). Analisis Pengaruh Penambahan Belerang pada Aspal AC-WC terhadap Nilai Stabilitas dan Kelelahan Marshall. *Jurnal Penelitian Rumpun Ilmu Teknik*, 3(4), 128–137. <https://doi.org/10.55606/juprit.v3i4.4389>.
- Malik, R. A. (2023). *Pengaruh penambahan belerang pada campuran aspal penetrasi 60/70 terhadap karakteristik Marshall untuk perkerasan AC-WC (Studi penelitian)* [Tugas akhir, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara].
- Mashuri, & Maricar, M. H. (2006). Sifat-sifat Mekanis Aspal yang Ditambahkan Serbuk Arang Tempurung Kelapa. In *Majalah Ilmiah Mektek*.
- Mbhele, N. R., Van Der Merwe, W., Maree, J. P., & Theron, D. (2009). Recovery of Sulphur From Waste Gypsum. *International Mine Water Conference, August 2014*, 622–630.
- Mukhlis, M., Adibroto, F., Ali, S., Fauzi, A., & Padilah, I. (2022). Kinerja Campuran Asphalt Concrete Wearing Course Menggunakan Aspal Modifikasi Dengan Limbah Plastik. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), 267. <https://doi.org/10.29103/tj.v12i1.648>.
- PUPR. (2025). *RDP Bersama Komisi V DPR RI: DJPI Targetkan 34 Proyek KPBU Pada Tahun Anggaran 2025*. <https://pembiayaan.pu.go.id/news/detail/297/RDP-Bersama-Komisi-V-DPR-RI-DJPI-Targetkan-34-Proyek-KPBU-Pada-Tahun-Anggaran-2025>
- Riadi, M. (2022). *Fungsi, Sifat, Jenis dan Analisis Pengujian Aspal*. Kajianpustaka.Com. <https://www.kajianpustaka.com/2019/03/fungsi-sifat-jenis-dan-analisis.html>.
- Rianto, R. H. (2007). Pengaruh Abu Sekam Sebagai Bahan Filler Terhadap Karakteristik Campuran Aspal Emulsi Bergradasi Rapat lubis(CEBR). In *Tesis: Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro*. <http://eprints.undip.ac.id/18837/>
- Rumus kimia. (2025). Rumus Kimia Belerang. Rumuskimia.Net. <https://www.rumuskimia.net/2015/12/rumus-kimia-belerang.html>.
- Yuniarti, R., Mahendra, M., Karyawan, I. D. M. A., Widianty, D., & Salsabila, F. F. (2023). Pengaruh Karakteristik Aspal Modifikasi Getah Pinus Terhadap Peluruhan Campuran Aspal Porus. *Jurnal Sains Teknologi & Lingkungan*, 9(4), 603–610. <https://doi.org/10.29303/jstl.v9i4.531>.