

Pengaruh Bioaspal terhadap Modulus Kekakuan Bitumen Asbuton (Dynamic Shear Rheometer dan Pendekatan Model Matematis Ullidtz)

Atmy Verani Rouly Sihombing

¹ Politeknik Negeri Bandung

¹ atmyvera@polban.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan bioaspal terhadap modulus kekakuan bitumen Asbuton menggunakan pendekatan matematis Ullidtz dan pengujian *Dynamic Shear Rheometer* (DSR). Bitumen Asbuton B 50/30 dimodifikasi dengan bioaspal hasil pirolisis tempurung kelapa (BTK) dan jerami (BJe). Variasi kadar bioaspal ditentukan berdasarkan kesesuaian karakteristik penetrasi dan titik lembek terhadap aspal Pen 60/70 sebagai kontrol. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar optimum bioaspal sebesar 6,5% (BTK) dan 8% (BJe) mampu meningkatkan nilai penetrasi serta menurunkan titik lembek pada kondisi RTFOT, yang mengindikasikan terjadinya efek pelunakan. Perhitungan modulus kekakuan (*Sbit*) dengan pendekatan Ullidtz dan hasil DSR menunjukkan tren yang konsisten, yaitu penurunan kekakuan seiring peningkatan temperatur (20–45°C). Namun demikian, pendekatan Ullidtz cenderung memberikan estimasi lebih rendah dibandingkan DSR, terutama pada temperatur tinggi dan pada bitumen termodifikasi. Faktor penyesuaian sebesar 1,16 diperlukan untuk meningkatkan kesesuaian kedua metode. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bioaspal berpotensi sebagai modifier ramah lingkungan untuk mengontrol kekakuan bitumen Asbuton, serta bahwa pendekatan Ullidtz dapat digunakan sebagai estimasi awal, meskipun pengujian DSR tetap lebih representatif dalam menggambarkan perilaku viskoelastik material.

Kata Kunci: Asbuton, bioaspal, modulus kekakuan, *Dynamic Shear Rheometer*, Ullidtz.

ABSTRACT

This study investigates the effect of bio-binder addition on the stiffness modulus of Buton asphalt (Asbuton) bitumen using the Ullidtz mathematical approach and Dynamic Shear Rheometer (DSR) testing. Asbuton B 50/30 was modified with bio-binders derived from pyrolysis of coconut shells (BTK) and rice straw (BJe). The optimum bio-binder content was determined based on penetration and softening point values comparable to Pen 60/70 asphalt as the control binder. The results indicate that 6.5% BTK and 8% BJe effectively increased penetration and reduced the softening point under RTFOT conditions, demonstrating a significant softening effect. The calculated stiffness modulus (*Sbit*) from the Ullidtz model and DSR measurements exhibited a consistent decreasing trend with increasing temperature (20–45°C), reflecting the viscoelastic behavior of asphalt. However, the Ullidtz approach generally underestimated stiffness values compared to DSR results, particularly at higher temperatures and for modified binders. An adjustment factor of 1.16 was applied to improve the agreement between both methods. The findings confirm that bio-binders have strong potential as sustainable modifiers to control the stiffness of Asbuton bitumen. While the Ullidtz approach provides a practical preliminary estimation, DSR testing remains more reliable for accurately characterizing the mechanistic and viscoelastic behavior of modified asphalt binders.

Key words: Asbuton, bio-binder, stiffness modulus, *Dynamic Shear Rheometer*, Ullidtz.

Submitted:	Reviewed:	Revised:	Published:
05 Januari 2026	15 Februari 2026	25 Februari 2026	27 Februari 2026

PENDAHULUAN

Pemanfaatan batuan aspal buton (Asbuton) sebagai bahan pengikat campuran beraspal lokal memiliki peran strategis dalam mendukung kemandirian material perkerasan jalan di Indonesia. Asbuton adalah batuan aspal yang terdapat di Pulau Buton, Sulawesi Tenggara, Indonesia, dengan deposit 200 juta ton atau setara dengan pemakaian selama 100 tahun (Affandi, 2008; KemenPUPR & Bineka, 2020; Rahman, 2010; Sihombing, 2020; Yamin et al., 2014). Asbuton dikenal memiliki karakteristik kekakuan yang relatif tinggi dan stabilitas termal

yang baik, sehingga berpotensi meningkatkan ketahanan deformasi permanen pada perkerasan jalan. Namun demikian, sifat viskoelastik bitumen Asbuton sangat dipengaruhi oleh temperatur dan waktu pembebanan, sehingga pengendalian modulus kekakuan menjadi aspek penting dalam menjamin kinerja perkerasan sepanjang umur layan. Karena bentuknya yang merupakan batuan aspal, sehingga diperlukan *modifier* untuk mengeluarkan aspal yang terperangkap di dalam batuan.

Modifier yang digunakan pada aspal batuan, harus memiliki karakteristik yang mirip air yaitu mudah untuk masuk ke pori terkecil dari batuan namun mampu memodifikasi aspal keras menjadi lebih lunak agar dapat mengeluarkan aspal dari batu sebagai cangkangnya. Bioaspal adalah aspal yang dihasilkan dari pirolisis biomassa lignoselulosa yang memiliki karakteristik sebagai modifier untuk asbuton (Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga, 2006; Sihombing et al., 2021; Sihombing & Sihombing, 2022)

Dalam beberapa tahun terakhir, bioaspal atau bio-binder semakin banyak dikembangkan sebagai alternatif bahan pengikat yang lebih ramah lingkungan. Bioaspal umumnya mengandung senyawa aromatik dan polar yang berpotensi berinteraksi dengan fraksi pengikat aspal, sehingga dapat memodifikasi struktur koloidal dan respons viskoelastik binder (Fardyanti, 2020; Fini et al., 2011; Li et al., 2025; Mills-Beale et al., 2014; Sihombing et al., 2018; Zhang et al., 2022). Pada pengikat konvensional, penambahan bioaspal dilaporkan mampu menurunkan kekakuan pada suhu rendah serta meningkatkan fleksibilitas (Cavalli et al., 2024; Peralta et al., 2012; Tayh et al., 2017), namun pengaruhnya terhadap bitumen Asbuton yang memiliki karakteristik mineral bitumen yang khas masih belum banyak dikaji secara sistematis.

Modulus kekakuan aspal (*Sbit*) merupakan parameter fundamental yang merepresentasikan respons mekanistik aspal terhadap pembebanan lalu lintas (Radovskiy & Teltayev, 2018; Sihombing et al., 2023; Tayebali et al., 1994). Secara matematis, modulus kekakuan dapat diperkirakan menggunakan pendekatan persamaan dari Ullidtz yang diturunkan dari nomogram Van der Poel, yang mengaitkan sifat viskoelastik aspal dengan temperatur dan waktu pembebanan (Hunter et al., 2015; Read & Whiteoak, 2003; Ullidtz & Larsen, 1983). Pendekatan ini banyak digunakan dalam analisis mekanistik klasik karena relatif sederhana dan kompatibel dengan ketersediaan data terbatas. Namun, validitas pendekatan Van der Poel pada pengikat yang telah dimodifikasi, khususnya dengan bioaspal, masih memerlukan verifikasi eksperimental.

Seiring berkembangnya pendekatan reologi modern, *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) menjadi metode standar untuk mengevaluasi sifat

viskoelastik pengikat aspal melalui parameter modulus kompleks (G^*) dan sudut fase (δ) pada berbagai kondisi suhu dan frekuensi pembebanan (AASHTO T315-10, 2010; Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, 2023; Xue et al., 2014). Pengujian DSR mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perilaku elastis dan viskos pengikat, serta banyak digunakan sebagai dasar evaluasi potensi ketahanan terhadap deformasi permanen dan retak lelah. Meskipun demikian, hasil DSR sering kali belum secara langsung dikaitkan dengan pendekatan prediktif klasik seperti Van der Poel, khususnya pada pengikat non konvensional seperti Asbuton yang dimodifikasi bioaspal.

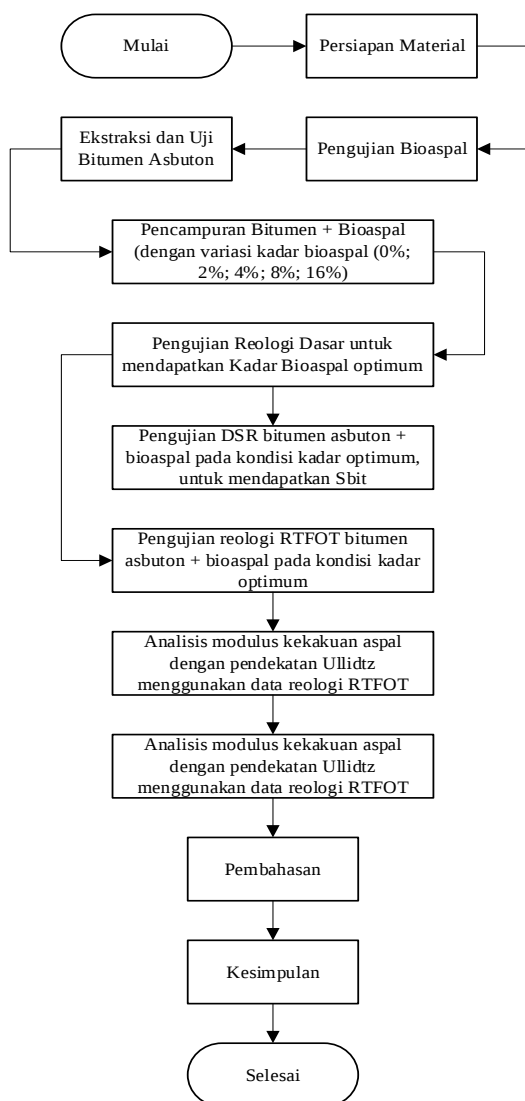
Berdasarkan latar belakang tersebut, diperlukan kajian yang mengintegrasikan pendekatan teoritis dan eksperimental untuk memahami pengaruh bioaspal terhadap modulus kekakuan Asbuton secara lebih komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis bioaspal terhadap modulus kekakuan bitumen Asbuton menggunakan pendekatan matematis Ullidtz dan hasil pengujian *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), serta mengevaluasi tingkat konsistensi dan perbedaan antara kedua pendekatan tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan bitumen Asbuton termodifikasi bioaspal yang lebih berkelanjutan, sekaligus menjadi dasar pemilihan parameter kekakuan yang relevan untuk analisis dan desain perkerasan jalan lentur di Indonesia.

MATERIAL DAN METODE

Metode Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan, dimulai dengan studi literatur, persiapan bahan, pengujian karakteristik bioaspal, ekstraksi bitumen asbuton, pengujian bitumen asbuton, pencampuran bitumen asbuton dengan bioaspal, pengujian reologi dasar campuran bitumen, pengujian reologi mekanistik campuran bitumen, analisis matematis kekakuan aspal, analisis perbandingan, pembahasan, kesimpulan.

Adapun tahapan dari pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Bitumen Asbuton

Bitumen asbuton adalah aspal yang dihasilkan dari ekstraksi asbuton batuan menggunakan metode sentrifugal (Gambar 2) yang diproses dalam kondisi dingin dengan bahan pengencer *trichlorethylene*. Untuk memisahkan bitumen asbuton dengan bahan pengencer digunakan *rotary evaporator* (Gambar 3).



Gambar 2. Alat Ekstraksi Sentrifugal (ASTM D2172)



Gambar 3. Rotary Evaporator

Pada penelitian ini asbuton yang digunakan adalah asbuton butir B 50/30 (Gambar 3) yang berasal dari Pulau Buton daerah Lawele. Hasil ekstraksi dari Asbuton B 50/30 dapat dilihat pada Gambar 4, Tabel 1 dan 2. Karakterisasi bitumen asbuton dilakukan terhadap 3 (tiga) sampel asbuton B 50/30.



Gambar 4. Asbuton B 50/30



Gambar 5. Bitumen Asbuton B 50/30

Tabel 1. Karakteristik Asbuton B 50/30

Parameter	Spesifikasi	Hasil
Kadar Bitumen, %	25 – 30	28
Kadar Air, %	Maks 2,0	0,81
Ukuran Butir Asbuton, Inch	Maks 3/8"	Maks 3/8
Berat Jenis	Min 1,0	1,05

Tabel 2. Gradasi Agregat Asbuton B 50/30

Ukuran Saringan	% Lolos Kumulatif
3/8" (9,25 mm)	100
4,75 mm	99
2,36 mm	97,1
1,18 mm	95,7
0,6 mm	94,4
No. 50	92,2
No. 100	62,5
No. 200	39,0
Pan	0

Aspal Pen 60/70

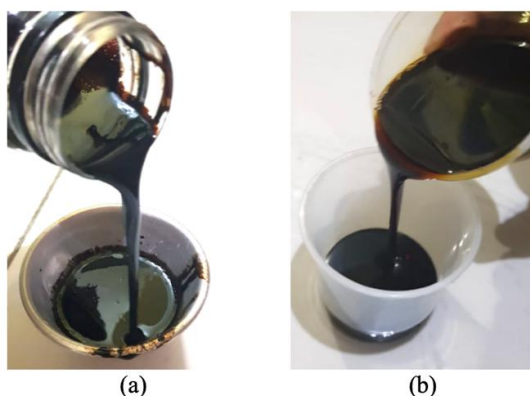
Untuk mengontrol modifikasi aspal/bitumen asbuton, aspal pen 60/70 dijadikan aspal kontrol yang menjadi patokan terjadinya modifikasi terhadap bitumen asbuton. Aspal pen 60/70 dipilih karena jenis aspal ini adalah jenis yang paling umum digunakan di Indonesia. Aspal pen 60/70 yang digunakan pada penelitian ini diambil dari PT. Pertamina, Tbk dengan karakteristik seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.

Bioaspal

Bioaspal yang digunakan pada penelitian ini dihasilkan dari pirolisis biomassa tempurung kelapa (BTK) dan jerami (BJe). Adapun gambaran dan karakteristik dari kedua bioaspal tersebut dapat dilihat pada Gambar 5 dan Tabel 4.

Tabel 3. Karakteristik Aspal Pen 60/70

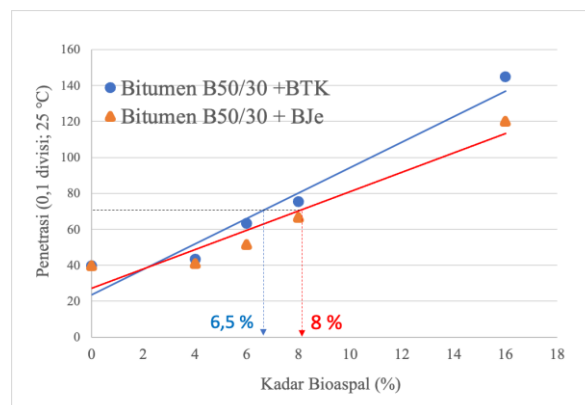
Parameter	Spesifikasi	Hasil Uji
Penetrasi, 25 °C, 100 gr, 5 detik (dmm)	60 – 70	65
Viskositas Kinematis 135 °C (cSt)	≥ 300	409,6
Titik Lembek (°C)	≥ 48	51
Daktilitas, 25 °C, 5 cm/menit	≥ 100	> 100
Titik Nyala dgn Clevelen Open Cup (°C)	≥ 232	340
Kelarutan dalam Trichloroethylene (%)	≥ 99	99,868
Berat Jenis	≥ 1	1,024

**Gambar 6.** Bioaspal: (a) BTK, dan (b) Bje**Tabel 4.** Karakteristik Bioaspal

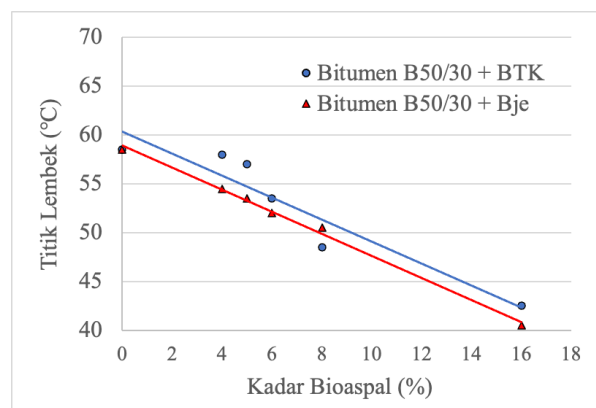
Karakteristik	Satuan	Bioaspal	
		BTK	Bje
Kadar Air	%	10 - 20	< 0,75
Berat Jenis	Kg/L	1,008	0,92 – 0,95
Viskositas (60 °C)	Cps	< 100	< 100
Titik Nyala	°C	195	218
Gambaran Visual	-	Hitam kecoklatan	Hitam

Campuran Bitumen Asbuton dan Bioaspal

Pencampuran bitumen asbuton dengan bioaspal dilakukan pada suhu 120 °C menggunakan *magnetic stirrer with hot plate*, dengan kecepatan pengadukan 0,4 – 0,6 kr/sec selama 15 – 20 menit (Sihombing et al., 2021).

**Gambar 7.** Nilai Penetrasi Bitumen Asbuton + Bioaspal (dengan berbagai variasi kadar)

Variasi kadar bioaspal yang digunakan adalah 0%; 4%; 6%; 8%; dan 16% terhadap berat bitumen asbuton (@ 3 sampel). Selanjutnya setiap sampel diuji berdasarkan reologi dasar yaitu penetrasi dan titik lembek. Kadar bioaspal yang dapat memodifikasi bitumen asbuton hingga mencapai kriteria aspal pen 60/70 sebagai aspal kontrol, selanjutnya menjadi kadar bioaspal yang digunakan untuk menghasilkan campuran bitumen asbuton dan bioaspal yang akan diuji reologi mekanistiknya dengan *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) dan pendekatan matematis (Ullidtz) untuk mendapatkan modulus kekakuan aspal (*Sbit*).

**Gambar 8.** Nilai Titik Lembek Bitumen Asbuton + Bioaspal (dengan berbagai variasi kadar)

Adapun hasil pengujian reologi dasar dari setiap jenis campuran bitumen dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7. Dari hasil pengujian tersebut didapatkan bahwa kadar bioaspal untuk memodifikasi bitumen asbuton hingga mencapai karakteristik aspal pen 60/70 adalah 6,5% untuk BTK dan 8% untuk Bje.

Modulus Kekakuan Aspal (*Sbit*)

Pendekatan matematis (Ullidtz)

Modulus kekakuan aspal (*Sbit*) adalah salah satu parameter yang mempengaruhi kekakuan campuran beraspal (*Smix*). Pendekatan matematis dari *Sbit* diturunkan dari nomogram Van der Poel oleh Ullidtz dan Larsen pada tahun 1983. Van der Poel mengembangkan nomogramnya untuk memprediksi kekakuan aspal menggunakan parameter PI (*penetration index*) yang didapatkan dari nilai penetrasi dan titik lembek aspal dan diuji secara rutin. Pfeiffer, van Doormaal dan Van der Poel mengembangkan perumusan efek waktu pembebanan dan suhu dalam perhitungan PI dan menemukan bahwa dalam kebanyakan kasus ketergantungan waktu pembebanan, atau reologi dari aspal adalah efek yang dominan. Dari hasil penelitiannya menyimpulkan bahwa PI adalah gambaran perkiraan yang logis dari sifat reologi aspal, dan bukan parameter yang hanya menunjukkan kepekaan aspal terhadap perubahan temperatur.

Van der Poel menyatakan bahwa dua jenis aspal yang memiliki nilai PI yang sama pada waktu pembebanan yang sama akan memiliki nilai modulus kekakuan aspal (*Sbit*) yang setara, pada temperatur yang berbeda dari masing-masing titik lembek kedua jenis aspal tersebut. Adapun input parameter yang digunakan pada nomogram Van der Poel, diantaranya adalah (a) Temperatur (*T*), °C; (b) Titik Lembek (*SPr*) dari uji *ring and ball*, °C; (c) waktu pembebanan (*t*), detik; dan (d) Indeks penetrasi (IP), yang merupakan ukuran dari kepekaan aspal terhadap perubahan temperatur. Nomogram Van der Poel secara praktis dapat dipergunakan untuk memprediksi nilai modulus kekakuan aspal (*Sbit*) secara luas, dengan hanya menggunakan data penetrasi dan titik lembek. Dari nomogram Van der Poel, diturunkan sehingga menghasilkan persamaan matematis Ullidtz (Ullidtz & Larsen, 1983) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1).

$$Sbit = 1,157 * 10^{-7} * t^{-0,368} * 2,718^{-PIr} * (SPr - T)^5 \quad \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

- Sbit* = Stiffness bitumen (MPa)
- t* = Waktu pembebanan (detik)
- Pir* = Penetration index recovered
- SPr* = Temperatur titik lembek (°C)

T = Temperatur aspal (°C)

Persamaan (1) dapat diterapkan jika memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

- t* = 0,01 – 0,1 detik
- Pir* = -1 sampai +1
- (*SPr* – *T*) = 20 °C – 60 °C

Indek penetrasi dapat dihitung dari *SPr* (temperatur titik lembek) dan penetrasi aspal setelah dihamparkan, dihitung dengan persamaan (2).

$$PIr = \frac{1951,4 - 500 \log Pr - 20 SPr}{50 \log Pr - SPr - 120,14} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Aspal mengalami pengerasan selama proses pencampuran hingga penghamparan, sehubungan dengan nilai indek penetrasi (*Pir*) dan titik lembek (*SPr*) dalam persamaan (2) dalam kondisi yang sudah dihamparkan, maka dalam perhitungan dengan Persamaan (2), dibuat asumsi seperti tertulis pada persamaan (3) dan persamaan (4).

$$Pr = 0,65 Pi \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$SPr = 98,4 - 26,35 \log Pr \quad \dots\dots\dots(4)$$

dimana:

- Pi* = Penetrasi aspal dalam kondisi asli (0,1 mm)
- Pr* = Penetrasi aspal dalam kondisi dihamparkan (0,1 mm)
- SPr* = Titik lembek aspal dalam kondisi dihamparkan (°C)

Karena sebagian besar perhitungan perencanaan berdasarkan pada tingkat nominal dari karakteristik aspal terhadap penetrasi awalnya, substitusi dari Persamaan (3) dan (4) kedalam Persamaan (2), memberikan persamaan untuk indek penetrasi dalam kondisi dihamparkan seperti tertulis pada Persamaan (5).

$$PIr = \frac{27 \log Pi - 21,65}{76,35 \log Pi - 232,82} \quad \dots\dots\dots(5)$$

Untuk menentukan waktu pembebanan, membutuhkan perkiraan tebal lapisan aspal (mm). Sebagai alternatif dapat digunakan persamaan (6).

$$\log t = 5 * 10^{-4} * h - 0,2 - 0,94 * \log v \quad \dots\dots\dots(6)$$

dimana:

- h* = Tebal perkerasan
- v* = Kecepatan kendaraan dalam km/jam

Waktu pembebanan untuk tebal lapis perkerasan antara 100 – 350 mm dapat diperkirakan dari hubungan empiris yang sederhana seperti tertulis pada persamaan (7).

$$t = \frac{1}{v} \text{ (detik)} \quad \dots\dots\dots(7)$$

dimana :

- v* = Kecepatan kendaraan dalam km/jam

Dengan demikian S_{bit} dapat diketahui berdasarkan nilai penetrasi dan titik lembek aspal pada kondisi aspal setelah dihamparkan atau kondisi setelah RTFOT (*rolling thin film oven test*).

Dynamic Shear Rheometer (DSR)

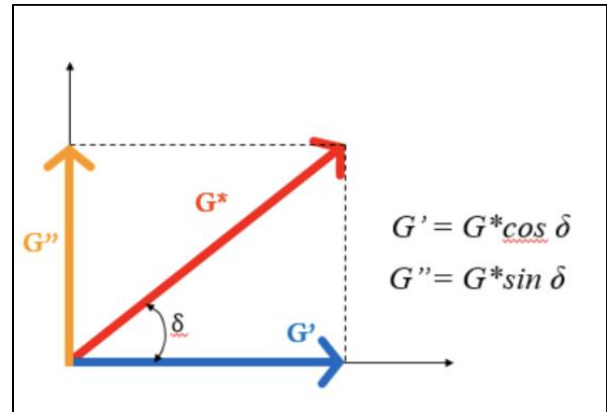
Reologi aspal dapat diukur dengan *Dynamic Mechanical Analysis* (DMA) menggunakan pengujian tipe osilasi dengan alat *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) yang umumnya dilakukan pada daerah respon viskoelastis linier aspal. Alat uji yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 8. DMA memungkinkan pengukuran sifat viskoelastik aspal pada berbagai tingkat suhu dan waktu pembebanan. Sampel aspal diletakkan diantara dua piringan atau pelat sejajar, yang kemudian diputar sehingga menimbulkan tegangan dan regangan geser. Pengujian dapat dilakukan dalam mode *stress-controlled* atau *strain-controlled*, tergantung pada variabel mana yang dikendalikan oleh alat uji. Kondisi uji yang biasanya digunakan untuk menentukan sifat reologi dinamis aspal adalah *strain-controlled*. Penggunaan kondisi regangan terkontrol memastikan bahwa *strain* tetap kecil dan oleh karena itu berada dalam daerah viskoelastis linier.



Gambar 9. Alat *Dynamic Shear Rheometer*

Pada pengujian ini, juga dihasilkan Modulus geser kompleks (*Complex Shear Modulus*, G^*) yang merupakan parameter mekanistik aspal dan lebih menggambarkan karakteristik aspal sebagai material yang viskoelastik.

Pengujian *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) memodelkan gaya geser yang terjadi pada lalu lintas dengan kecepatan tertentu dan menentukan dua parameter yang digunakan untuk memperkirakan *pavement performance*. Dua parameter yang didapatkan yaitu *Complex Shear Modulus* (G^*) dan *Phase Angle* (δ). Parameter G^* merupakan resultan (penjumlahan vektor) dari sifat elastis dengan notasi G' (*storage modulus*) dan sifat viskos dengan notasi G'' (*loss modulus*), seperti yang diilustrasikan pada Gambar 9.



Gambar 10. Ilustrasi hubungan antara G^* dan δ dengan komponen G' (*Storage Modulus*) dan G'' (*Loss Modulus*)

Phase Angle (δ) dapat digunakan untuk menjelaskan perilaku viskoelastik dari aspal. Jika yang diuji adalah material *viscous*, maka nilai *Phase Angle* (δ) bernilai 90° yang berarti $G' = 0$ dan $G'' = G^*$. Jika yang diuji adalah material elastik, maka nilai *Phase Angle* (δ) bernilai 0 yang berarti $G' = G^*$ dan $G'' = 0$.

Pada keadaan material elastik tidak ditemukan adanya perbedaan fase antara pemberian tegangan dan terjadinya regangan. Pada suhu rendah dan frekuensi tinggi, terjadi *Phase Angle* (δ) yang kecil karena bitumen berperilaku elastis. Sedangkan pada temperatur tinggi dan frekuensi rendah nilai *Phase Angle* (δ) menjadi lebih besar karena sifat bitumen mendekati *Viscous*.

Nilai Modulus Kekakuan Aspal (S_{bit}) berdasarkan data *Complex Shear Modulus* (G^*) dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang ditunjukkan pada persamaan (8).

$$S_{bit} = 2 \times G^* \times (1 + \mu) \dots \dots \dots (8)$$

dengan:

S_{bit} = Modulus Kekakuan Aspal

G^* = *Complex Shear Modulus*

μ = *Poisson Ratio* ($i = + 0,5$ untuk hampir semua jenis aspal)

Pada penelitian ini, Pengujian reologi aspal secara mekanistik (G^* dan δ) dilakukan dengan menggunakan alat DSR dengan mengacu pada AASHTO T315 – 10 *Standard Method of Test For Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using A Dynamic Shear Rheometer* (DSR) (AASHTO T315-10, 2010). Pengujian DSR dilakukan pada 3 (tiga) kondisi aspal yaitu original (*unaged binder*) yang menggambarkan tahapan pertama pada penghantaran dan penyimpanan, kondisi setelah RTFOT yang menggambarkan tahapan kedua yaitu penuaan pada saat produksi di unit pencampur aspal dan pelaksanaan di lapangan serta kondisi setelah PAVT yang menggambarkan

tahapan akhir yaitu penuaan pada saat selama masa pelayanan perkerasan.

Jenis pengujian yang digunakan adalah DSR *Frequency Sweep* pada frekuensi uji 10 rad/s dengan suhu pengujian mengacu pada rentang suhu yang terdapat dalam tabel spesifikasi aspal PG AASHTO M320 (AASHTO M320, 2015). Pengujian pada kondisi original dilakukan pada strain 12% dan rentang temperatur 52 °C sampai dengan 76 °C dengan interval 6 °C, pada kondisi RTFOT strain 10% dan rentang temperatur 52 °C sampai dengan 76 °C dengan interval 6 °C, sedangkan pada kondisi PAVT strain 1% dan rentang suhu 22 °C sampai dengan 28 °C dengan interval 3 °C.

Terkait dengan perilaku mekanistik aspal, *SUPERPAVE* menetapkan batasan besaran G^* dan δ . Terhadap parameter alur (rutting parameter) ditetapkan besaran minimum $G^*/\sin \delta$ adalah sebesar 1 kPa untuk kondisi asli dan sebesar 2,2 kPa untuk kondisi penuaan dengan RTFOT. Sedangkan terhadap parameter retak lelah (*fatigue cracking*) *SUPERPAVE* menetapkan besaran maksimum 5000 kPa untuk $G^*\sin \delta$ untuk kondisi penuaan PAVT setelah RTFOT. Dalam analisis komparatif, kondisi yang digunakan adalah kondisi RTFO, pada temperatur yang sama dengan pengujian DSR (20 °C; 25 °C; 35 °C; 45 °C), serta waktu pembebanan (t) sebesar 0,02 detik yang berbanding lurus dengan frekuensi pembebanan 8

Hz, yang juga dianggap merepresentasikan kecepatan kendaraan berkisar antara 30 mph hingga 40 mph.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Input Pendekatan Matematis (Ullidtz)

Untuk menentukan nilai S_{bit} berdasarkan pendekatan matematis (Ullidtz), parameter input harus diketahui melalui pengujian penetrasi dan titik lembek (*softening point*) pada kondisi RTFO di laboratorium. Kadar bioaspal untuk memodifikasi bitumen B 50/30 adalah 6,5% untuk BTK dan 8% untuk Bje. Adapun data input yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai S_{bit} berdasarkan pendekatan matematis (Ullidtz) dapat dilihat pada Tabel 5.

Berdasarkan data input pada Tabel 5, diperoleh nilai penetrasi pada kondisi RTFOT (Pr) untuk masing-masing jenis aspal. Nilai penetrasi aspal pen 60/70 sebesar 38,2 (0,1 mm); Bitumen B 50/30 sebesar 22,1 dmm; Bitumen B 50/30 + BTK sebesar 36,2 dmm; dan Bitumen B 50/30 + Bje sebesar 37,1 dmm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan bioaspal memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik bitumen asbuton. Setelah pencampuran dengan bioaspal, bitumen asbuton mengalami peningkatan nilai penetrasi pada kondisi RTFOT, dari 22,1 dmm menjadi 36,2 dmm (BTK) dan 37,1 dmm (Bje), yang mengindikasikan terjadinya proses pelunakan (*softening effect*).

Tabel 5. Data Input untuk S_{bit} dengan Pendekatan Ullidtz

Jenis Aspal	Temperatur Benda Uji °C	t (detik)	Pi	PI	Pr	SPr	Pir	SPr-T	S_{bit} (MPa)
Pen 60/70	20	0,02	58,8	0,61	38,2	56,7	0,043	36,7	31,18
	25	0,02	58,8	0,61	38,2	56,7	0,043	31,7	14,99
	35	0,02	58,8	0,61	38,2	56,7	0,043	21,7	2,25
	40	0,02	58,8	0,61	38,2	56,7	0,043	16,7	0,61
	45	0,02	58,8	0,61	38,2	56,7	0,043	11,7	0,10
	60	0,02	58,8	0,61	38,2	56,7	0,043	-3,3	0,00
Bitumen B50/30	20	0,02	34,0	1,05	22,1	63,0	0,040	43,0	68,73
	25	0,02	34,0	1,05	22,1	63,0	0,040	38,0	37,03
	35	0,02	34,0	1,05	22,1	63,0	0,040	28,0	8,03
	40	0,02	34,0	1,05	22,1	63,0	0,040	23,0	3,00
	45	0,02	34,0	1,05	22,1	63,0	0,040	18,0	0,88
	60	0,02	34,0	1,02	22,1	57,7	0,254	-2,3	0,00
Bitumen B50/30 + BTK	20	0,02	55,7	0,36	36,2	57,3	0,042	37,3	33,90
	25	0,02	55,7	0,36	36,2	57,3	0,042	32,3	16,52
	35	0,02	55,7	0,36	36,2	57,3	0,042	22,3	2,60
	40	0,02	55,7	0,36	36,2	57,3	0,042	17,3	0,73
	45	0,02	55,7	0,36	36,2	57,3	0,042	12,3	0,13
	60	0,02	55,7	0,36	36,2	57,3	0,042	-2,7	0,00
Bitumen B50/30 + Bje	20	0,02	57,0	-0,64	37,1	57,1	0,042	37,1	32,72
	25	0,02	57,0	-0,64	37,1	57,1	0,042	32,1	15,85
	35	0,02	57,0	-0,64	37,1	57,1	0,042	22,1	2,45
	40	0,02	57,0	-0,64	37,1	57,1	0,042	17,1	0,68
	45	0,02	57,0	-0,64	37,1	57,1	0,042	12,1	0,12
	60	0,02	57,0	-0,64	37,1	57,1	0,042	-2,9	0,00

Temuan ini konsisten dengan hasil pengujian titik lembek (softening point) pada kondisi RTFOT. Nilai titik lembek mengalami penurunan setelah penambahan bioaspal, yaitu dari 63 °C pada Bitumen B 50/30 menjadi 57,3 °C untuk campuran dengan BTK dan 57,1 °C untuk campuran dengan Bje. Penurunan titik lembek tersebut memperkuat indikasi bahwa bioaspal berperan dalam meningkatkan fleksibilitas atau menurunkan kekakuan bitumen asbuton.

Kecenderungan perubahan sifat fisik tersebut berimplikasi langsung terhadap nilai modulus kekakuan aspal (*Sbit*). Sejalan dengan meningkatnya nilai penetrasi dan menurunnya titik lembek, nilai *Sbit* juga menunjukkan penurunan setelah penambahan bioaspal. Hal ini mengindikasikan bahwa modifikasi bioaspal tidak hanya mempengaruhi parameter konvensional, tetapi juga berdampak pada respons mekanistik material aspal.

Modulus Kekakuan Aspal (*Sbit*) (DSR vs Ullidtz)

Tabel 6 menyajikan perbandingan nilai modulus kekakuan aspal (*Sbit*) yang diperoleh melalui pengujian Dynamic Shear Rheometer (DSR) dan pendekatan matematis Ullidtz pada variasi temperatur 20–45 °C. Secara umum, kedua metode menunjukkan tren yang konsisten, yaitu penurunan nilai *Sbit* seiring dengan meningkatnya temperatur pengujian. Hal ini mencerminkan perilaku viskoelastis aspal yang semakin lunak pada temperatur tinggi.

Tabel 6. Perbandingan *Sbit* hasil Pengujian DSR dan Pendekatan Matematis Ullidtz

Jenis Aspal	Temperatur Uji (°C)	<i>Sbit</i> DSR	<i>Sbit</i> Ullidtz
Pen 60/70	20	47,27	31,18
	25	35,83	14,99
	35	12,96	2,25
	40	1,52	0,61
	45	1,14	0,10
Bitumen B 50/30	20	58,50	68,73
	25	29,15	37,03
	35	5,64	8,03
	40	2,58	3,00
	45	0,95	0,88
Bitumen B 50/30 + BTK	20	47,75	33,90
	25	23,71	16,52
	35	2,44	2,60
	40	1,12	0,73
	45	0,80	0,13
Bitumen B 50/30 + BJe	20	60,63	32,72
	25	31,56	15,85
	35	7,21	2,45
	40	3,54	0,68
	45	1,51	0,12

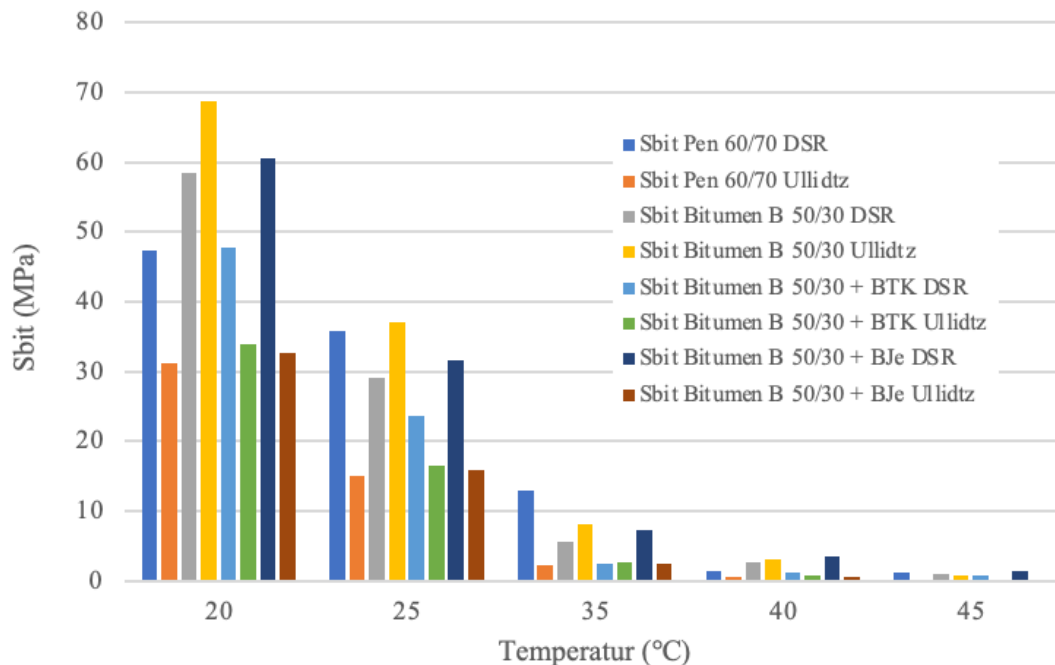
Pada aspal Pen 60/70, nilai *Sbit* hasil DSR cenderung lebih tinggi dibandingkan hasil pendekatan Ullidtz pada seluruh rentang temperatur. Perbedaan ini semakin signifikan pada temperatur menengah hingga tinggi, yang menunjukkan bahwa pendekatan matematis Ullidtz cenderung memberikan estimasi yang lebih rendah terhadap kekakuan aktual yang terukur di laboratorium.

Sebaliknya, pada Bitumen B 50/30, nilai *Sbit* hasil Ullidtz pada temperatur rendah (20 °C dan 25 °C) lebih tinggi dibandingkan hasil DSR. Namun, pada temperatur yang lebih tinggi, nilai kedua metode relatif mendekati, terutama pada 40 °C dan 45 °C. Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan Ullidtz memiliki sensitivitas yang cukup baik pada rentang temperatur tertentu, khususnya untuk bitumen dengan tingkat kekakuan awal yang tinggi.

Untuk bitumen modifikasi bioaspal (B 50/30 + BTK dan B 50/30 + BJe), perbedaan antara hasil DSR dan Ullidtz terlihat lebih bervariasi. Pada temperatur rendah, nilai *Sbit* hasil DSR umumnya lebih tinggi dibandingkan pendekatan Ullidtz. Namun, pada temperatur 35 °C, nilai kedua metode mulai menunjukkan kecenderungan yang lebih dekat, terutama pada campuran BTK. Pada temperatur tinggi (40–45 °C), pendekatan Ullidtz cenderung menghasilkan nilai yang lebih rendah secara signifikan dibandingkan DSR, khususnya pada campuran BJe.

Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan karakteristik pendekatan Ullidtz yang berbasis parameter penetrasi dan titik lembek, sehingga lebih bersifat empiris dan makroskopik. Sementara itu, pengujian DSR secara langsung mengukur respons viskoelastis material terhadap pembebanan geser dinamis, sehingga lebih sensitif terhadap perubahan struktur internal akibat modifikasi bioaspal.

Gambar 11 memperlihatkan perbandingan grafik *Sbit* DSR dan Ullidtz terhadap variasi temperatur. Terlihat bahwa meskipun kedua metode mengikuti pola penurunan yang serupa, terdapat deviasi nilai yang berbeda-beda tergantung jenis aspal dan temperatur. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan Ullidtz dapat digunakan sebagai estimasi awal modulus kekakuan, namun untuk analisis yang lebih akurat—terutama pada aspal termodifikasi pengujian DSR tetap memberikan representasi yang lebih komprehensif terhadap perilaku mekanistik material.

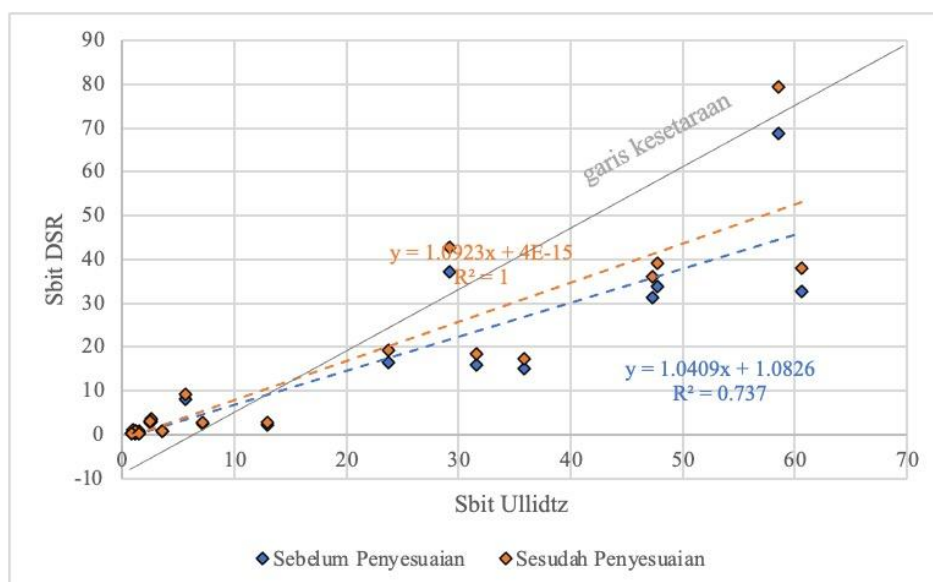


Gambar 11. Perbandingan Nilai *Sbit* DSR dan *Sbit* Ullidtz berdasarkan variasi suhu

Faktor Penyesuaian *Sbit*

Faktor penyesuaian (*adjustment factor*) merupakan koefisien koreksi yang digunakan untuk menyelaraskan perbedaan antara hasil perhitungan teoritis dan hasil pengujian laboratorium. Fungsi utamanya adalah untuk mengukur tingkat kesesuaian (*degree of agreement*) sekaligus meningkatkan akurasi perbandingan antara nilai yang diperoleh melalui pendekatan matematis dan nilai yang dihasilkan dari pengujian eksperimental. Dalam penelitian ini, faktor penyesuaian digunakan untuk mengevaluasi konsistensi antara nilai modulus kekakuan aspal (*Sbit*) yang dihitung menggunakan pendekatan matematis Ullidtz dan nilai *Sbit* yang diperoleh dari pengujian *Dynamic Shear Rheometer* (DSR).

Setelah diperoleh nilai *Sbit* untuk masing-masing jenis aspal, selanjutnya dihitung faktor penyesuaian (*af*) guna menilai tingkat akurasi hasil uji *DSR* terhadap prediksi teoritis metode Ullidtz. Faktor penyesuaian tersebut berperan sebagai parameter kalibrasi untuk meminimalkan deviasi sistematis antara kedua metode. Tabel 7 menyajikan hasil perhitungan faktor penyesuaian (*fp*) secara keseluruhan. Sementara itu, perbandingan nilai *Sbit* hasil uji DSR sebelum dan sesudah dikalikan dengan faktor penyesuaian ditampilkan pada Gambar 12, yang menunjukkan peningkatan tingkat kesesuaian antara hasil teoritis dan hasil laboratorium setelah dilakukan koreksi.



Gambar 12. Perbandingan Nilai *Sbit* DSR dan *Sbit* Ullidtz berdasarkan variasi suhu

Tabel 7. Faktor Penyesuaian dari *Sbit* DSR dan *Sbit* Ullidtz

Jenis Aspal	Suhu Uji (°C)	<i>Sbit</i> DSR (Mpa)	<i>Sbit</i> Ullidtz (Mpa)	Ratio Awal	$f(Xi) \times (MFVi)$	$f(Xi)^2$	<i>Sbit</i> Setelah Penyesuaian	Ratio Setelah Penyesuaian
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (4)/(3)	(6) = (3)*(4)	(7) = (4) ²	(8) = (4)*fp	(8) = (7)/(3)
Aspal Pen 60/70	20	47,27	31,18	0,66	1473,5410	971,90	36,06	1,31
	25	35,83	14,99	0,42	537,1289	224,74	17,34	2,07
	35	12,96	2,25	0,17	29,2086	5,08	2,61	4,97
	40	1,52	0,61	0,40	0,9248	0,37	0,70	2,16
	45	1,14	0,10	0,09	0,1174	0,01	0,12	9,60
Bitumen B50/30	20	58,50	68,73	1,17	4020,7627	4724,04	79,50	0,74
	25	29,15	37,03	1,27	1079,2752	1371,31	42,83	0,68
	35	5,64	8,03	1,43	45,2728	64,55	9,29	0,61
	40	2,58	3,00	1,16	7,7539	9,01	3,47	0,74
	45	0,95	0,88	0,93	0,8320	0,77	1,02	0,86
Bitumen B50/30 +BTK	20	47,75	33,90	0,71	1618,7532	1149,48	39,22	0,86
	25	23,71	16,52	0,70	391,6745	272,84	19,11	0,86
	35	2,44	2,60	1,07	6,3265	6,74	3,00	0,86
	40	1,12	0,73	0,65	0,8204	0,53	0,85	0,86
	45	0,80	0,13	0,17	0,1059	0,02	0,15	0,86
Bitumen B50/30 +Bje	20	60,63	32,72	0,54	1983,9016	1070,55	37,85	0,86
	25	31,56	15,85	0,50	500,3254	251,32	18,34	0,86
	35	7,21	2,45	0,34	17,6226	5,98	2,83	0,86
	40	3,54	0,68	0,19	2,3969	0,46	0,78	0,86
	45	1,51	0,12	0,08	0,1802	0,01	0,14	0,86
Rata-rata				0,63	11716,9247	10129,73	Rata-rata	1,62
					fp	1,16	Ratio	0,6 - 9,6

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh bioaspal terhadap modulus kekakuan bitumen Asbuton menggunakan pendekatan matematis Ullidtz dan pengujian *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Penambahan bioaspal dari pirolisis tempurung kelapa (BTK) sebesar 6,5% dan jerami (BJe) sebesar 8% efektif memodifikasi bitumen Asbuton B 50/30 hingga mendekati karakteristik aspal Pen 60/70. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan nilai penetrasi dan penurunan titik lembek pada kondisi RTFOT, yang mengindikasikan terjadinya proses pelunakan (softening effect).
2. Nilai modulus kekakuan aspal (*Sbit*) menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan peningkatan temperatur pada seluruh jenis aspal, baik hasil pendekatan Ullidtz maupun pengujian DSR. Tren ini konsisten dengan perilaku viskoelastik aspal yang semakin lunak pada temperatur tinggi.
3. Pendekatan matematis Ullidtz secara umum mampu menggambarkan tren perubahan modulus kekakuan yang sejalan dengan hasil DSR, terutama pada rentang temperatur menengah. Namun demikian, pada temperatur tinggi pendekatan Ullidtz cenderung memberikan estimasi yang lebih rendah dibandingkan hasil pengujian DSR,

terutama pada bitumen termodifikasi bioaspal.

4. Perbedaan antara kedua metode menunjukkan bahwa pendekatan berbasis penetrasi dan titik lembek bersifat lebih empiris dan makroskopik, sedangkan DSR lebih sensitif terhadap perubahan struktur internal dan respons viskoelastik akibat modifikasi bioaspal.
5. Faktor penyesuaian (adjustment factor) yang diperoleh sebesar 1,16 menunjukkan bahwa kalibrasi diperlukan untuk meningkatkan tingkat kesesuaian antara prediksi teoritis dan hasil eksperimental. Setelah dilakukan penyesuaian, tingkat konsistensi kedua metode menjadi lebih baik.

Secara keseluruhan, bioaspal terbukti berpotensi sebagai modifier ramah lingkungan untuk bitumen Asbuton dengan kemampuan mengontrol modulus kekakuan agar lebih sesuai dengan kebutuhan kinerja perkerasan jalan lentur. Pendekatan Ullidtz dapat digunakan sebagai estimasi awal dalam analisis mekanistik berbasis data terbatas, namun untuk evaluasi yang lebih akurat terhadap aspal termodifikasi, pengujian DSR tetap direkomendasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO T315-10. (2010). Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using Dynamic Shear Rheometer (DSR).

- Affandi, F. (2008). Karakteristik Bitumen Asbuton Butir untuk Campuran Beraspal Panas. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 25(3), 350–368.
<https://binamarga.pu.go.id/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/334>
- ASTM D7175-15 (2023). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*.
- Cavalli, M. C., Wu, W., & Poulikakos, L. (2024). Bio-based rejuvenators in asphalt pavements: A comprehensive review and analytical study. *Journal of Road Engineering*, 4(3), 282–291.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jren.2024.04.007>
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga. (2006). *Pemanfaatan Asbuton*. Buku 1. Umum.
- Fardyanti, D. S. (2020). *Bio-Oil Berbasis Biomassa*. Sleman: Deepublish.
- Fini, E. H., Kalberer, E. W., Shahbazi, A., Basti, M., You, Z., Ozer, H., & Aurangzeb, Q. (2011). Chemical characterization of biobinder from swine manure: Sustainable modifier for asphalt binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1506–1513.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000237](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000237)
- Hunter, R. N., Self, A., & Read, J. (2015). *The Shell bitumen handbook*. In R. Gerlis & R. Taylor (Eds.), Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook*. Thomas Telford. (Sixth). ICE Publishing.
<https://doi.org/10.1680/sbh.32200>
- KemenPUPR, & Bineka. (2020). *Development of Asbuton Technology for Road Pavement*.
<https://binamarga.pu.go.id/index.php/article/perkembangan-teknologi-asbuton-untuk-perkerasan-jalan>.
- Li, Y., Sun, H., Mu, T., & Garcia-Vaquero, M. (2025). Sustainable closed-loop biorefinery of γ -valerolactone from lignocellulosic biomass: Pretreatments of multiple biomass and synthesis of γ -valerolactone from multiple biomass-derived feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 193, 107594.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107594>
- Mills-Beale, J., You, Z., Fini, E., Zada, B., Lee, C. H., & Yap, Y. K. (2014). Aging influence on rheology properties of petroleum-based asphalt modified with biobinder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 358–366.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000712](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000712)
- Peralta, J., Raouf, M. A., Sheng Tang, & Williams, R. C. (2012). Bio-Renewable Asphalt Modifiers and Asphalt Substitutes. *Green Energy and Technology*, 62, 89–115.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2324-8>
- Radovskiy, B., & Teltayev, B. (2018). Determining of Asphalt Stiffness Modulus. *Viscoelastic Properties of Asphalts Based on Penetration and Softening Point* (pp. 23-39). Cham: Springer International Publishing..
https://doi.org/10.1007/978-3-319-67214-4_2
- Rahman, H. (2010). Evaluasi Model Modulus Bitumen Asbuton dan Model Modulus Campuran Yang Mengandung Bitumen Asbuton. *Doctoral Dissertation*. Institut Teknologi Bandung.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook*. In Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell bitumen handbook*. Thomas Telford. (Fifth). Thomas Telford.
<https://doi.org/10.1680/sbh.32200>
- Sihombing, A. V. R. (2020). Bioaspal Sebagai Rejuvenator RAP dan Modifier Asbuton Dalam Campuran Beraspal Panas. *Doctoral Dissertation*. Institut Teknologi Bandung.
- Sihombing, A. V. R., & Sihombing, R. P. (2022). Bioasbuton as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt. *Proceedings of the Conference on Broad Exposure to Science and Technology 2021 (BEST 2021)*, 210(Best 2021), 86–92.
<https://doi.org/10.2991/aer.k.220131.014>
- Sihombing, A. V. R., Subagio, B. S., & Hariyadi, E. S. (2018). Potensi bioaspal pada bahan daur ulang aspal dan campuran beraspal hangat. *Jurnal Transportasi*, 18(1), 59–66.
<https://journal.unpar.ac.id/index.php/jurnaltransportasi/article/view/2975>
- Sihombing, A. V. R., Subagio, B. S., Hariyadi, E. S., & Sihombing, R. P. (2023). Stiffness modulus of reclaimed asphalt binder modified with local bio-rejuvenator in Indonesia (dynamic shear rheometer to van der poel nomograph test result). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1195(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1195/1/012023>

- Sihombing, A. V. R., Subagio, B. S., Hariyadi, E. S., & Yamin, A. (2021). Chemical, morphological, and high temperature rheological behaviour of Bioasbuton® as an alternative binder for asphalt concrete in Indonesia. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(5), 308–317.
<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.006>
- Tayebali, A. A., Tsai, B.-W., & Monismith, C. L. (1994). *Stiffness of asphalt-aggregate mixes*. Report prepared for Strategic Highway Research Program: A-388.
<https://trid.trb.org/View/404914>
- Tayh, S. A., Muniandy, R., Hassim, S., & Jakarni, F. (2017). Aging and consistency characterization of bio-binders from domestic wastes. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(10), 2613–2622.
<https://www.ripublication.com/Volume/ijae rv12n10.htm>
- Ullidtz, P., & Larsen, B. K. (1983). Mathematical Model for Predicting Pavement Performance. *Transportation Research Record*, 1(2), 45–55.
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1983/949/949-006.pdf>
- Xue, Y., Wu, S., Cai, J., Zhou, M., & Zha, J. (2014). Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis. *Construction and Building Materials*, 56, 7–15.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.075>
- Yamin, A., Pravianto, W., & Dewita, H. (2014). Asbuton Pracampur Antara Harapan dan Kenyataan. *Jurnal Ilmiah Poli Rekayasa*, 10(1), 31.
<https://doi.org/10.30630/jipr.10.1.55>
- Zhang, Z., Fang, Y., Yang, J., & Li, X. (2022). A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: Their source, composition, preparation and performance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.01.003>