

Analisis Kesesuaian Model Modulus Aspal dan Campuran Laston Lapis Aus untuk Aspal Modifikasi Asbuton Murni

Harmein Rahman

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, 40132
E-mail: rahmanharmein@gmail.com

Rizak Taruna Zega

Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, 40132
E-mail: rizaktarunazega@gmail.com

Abstract

Pavement design with mechanistic approach has been rapidly developed since the last three decades. Since 1970's bituminous mixes characteristics has been understood better with the discovery of testing equipment(s), such as Direct Shear Rheometer (DSR) and Universal Material Testing Apparatus (UMATTA) that can directly determined the modulus of asphalt and mixes. Some models also parallelly developed for the same purposes which are determining asphalt stiffness modulus (S_{bit}), such as: Van der Poel Nomogram, and Ullidtz, formula and mix stiffness modulus (S_{mix}), such as: Bonnaure et.al (1977), Asphalt Institute (1982) and Nottingham (Brown, et. al. 1984). Within the frame of thinking of improving asphalt material performance with local modifier, the research aims to evaluate the suitability of the model to examine the result for mixes with pure (fully extracted) asbuton of asphalt binder. The modification that expectly could improve S_{bit} and S_{mix} was done with adding 8% by weight of pure asbuton to the Pen grade asphalt in wearing course mix. The research result is hopefully could give significant contribution to the asbuton research in term of model suitability indication, that originally used pen grade, to predict the value of S_{bit} and S_{mix} within the mix of wearing course that used the pure asbuton modified asphalt.

Keywords: asphalt stiffness modulus, mix stiffness modulus, pure (fully extracted) asbuton, asbuton modifycation, wearing course.

Abstrak

Pendekatan desain struktur perkerasan lentur secara mekanistik telah sangat berkembang dalam tiga dekade terakhir. Sejak 1970-an, karakteristik campuran beraspal sudah lebih dipahami dengan adanya alat-alat pengujian yang langsung menguji nilai modulus dari suatu bahan seperti alat uji Direct Shear Rheometer (DSR) dan alat uji Universal Material Testing Apparatus (UMATTA). Dari sisi yang lain, model-model telah diturunkan untuk menghitung modulus kekakuan aspal (S_{bit}), seperti: Nomogram Van der Poel maupun rumus Ullidtz dengan batasan-batasan tertentu. Disamping itu model matematis juga diturunkan untuk perhitungan modulus campuran beraspal (S_{mix}) seperti: Metode Bonnaure et.al (1977), Asphalt Institute (1982) dan Nottingham (Brown, et. al. 1984). Dalam kerangka pikir kebutuhan atas peningkatan kinerja bahan aspal yang menggunakan modifikasi bahan lokal, penelitian ini bertujuan untuk melakukan penelaahan dan evaluasi terhadap kesesuaian hasil pengujian dan model untuk objek bahan aspal yang dimodifikasi aditif berupa asbuton murni. Modifikasi yang diharapkan dapat memperbaiki nilai S_{bit} dan S_{mix} ini dilakukan dengan menambahkan asbuton murni 8% dari berat aspal, dalam campuran laston lapis aus. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada rangkaian penelitian asbuton berupa indikasi kesesuaian model yang sejatinya menggunakan aspal minyak standar, untuk mempredikasi nilai S_{bit} dan S_{mix} dalam campuran laston lapis aus yang menggunakan aspal minyak modifikasi asbuton murni.

Kata-kata Kunci: modulus kekakuan aspal, modulus kekakuan campuran beraspal, asbuton murni, modifikasi asbuton, laston lapis aus.

1. Pendahuluan

Metoda desain struktur perkerasan lentur saat ini mengenal dua jenis pendekatan yaitu metode empiris

dan metode mekanistik. Metode desain empiris dapat berbentuk sangat sederhana hingga yang lebih kompleks. Metode desain struktur perkerasan lentur secara mekanistik telah cukup berkembang selama tiga dekade

terakhir. Semenjak tahun 1970-an, karakteristik campuran beraspal sudah mulai dipahami dengan adanya alat-alat pengujian yang bisa langsung menguji nilai modulus dari suatu bahan seperti alat uji *Direct Shear Rheometer* (DSR) dan alat uji *Universal Material Testing Apparatus* (UMATTA). Modulus adalah respon bahan terhadap beban yang diberikan, yaitu rasio hubungan antara tegangan dengan regangan yang sangat dipengaruhi oleh perubahan temperatur dan waktu pembebanan dan dapat dijadikan acuan dalam melakukan desain perkerasan.

Metode desain struktur perkerasan secara mekanistik memperlakukan desain perkerasan sama dengan struktur bangunan lainnya yang mengacu kepada beban yang hendak diterapkan, proporsi material pembentuknya, melakukan analisis struktur berdasarkan prinsip-prinsip teoritis, membandingkan tekanan kritis, tarikan kritis atau lendutan dengan nilai maksimum yang diijinkan. Nilai modulus kekakuan aspal maupun campuran beraspal dapat diperoleh dari pengujian laboratorium menggunakan alat-alat yang bisa langsung menguji nilai modulus aspal atau campuran beraspal, dan dapat digunakan sebagai data dalam perhitungan proses desain menggunakan pendekatan mekanistik.

Model yang digunakan untuk menghitung modulus kekakuan aspal (S_{bit}) dapat menggunakan Nomogram Van der Poel maupun rumus Ullidtz dengan batasan-batasan tertentu. Sedangkan model matematis untuk memperkirakan modulus campuran beraspal (S_{mix}) pada awalnya adalah untuk campuran yang menggunakan aspal minyak. Seperti misalnya metode yang diperkenalkan oleh Bonnaure, dkk (1977), metode Asphalt Institute (1982) dan metode Nottingham (Brown, et. al. 1984).

Modulus kekakuan aspal (S_{bit}) selain dipengaruhi oleh perubahan temperatur dan waktu pembebanan yang diterima oleh aspal, juga bergantung kepada jenis aspal yang digunakan maupun jenis modifikasi yang dilakukan baik untuk perbaikan sifat reologi maupun sifat mekanistik aspal. Modifikasi tersebut tentu saja diharapkan dapat juga turut serta memperbaiki Nilai Modulus (S_{mix}) dari suatu campuran beraspal yang menggunakan aspal yang telah dimodifikasi baik dengan cara emulsifikasi, pembusaan, penambahan bahan kimia, penambahan serat, penambahan aspal alam, dan lainnya. Indonesia sebagai pemilik asbuton yang merupakan cadangan aspal alam terbesar di dunia sebesar 677 juta ton sudah seharusnya berusaha meningkatkan penggunaan asbuton dalam desain perkerasan, sehingga dapat mengurangi ketergantungan akan aspal minyak impor.

Penelitian mengenai asbuton di Indonesia telah banyak dilakukan sebelumnya, dimana penambahan asbuton murni diharapkan mampu memperbaiki sifat dari aspal dan dapat bersinergi dengan baik pada campuran aspal bergradasi kasar yaitu Lapis Aspal Beton (Laston) atau lebih dikenal dengan *Asphaltic Concrete* (AC) terutama pada Lapis Aus (*Wearing Course*) yang bersentuhan langsung dengan roda kendaraan.

Selanjutnya fenomena retak yang rentan terjadi pada campuran beraspal diharapkan mampu diatasi oleh campuran beton aspal yang dimodifikasi dengan menggunakan asbuton murni tersebut.

Namun demikian, terdapat kendala dalam melakukan analisis modulus aspal dan campuran terkait dengan ketersediaan alat-alat pengujian. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan model-model yang telah dikembangkan sebelumnya dengan terlebih dahulu melakukan analisis indikasi kesesuaian, hasil pengujian dan model. Hal ini mutlak dilakukan mengingat model-model yang telah dikembangkan, menggunakan aspal minyak tanpa modifikasi sebagai objek pengembangannya.

Penelitian ini mencoba untuk memberikan kontribusi yang baru pada rangkaian penelitian asbuton, dimana penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya untuk desain perkerasan campuran beraspal menggunakan tambahan asbuton ekstraksi murni, sehingga tujuan akhir nantinya diharapkan dapat menghemat/mengurangi biaya pada saat melakukan desain perhitungan secara lebih detail berdasarkan hasil pengujian modulus di laboratorium.

2. Metodologi

Pembandingan hasil pengujian dan hasil perhitungan model untuk modulus kekakuan aspal (S_{bit}) dan modulus kekakuan campuran (S_{mix}) merupakan pendekatan/metodologi yang dipilih untuk dilakukan dalam penelitian ini. Kesesuaian dalam kecenderungan (*trend*) hubungan maupun nilai (*value*) merupakan hal yang digunakan untuk menilai kesesuaian.

Secara urutan kegiatan yang dilakukan meliputi:

- a. Persiapan bahan aspal modifikasi, berupa campuran aspal minyak dengan asbuton 8% berat aspal. Nilai (8%) ini diperoleh dari nilai optimum penelitian sebelumnya.
- b. Persiapan campuran bergradasi laston lapis aus.
- c. Pembuatan benda uji dan pengujian untuk alat uji *Direct Shear Rheometer* (DSR) untuk nilai S_{bit} .
- d. Pembuatan benda uji dan pengujian untuk alat uji *Universal Material Testing Apparatus* (UMATTA) untuk nilai S_{mix} .
- e. Perhitungan menggunakan model-model Nomogram Van der Poel maupun rumus Ullidtz dengan batasan-batasan tertentu untuk S_{bit} .
- f. Perhitungan menggunakan model-model Bonnaure, dkk (1977), metode Asphalt Institute (1982) dan metode Nottingham (Brown, et. al. 1984) untuk S_{mix} .
- g. Analisis berupa pembandingan nilai-nilai hasil pengujian dan perhitungan model.
- h. Penarikan kesimpulan dan saran.

3. Modulus Kekakuan Aspal (S_{bit})

Aspal adalah material yang bersifat viskoelastis dimana sifat material ini akan berubah dari viskos ke elastis tergantung pada temperatur dan waktu pembebanan. Pada temperatur tinggi dan waktu pembebanan yang lama aspal akan berperilaku sebagai *viscous-liquid*, sedangkan bila pada temperatur yang rendah dan waktu pembebanannya singkat maka aspal akan bersifat elastis-padat.

Kondisi yang umum terjadi pada aspal merupakan peralihan dari kedua sifat tersebut, yaitu aspal akan bersifat *viscous-elastis*. Van der Poel mendefinisikan modulus kekakuan aspal sebagai perbandingan antara tegangan yang diberikan dengan regangan yang dihasilkan pada waktu pembebanan tertentu.

3.1 Kepekaan aspal terhadap temperatur

Karakteristik sifat aspal dapat dilihat dari nilai *penetration index*, PI (Indeks Penetrasi) yang dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang diturunkan oleh Pfeiffer dkk, yaitu:

$$PI = \frac{20 - 500 \times A}{1 + 50 \times A} \quad (1)$$

Dimana A adalah koefisien kerentanan bitumen terhadap perubahan temperatur, yang merupakan kemiringan grafik garis lurus perbandingan antara nilai penetrasi (logaritmis) dengan nilai perubahan temperatur. Yang bisa ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$A = \frac{\log(\text{pen at } T_{25}) - \log 800}{T_{25} - T_{pen800}} \quad (2)$$

Dimana:

Pen T_{25} = Nilai penetrasi aspal yang diuji pada temperatur 25°C

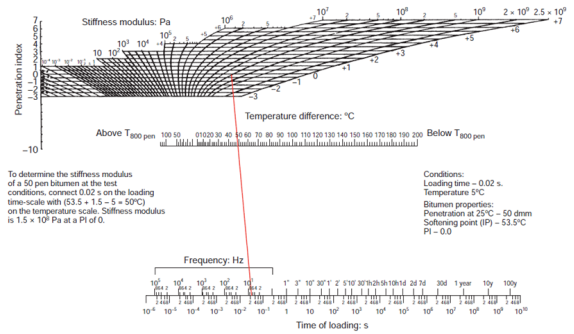
T_{25} = Temperatur pengujian, 25°C

T_{pen800} = Temperatur aspal pada saat nilai penetrasi sebesar 800

3.2 Nomogram van der poel

Modulus kekakuan aspal dapat diperkirakan dengan menggunakan nomogram yang dikembangkan oleh Van der Poel (1954), yang mendefinisikan modulus kekakuan aspal sebagai perbandingan antara tegangan yang diberikan dengan regangan yang dihasilkan pada waktu pembebanan tertentu. Input parameter yang digunakan untuk memperkirakan modulus kekakuan aspal dengan menggunakan nomogram ini adalah:

- Temperatur, (T), $^{\circ}\text{C}$.
- Titik lembek (SP_r) dari *ring and ball test*, $^{\circ}\text{C}$.
- Waktu pembebanan, (t), detik.
- Indeks penetrasi (PI_r), yang merupakan ukuran dari *temperature susceptibility*.



Gambar 1. Nomogram Van der Poel

3.3 Persamaan ullidtz

Selanjutnya, persamaan dari Ullidtz (Nottingham, 1978) berikut dapat digunakan untuk menghitung modulus kekakuan aspal yang diturunkan dari nomogram Van der Poel:

$$S_{bit} = 1,157 \cdot 10^{-7} \cdot t^{-0,368} \cdot 2,718^{-PI_r} \cdot (SP_r - T)^5 \quad (3)$$

Rumusan ini berlaku apabila:

$$SP_r - T = 20^{\circ}\text{C s/d } 60^{\circ}\text{C}$$

$$t = 0,01 \text{ detik s/d } 0,1 \text{ detik}$$

$$PI_r = -1 \text{ s/d } +1$$

dengan:

$$PI_r = \text{recovered petetration index dari aspal} \\ = \frac{1951,4 - 500 \times \log P_r - 20 \times SP_r}{50 \times \log P_r - SP_r - 120,4}$$

$$SP_r = \text{recovered softening point dari aspal} \\ = 98,4 - 26,35 \times \log P_r$$

$$T = \text{temperatur aspal, } ^{\circ}\text{C}$$

$$P_r = \text{recovered penetration pada suhu } 25^{\circ}\text{C} \\ = 0,65 \times P_i$$

$$P_i = \text{penetrasi awal aspal}$$

$$PI = \text{indeks penetrasi dari aspal}$$

$$t = \text{lama pembebanan, detik}$$

$$A = \text{kemiringan kurva log pen terhadap suhu}$$

Atau dapat juga menggunakan persamaan (Brown, S. F et al, 1982) di bawah ini:

$$PI_r = \frac{27 \times \log PI - 21,65}{76,35 \times \log PI - 232,82} \quad (4)$$

Waktu pembebanan dapat ditentukan dengan pendekatan hubungan antara tebal lapis perkerasan dan kecepatan kendaraan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\log t = 5 \times 10^{-4} \times h - 0,94 \log V \quad (5)$$

Dengan,

t = waktu pembebanan (detik)

h = tebal lapis perkerasan (mm)

V = kecepatan kendaraan (km/jam)

Dengan anggapan tebal lapisan perkerasan 100 hingga 300 mm, maka hubungan empiris yang sederhana, waktu pembebanan dapat diperkirakan sebagai:

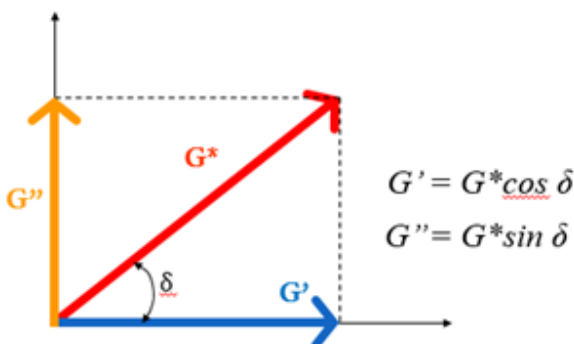
$$t = \frac{1}{V} \quad (6)$$

3.4 Modulus geser kompleks aspal (G^*)

Modulus geser kompleks (*Complex Shear Modulus*, G^*) aspal merupakan parameter mekanistik aspal yang dianggap lebih menggambarkan karakteristik aspal sebagai material yang viskoelastik. Alat uji yang digunakan untuk menentukan parameter ini adalah *Dynamic Shear Rheometer* (DSR).

Pengujian DSR pada binder aspal dilakukan pada tiga kondisi yaitu original, RTFOT, dan PAV. Ketiga kondisi ini mensimulasikan kondisi yang berbeda. Pada kondisi original binder aspal tidak mengalami penuaan dimana kriteria *rutting* adalah yang perlu diperhatikan. Kondisi RTFOT mensimulasikan kondisi penuaan yang terjadi selama proses pencampuran di *Asphalt Mixing Plant* sampai kepada proses penghamparan dan pemadatan di lapangan. Kondisi PAV menunjukkan kondisi penuaan jangka panjang.

Pengujian *Dynamic Shear Rheometer* (DSR) ini 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 resultante (penjumlahan vektor) dari sifat elastis dengan notasi G' (*storage modulus*) dan sifat viskos dengan notasi G'' (*loss modulus*) seperti pada **Gambar 2** dibawah ini.



Gambar 2. Hubungan antara G^* dan δ dengan komponen G' (*storage modulus*) dan G'' (*loss modulus*)

Nilai G' dan G'' ini ditentukan oleh besarnya nilai δ , dimana semakin besar nilai δ , maka semakin non-elastis sifat bahan bitumen yang diuji. Perubahan nilai G' dan G'' terjadi seiring dengan perubahan suhu dan waktu pembebanan sewaktu dilakukan pengujian menggunakan alat DSR. Parameter G^* merupakan resultante (penjumlahan vektor) dari perilaku elastis (*elastic behaviour*) dengan nilai notasi G' (*storage modulus*) dan perilaku viskous (*viscous behaviour*) dengan notasi G'' (*loss modulus*), dengan persamaan sebagai berikut (Shell, 2003):

$$G^* = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (7)$$

Dengan,

G^* = complex shear modulus

G' = storage modulus = $G^* \times \cos \delta$

G'' = loss modulus = $G^* \times \sin \delta$

δ = phase angle

Nilai Modulus Kekakuan Aspal (S_{bit}) berdasarkan data *Complex Shear Modulus* (G^*) dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

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

Dengan,

S_{bit} = Modulus Kekakuan Aspal

G^* = Complex Shear Modulus

μ = Poisson Ratio ($-\mu = \pm 0,5$ untuk hampir semua jenis aspal murni)

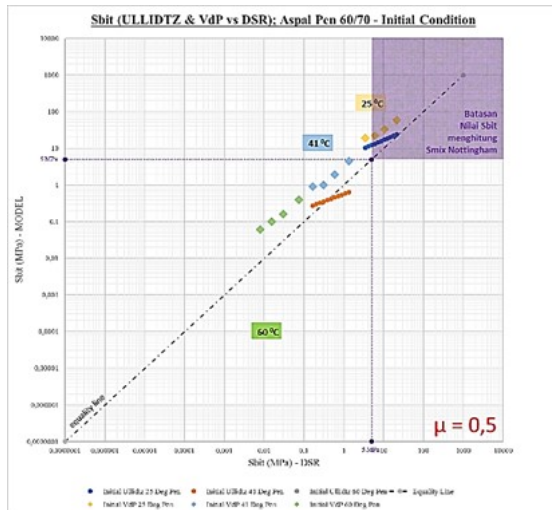
3.5 Pengujian modulus geser kompleks aspal (G^*)

Pengujian DSR dilakukan dengan cara *frequency sweep* (sapuan frekuensi pembebanan) mulai dari 0,2 Hz sampai dengan 100 Hz, yang dilakukan pada 3 (tiga) tingkat suhu yaitu 25 °C, 41 °C, dan 60 °C. Pengujian DSR dilakukan terhadap tiga kondisi aspal, yaitu kondisi awal (*original binder*), setelah mengalami pengkondisian RTFOT (*rolling thin over film test*) dan setelah mengalami pengkondisian PAV (*pressure aging vessel*), terhadap aspal pen 60/70 murni dan aspal pen 60/70 yang sudah dimodifikasi dengan menambahkan asbuton sebesar 8% dari berat aspal.

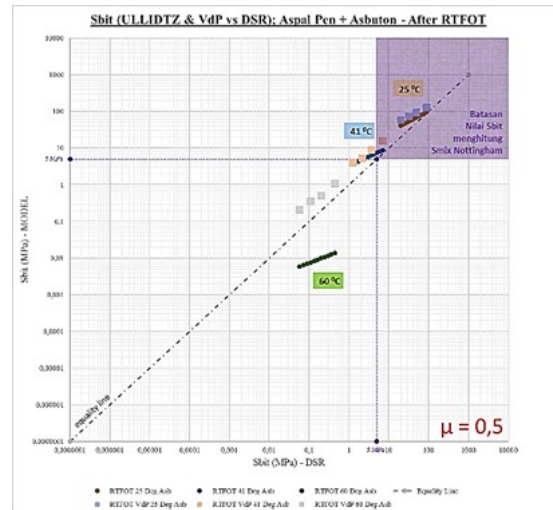
3.5.1 S_{bit} (Van der Poel) dan S_{bit} (Ullidtz) vs S_{bit} hasil DSR

Perbandingan nilai S_{bit} dari hasil pengujian alat DSR dengan perhitungan menggunakan Nomogram Van der Poel dan rumus Ullidtz diperlihatkan pada **Gambar 3** hingga 8.

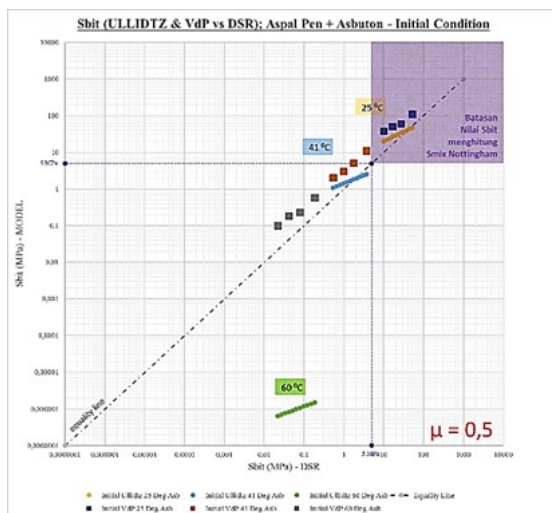
Perbandingan nilai S_{bit} dari hasil pengujian alat DSR dengan perhitungan menggunakan rumus Ullidtz diperlihatkan pada **Gambar 3** hingga 8 memperlihatkan



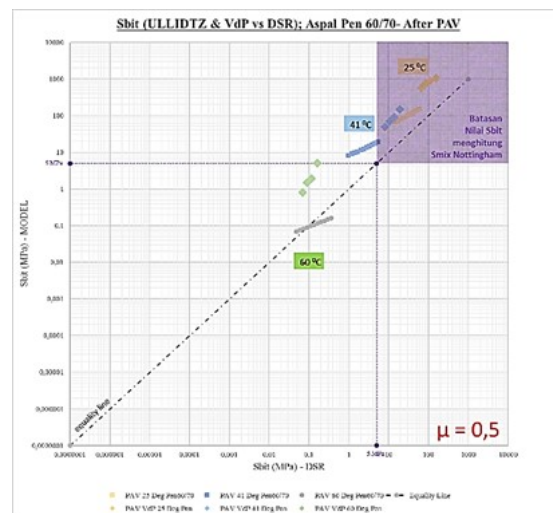
Gambar 3. Nilai Sbit Van der Poel & Ullidtz vs DSR aspal (Pen 60/70) - initial condition



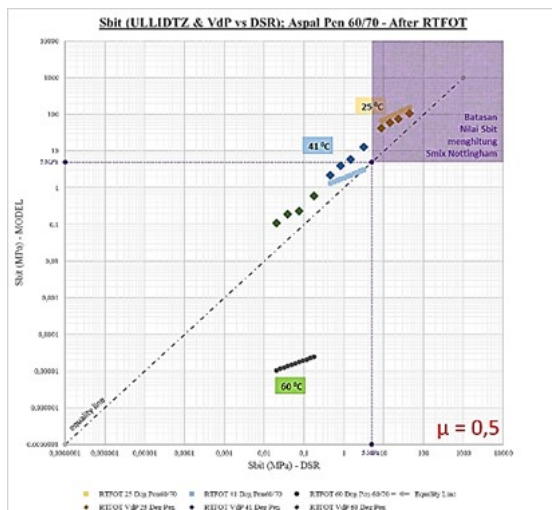
Gambar 6. Nilai Sbit Van der Poel & Ullidtz vs DSR aspal (Pen 60/70 + Asbuton 8%) - after RTFOT



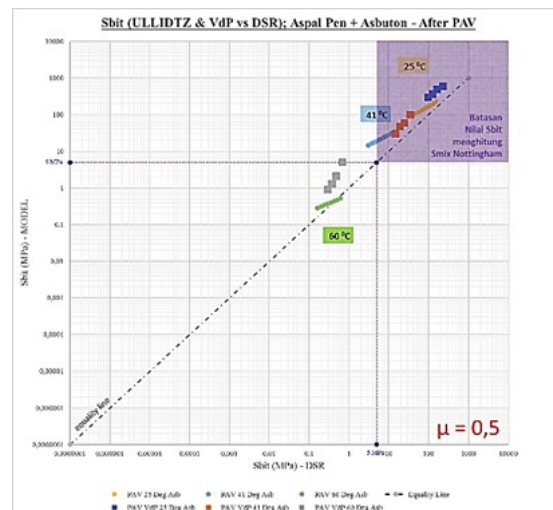
Gambar 4. Nilai Sbit Van der Poel & Ullidtz vs DSR aspal (Pen 60/70 + Asbuton 8%) - initial condition



Gambar 7. Nilai Sbit Van der Poel & Ullidtz vs DSR aspal (Pen 60/70) - after PAV



Gambar 5. Nilai Sbit Van der Poel & Ullidtz vs DSR aspal (Pen 60/70) - after RTFOT



Gambar 8. Nilai Sbit Van der Poel & Ullidtz vs DSR aspal (Pen 60/70 + Asbuton 8%) - after RTFOT

bahwa pengujian DSR lebih sensitif terhadap perubahan waktu pembebanan (t), terlihat dari garis yang menunjukkan hasil pengujian DSR lebih tajam dibandingkan dengan hasil penghitungan menggunakan rumus Ullidtz yang cenderung landai.

Hal yang sama juga berlaku pada aspal dengan kondisi *after* RTFOT dan aspal dengan kondisi *after* PAV, dimana kemiringan garis dari nilai hasil pengujian DSR lebih curam daripada garis yang dibentuk dari data perhitungan menggunakan rumus Ullidtz. Perubahan nilai S_{bit} yang tidak konsisten antara hasil DSR dengan hasil perhitungan rumus Ullidtz menunjukkan bahwa model Ullidtz yang diciptakan di negara beriklim dingin cenderung tidak bisa digunakan dalam menghitung nilai modulus kekakuan aspal (S_{bit}) di negara Indonesia yang beriklim tropis.

4. Modulus Kekakuan Campuran Beraspal (S_{mix})

Seperti halnya aspal, modulus kekakuan campuran beraspal juga tergantung kepada temperatur dan waktu pembebanan. Model matematis untuk memperkirakan modulus campuran beraspal (S_{mix}) pada awalnya adalah untuk campuran yang menggunakan aspal minyak.

Diantaranya adalah metode yang diperkenalkan oleh Bonnaure, dkk (1977), metode Asphalt Institute (1982) dan metode Nottingham (Brown, et. al. 1984).

4.1 Metode bonnaure et. (1977)

Shell memperkenalkan nomogram untuk memprediksi modulus kekakuan campuran beraspal yang bergantung pada modulus kekakuan aspal dan konsentrasi volume agregat dalam campuran tersebut. Penelitian ini kemudian dilanjutkan oleh Bonnaure et.al (1977) dan mendapatkan persamaan modulus kekakuan campuran beraspal yang berlaku untuk modulus kekakuan bitumen (S_{bit}) tertentu, yaitu:

a. Untuk: $5 \times 10^6 \text{ Pa} < S_{bit} < 10^9 \text{ Pa}$;

$$\log S_{mix} = \left(\frac{S_w + S_x}{2} \right) (\log S_{bit} - 8) + \left(\frac{S_w - S_x}{2} \right) |\log S_{bit} - 8| + S_y \quad (9)$$

b. Untuk: $10^9 \text{ Pa} < S_{bit} < 3 \times 10^9 \text{ Pa}$;

$$\log S_{mix} = S_y + S_w + (S_z - S_y - S_w) \times (2,096 \times (\log S_{bit} - 9)) \quad (10)$$

Dengan,

$$S_w = 0,76 \times (S_z - S_y)$$

$$S_x = 0,6 \times \log \left(\frac{1,37 \times V_b^2 - 1}{1,33 \times V_b - 1} \right)$$

$$S_y = 8 + (5,68 \times 10^{-3} \times V_a) + (2,135 \times 10^{-4} \times V_a^2)$$

$$S_z = 10,82 - 1,342 \times \left(\frac{100 - V_a}{V_a + V_b} \right)$$

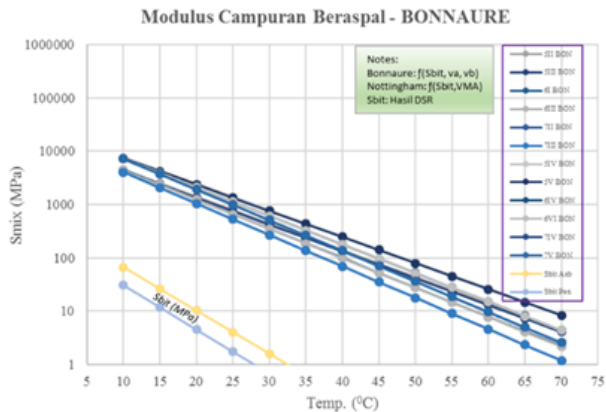
Dimana,

$$V_a = \text{volume agregat, \%}$$

$$V_b = \text{volume bitumen, \%}$$

$$S_{bit} = \text{modulus kekakuan bitumen, Pa}$$

Dari model tersebut didapatkan bahwa, seiring dengan meningkatnya suhu yang dialami oleh campuran beraspal, maka nilai modulus kekakuan campuran menjadi semakin menurun diakibatkan oleh sifat aspal yang berubah menjadi semakin viscous (cair) dan nilai S_{mix} dapat menjadi negatif yang pada kenyataannya tidak mungkin terjadi diakibatkan oleh adanya agregat di dalam campuran beraspal tersebut. Seperti terlihat pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Pengaruh perubahan temperatur (T) terhadap modulus kekakuan campuran beraspal (S_{mix}) - model bonnaure, et all.

4.2 Metode asphalt institute (1982)

Dalam program DAMA yang dikembangkan oleh The Asphalt Institute (1982) dinyatakan bahwa modulus kekakuan campuran beraspal merupakan fungsi dari persentase agregat yang lolos saringan no. 200, frekuensi pembebanan, rongga udara, viskositas aspal, temperatur dan persentase volume aspal dengan persamaan sebagai berikut:

$$|E^*| = 100.000 \times 10^{\beta_1} \quad (11)$$

Dengan:

$$\beta_1 = \beta_3 + 0,000005 \times \beta_2 - 0,00189 \times \beta_2 \times f^{-1,1}$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0,5} \times T^{\beta_5}$$

$$\beta_3 = 0,553833 + 0,028829 \times (P_{200} \times f^{-0,1703}) - 0,003476 \times V_a + 0,070377 \times \lambda + 0,931757 \times f^{-0,002774}$$

$$\beta_4 = 0,483 \times V_b$$

$$\beta_5 = 1,3 + 0,49825 \times \log f$$

$$\lambda = 2,508,2 \times (P_{77^0 F})^{-2,1939}$$

Dimana,

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ = konstanta sementara

f = frekuensi pembebanan, (Hz)

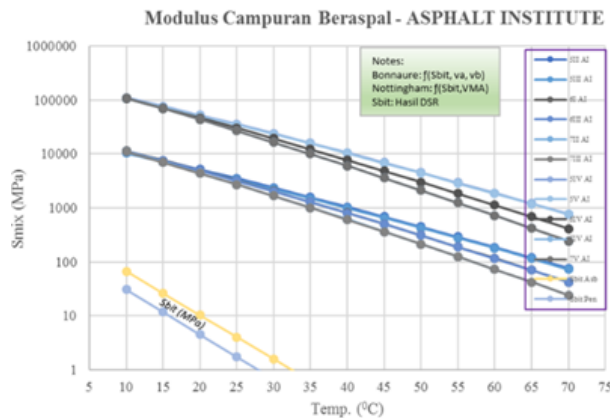
P_{200} = persen agregat lolos saringan no. 200, (%)

V_b = volume Aspal, (%)

λ = viskositas aspal pada $70^0 F$, (10^6 poises)

T = temperatur campuran beraspal, ($^{\circ}\text{F}$)

Grafik yang dihasilkan oleh model ini menunjukkan bahwa nilai modulus campuran beraspal menjadi semakin mengecil seiring dengan kenaikan suhu yang dialami oleh campuran beraspal, namun tidak sampai menjadi bernilai negatif. Seperti terlihat pada **Gambar 10** berikut.



Gambar 10. Pengaruh perubahan temperatur (T) terhadap modulus kekakuan campuran beraspal (S_{mix}) - model asphalt institute

4.3 Metode nottingham (1984)

Professor Brown dari Nottingham University telah mengembangkan suatu metoda untuk memperkirakan nilai modulus kekakuan campuran beraspal, yang merupakan fungsi dari rongga udara dalam mineral agregat (VMA) dan modulus kekakuan aspal (S_{bit}), dengan persamaan sebagai berikut:

$$S_{mix} = S_{bit} \times \left(1 + \frac{257,5 - 2,5 \times VMA}{n \times (VMA - 3)} \right)^n \quad (12)$$

Dengan,

$$n = 0,83 \times \log \left(\frac{4 \times 10^4}{S_{bit}} \right)$$

Persamaan tersebut hanya berlaku bila nilai modulus kekakuan aspal tidak kurang dari 5 Mpa, nilai VMA campuran beraspal antara 12% - 30% dan nilai VIM minimum sebesar 3%.

Perubahan nilai modulus campuran yang diakibatkan oleh perubahan suhu dapat dilihat dari **Gambar 11** berikut ini.

Ketiga model persamaan diatas digunakan untuk menentukan nilai modulus kekakuan campuran beraspal (S_{mix}), dan akan divalidasi menggunakan data-data hasil pengujian modulus kekakuan campuran beraspal (S_{mix}) di laboratorium untuk kondisi waktu pembebanan dan Temperatur pembebanan yang sama.

5. Pengujian Modulus Campuran Beraspal

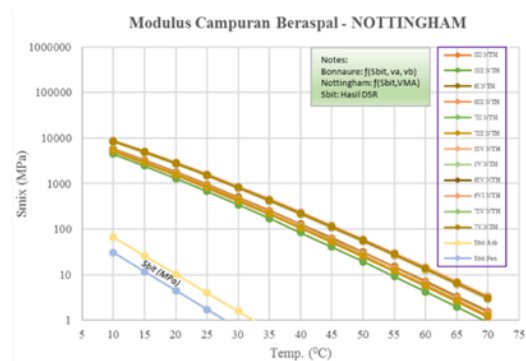
Pengujian *Indirect Tensile Modulus* menggunakan alat uji UMATTA menghasilkan nilai modulus resilien,

yang dilakukan pada waktu pembebanan sebesar 0,25 ms dan temperatur 25°C , 35°C dan 45°C . Data hasil pengujian UMATTA yang dilakukan pada kondisi waktu dan temperatur pembebanan yang sama digunakan untuk memvalidasi model yang digunakan untuk menghitung nilai modulus kekakuan campuran (S_{mix}) menggunakan model yang ada.

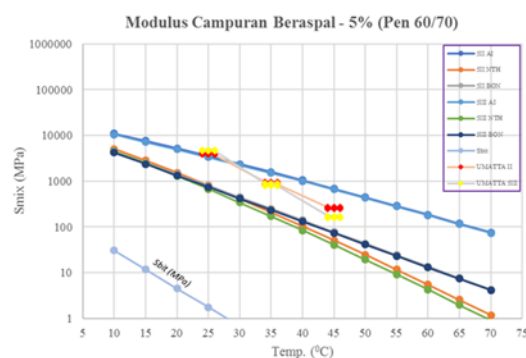
Gambar 12 hingga **17** berikut memperlihatkan bahwa model *Asphalt Insitute* (AI) memiliki kemiringan kurva yang berbeda berbeda dengan model Nottingham dan model Bonnaure, dimana model AI lebih curam yang mengindikasikan bahwa model AI lebih sensitif terhadap perubahan temperatur. Serta nilai modulus kekakuan aspal (S_{mix}) yang dihasilkan model AI lebih tinggi daripada kedua model yang lain.

Terlihat bahwa kurva yang terbentuk menunjukkan bahwa nilai S_{mix} pada model Bonnaure dan model Nottingham akan turun mendekati nol ataupun bernilai negatif seiring dengan peningkatan temperatur, dimana pada kenyataannya hal tersebut tidak mungkin terjadi dikarenakan adanya komposisi agregat pada campuran beraspal.

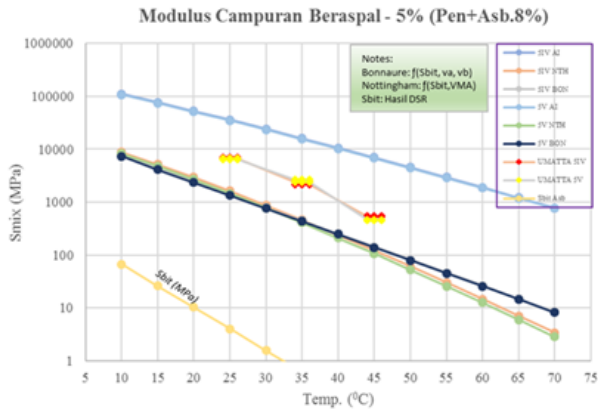
Nilai S_{mix} dari hasil pengujian UMATTA, cenderung mengikuti sifat dari ketiga model yang ingin divalidasi, sehingga model dapat dianggap sesuai dengan hasil pengujian di laboraotorium dengan menggunakan alat uji UMATTA.



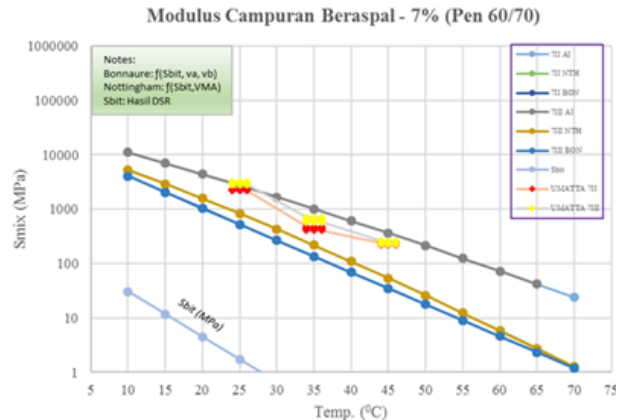
Gambar 11. Pengaruh perubahan temperatur (T) terhadap modulus kekakuan campuran beraspal (S_{mix}) - model nottingham



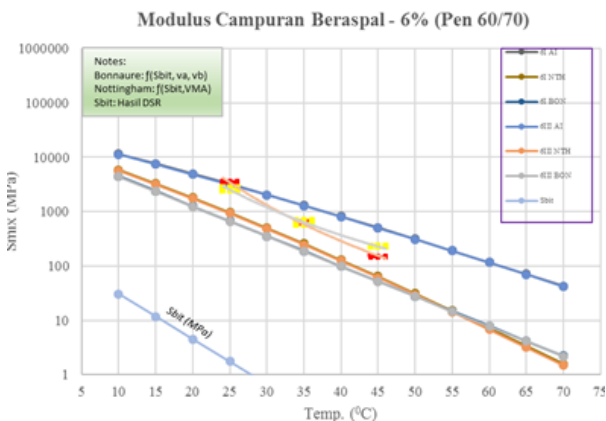
Gambar 12 Hubungan antara nilai S_{mix} dengan perubahan temperatur, pada campuran dengan kadar aspal 5% (Pen 60/70)



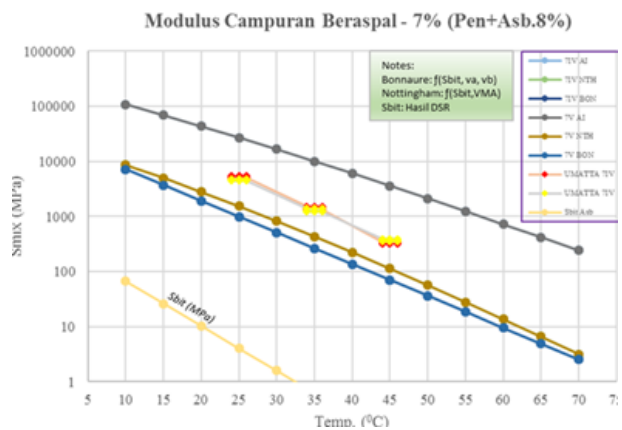
Gambar 13. Hubungan antara nilai Smix dengan perubahan temperatur, pada campuran dengan kadar aspal 5% (Pen 60/70 + Asbuton 8%)



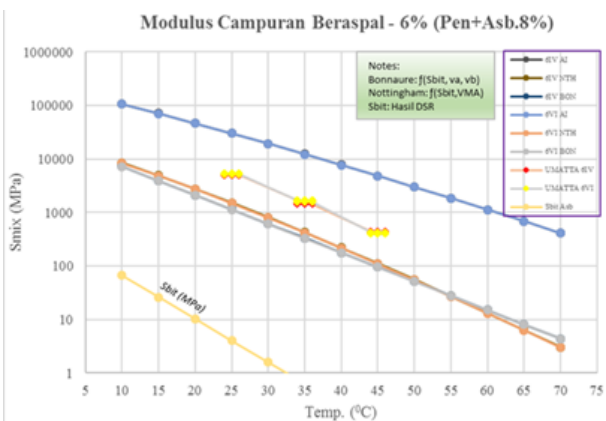
Gambar 16. Hubungan antara nilai Smix dengan perubahan temperatur, pada campuran dengan kadar aspal 7% (Pen 60/70)



Gambar 14. Hubungan antara nilai Smix dengan perubahan temperatur, pada campuran dengan kadar aspal 6% (Pen 60/70)



Gambar 17. Hubungan antara nilai Smix dengan perubahan temperatur, pada campuran dengan kadar aspal 7% (Pen 60/70 + Asbuton 8%)



Gambar 15. Hubungan antara nilai Smix dengan perubahan temperatur, pada campuran dengan kadar aspal 6% (Pen 60/70 + Asbuton 8%)

1. Model Ullidtz yang dikembangkan dengan aspal minyak, cenderung tidak dapat dipergunakan untuk aspal minyak dengan aditif asbuton murni.
2. Model Nomogram Van der Poel masih dapat dipergunakan untuk aspal minyak dengan aditif asbuton murni, dengan terlebih dahulu melakukan penyesuaian terhadap nilai yang dihasilkan oleh Nomogram dengan nilai Sbit yang dihasilkan oleh alat uji *Direct Shear Rheometer* (DSR).
3. Ketiga model untuk menghitung modulus kekakuan campuran (Smix), masih dapat dipergunakan untuk aspal minyak dengan aditif asbuton murni.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, diusulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perlu adanya kriteria ketelitian (presisi dan bias) untuk spesifikasi yang digunakan di Indonesia, sehingga hasil pengujian yang dilakukan oleh teknisi maupun laboratorium yang berbeda dapat dipastikan akurasi hasilnya.

6. Kesimpulan dan Saran

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

2. Perlu dilakukan penelitian sejenis menggunakan asbuton seperti penelitian ini, dan agar nantinya dilakukan penambahan jumlah sampel RTFOT untuk pengujian penetrasi. Dikarenakan terdapat keraguan pada hasil pengujian RTFOT tersebut (kecenderungan inkonsistensi data hasil pengujian).
3. Perlu dilakukan penelitian sejenis dengan menggunakan aspal minyak dengan jenis yang berbeda sehingga dapat menunjukkan efek dari perbedaan nilai *Penetration Index* (PI) dan *Softening Point* (SP) berdasarkan jenis aspal yang berbeda.

Daftar pustaka

- Asphalt Institute. (1982): *Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual. (MS-1)*. RR-82-2. Maryland. USA
- Brown S. F., Brunton J. M. (1984): *An Introduction to The Analytical Design of Bituminous Pavements*. University of Nottingham. UK.
- Bonnaure F, Gest G, Gervois A, Uge P (1977): *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*.
- Shell Bitumen. (2003): *The Shell Bitumen Handbook*, london. UK.
- Ullidtz P, Larsen BK (1984): Mathematical model for predicting pavement performance. *Transportation Research Record*.
- Van der Poel C (1954): *Proceedings of 1st international congress of rheology*, vol 2. Butterworth's Scientific Publications, London.

