

Perbaikan Sifat Reologi Aspal Dengan Penambahan Asbuton Murni Dalam Tinjauan Modulus Kekakuan dan Kriteria Kerusakan Perkerasan

Improved on Bitumen's Rheology Characteristic With Pure Asbuton Addition In Stiffness Modulus and Failure Criteria Review

Eva Wahyu Indriyati¹, Bambang Sugeng Subagio², Harmein Rahman³

¹e_wahyuindriyati@yahoo.co.id

²bsugengs@si.itb.ac.id

³rahmanharmein@gmail.com

¹Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Mayjend. Sungkono Km. 5 Blater Purbalingga

^{2,3}Program Studi Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung

Abstrak—Indonesia saat ini masih sangat tergantung pada aspal minyak untuk memenuhi kebutuhan aspal untuk pembangunan dan pemeliharaan jalan. Meningkatnya harga minyak mentah secara langsung akan meningkatkan harga aspal minyak. Salah satu cara untuk mengurangi ketergantungan terhadap aspal minyak adalah dengan memanfaatkan sumber aspal alam yang dimiliki oleh Indonesia di Pulau Buton, Sulawesi. Untuk dapat memperoleh gambaran dari perbaikan sifat reologi akibat penambahan Asbuton dilakukan pengujian sifat reologi mekanistik dengan alat *Dynamic Shear Rheometer* pada campuran bitumen Asbuton dan aspal Pen 60/70 dengan 19 variasi Asbuton. Dari artikel ini, kesimpulan dari sisi sifat reologi mekanistik adalah bahwa campuran bitumen Asbuton dan aspal pen 60/70 mengalami perbaikan sifat reologi mekanistik, seperti peningkatan Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit}) seiring dengan penambahan kadar Asbuton. Selanjutnya dari analisis terhadap kriteria kerusakan perkerasan, disimpulkan bahwa penambahan Asbuton akan meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen, tetapi mengurangi ketahanan terhadap retak lelah. Kadar Asbuton Optimum yang direkomendasikan adalah sebesar 10%.

Kata kunci— Asbuton, Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit}), Deformasi Permanen, Retak Lelah

Abstract— Indonesia is still very dependent on petroleum asphalt to meet the need for the annually road construction and maintenance. The increasing demand of crude oil will directly increase the price of petroleum asphalt. One solution to reduce the dependence to petroleum asphalt is by using Indonesia's natural asphalt in Buton Island, Sulawesi. In order to obtain a better understanding on the contribution of Asbuton to the improvement of performance on rheological properties, this research used 19 variations of Asbuton and pen 60/70 petroleum bitumen. This variation is then subjected to the basic rheology test and the mechanistic test using *Dynamic Shear Rheometer*. Conclusion on mechanistic rheological performance is that mixture (Asbuton and 60/70 petrol bitumen) will increase Bitumen Stiffness Modulus (S_{bit}). The results from the analysis of failure criteria, the increasing proportion of Asbuton will increase its performance on permanent deformation but it will decrease its resistance of fatigue cracking. The optimum proportion of Asbuton, obtained in this research is 10%.

Keyword— Asbuton, Bitumen Stiffness Modulus (S_{bit}), Permanent Deformation, Fatigue Cracking.

PENDAHULUAN

Panjang jalan di Indonesia semakin tahun semakin bertambah. Penambahan panjang jalan ini berbanding lurus dengan penggunaan aspal. Aspal yang banyak digunakan di Indonesia adalah aspal minyak, yang merupakan hasil penyulingan minyak bumi. Oleh karena itu harga aspal minyak sangat tergantung dari harga minyak bumi itu sendiri.

Ketergantungan terhadap aspal minyak dapat dikurangi dengan penggunaan aspal alam. Aspal alam yang dimiliki oleh Indonesia adalah Asbuton yang depositnya tersebar di beberapa daerah kecamatan di Pulau Buton, Sulawesi Tenggara. Dinas Pertambangan Propinsi Sulawesi Tenggara (2007) menyatakan cadangan Asbuton diperkirakan sekitar 670 juta ton dalam bentuk asal (*native*) atau dalam bentuk bitumen sebesar 163.900.000 ton dengan perkiraan kandungan bitumen berkisar antara 15% - 35% dan tersebar di 5

daerah yaitu Waesiu, Kabungka, Winto, Waniti dan Lawele (Pusjatan dalam Rahman, 2010). Jumlah ini masih belum mempertimbangkan potensi cadangan Asbuton yang belum tergalang sampai saat ini, yang jumlahnya diperkirakan masih sangat banyak cadangannya.

Pada prinsipnya, para peneliti telah menunjukkan bahwa Asbuton dapat digunakan pada perkerasan jalan. Tetapi kenyataannya penggunaan Asbuton sebagai material perkerasan jalan masih belum maksimal. Hal ini karena penggunaan Asbuton sebagai penyusun perkerasan jalan tidak sesederhana atau semudah penggunaan aspal minyak. Hal ini menjadi tantangan tersendiri bagi para peneliti bagaimana memanfaatkan Asbuton lebih maksimal lagi.

Pada penggunaannya dalam campuran beraspal, aspal berfungsi sebagai bahan pengikat yang memberikan ikatan antara aspal dan agregat, dan antara aspal itu sendiri. Selain itu aspal juga berfungsi sebagai bahan pengisi yang mengisi rongga antara butir-butir agregat dan pori-pori yang ada dari agregat itu sendiri. Oleh sebab itu sebelum pembuatan campuran beraspal dilakukan sifat reologi aspal perlu diketahui, karena perubahan dari salah satu faktor akan merubah sifat lainnya.

Dengan mengetahui sifat reologi Asbuton murni, diharapkan dapat memperbaiki sifat reologi aspal minyak yang masih banyak digunakan sebagai material perkerasan jalan. Dan selanjutnya dapat meningkatkan pemanfaatan Asbuton di Indonesia.

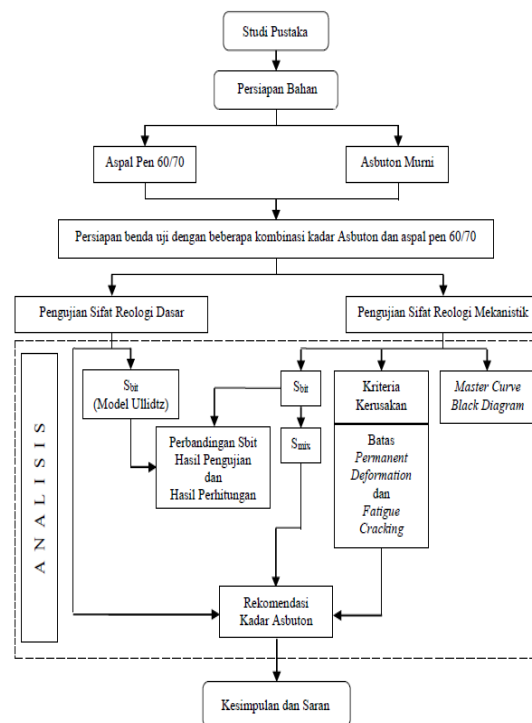
Menurut Indriyati (2014), secara garis besar penambahan Asbuton murni pada aspal pen 60/70 akan memberikan pengaruh, baik positif maupun negatif, terhadap kinerja aspal. Pengaruh positif penambahan Asbuton murni pada aspal pen 60/70 diantaranya adalah bertambahnya tingkat kekerasan aspal. Bertambahnya tingkat kekerasan aspal ini akan berakibat pada peningkatan ketahanan terhadap kriteria kerusakan, yaitu *rutting*. Sedangkan pengaruh negatif penambahan Asbuton murni pada aspal pen 60/70 adalah menjadikan aspal lebih peka terhadap perubahan temperatur dan frekuensi pembebanan. Kondisi ini berlawanan dengan kondisi yang diinginkan di lapangan, yaitu campuran yang tidak peka terhadap perubahan temperatur dan frekuensi pembebanan, untuk aplikasi pada rentang temperatur dan frekuensi pembebanan yang lebar.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi perbaikan sifat reologi *visco-elastic* dari penambahan Asbuton murni ke dalam aspal pen 60/70. Parameter yang dilihat pada perbaikan sifat reologi *visco-elastic* ini adalah nilai modulus kekakuan aspal dan kemampuan dalam menahan kerusakan dalam bentuk *Permanent Deformation* dan *Fatigue Cracking*, serta rekomendasi besarnya kadar Asbuton murni optimal yang memenuhi syarat-syarat untuk digunakan di Indonesia dilihat dari hasil pengujian dan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya.

METODE PENELITIAN

Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Ada dua komponen utama yang dititik beratkan pada penelitian ini yaitu pengujian sifat reologi dasar dan pengujian sifat reologi mekanistik dari campuran aspal pen 60/70 dan Asbuton murni.

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal minyak pen 60/70 dan Asbuton murni yang diperoleh dari hasil ekstraksi Asbuton Lawele. Kombinasi prosentase campuran Asbuton murni dan aspal pen 60/70 yang digunakan untuk pengujian *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), penetrasi dan titik lembek adalah 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 92%, 94%, 96%, 98%, 100%.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Parameter yang dikaji pada artikel ini adalah sebagai berikut:

1. Modulus Kekakuan Bitumen (E^*)

Modulus Kekakuan Bitumen (E^*) berdasarkan data *Complex Shear Modulus* (G^*) dihitung menggunakan rumus:

$$E^* = 2 G^* (1 + \nu) \quad (1)$$

dimana:

E^* : Modulus Kekakuan Bitumen (Pa)

G^* : *Complex Shear Modulus* (Pa)

ν : *Poisson Ratio* (asumsi $\nu = 0,5$)

2. Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit})

Analisis terhadap model estimasi S_{bit} dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan dari

Persamaan Ullidtz (Shell, 2003) yang diturunkan dari nomogram Van Der Poel.

Perhitungan nilai Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit}) dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} t^{+0,368} 2,718^{-P_i} (SP_r - T)^5 \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian

Hasil pengujian Penetrasi dan nilai *Performance Grade* (PG) untuk 19 variasi kadar Asbuton murni disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Penetrasi dan PG

Kadar Asbuton Murni (%)	Nilai Pen (dmm)	PG
0%	66.5	67.67
2%	58.0	67.52
4%	52.2	68.66
6%	43.2	67.00
8%	41.7	68.31
10%	37.3	71.33
20%	27.2	72.31
30%	19.2	73.05
40%	3.2	86.31
50%	2.0	94.10
60%	1.5	103.8
70%	1.2	108.5
80%	0.8	106.8
90%	0.5	114.7
92%	0.5	116.4
94%	0.5	117.7
96%	0.5	120.6
98%	0.5	122.4
100%	0.5	123.7

Data nilai *Complex Shear Modulus* (G^*) dan *Phase Angle* (δ) yang diperoleh dari pengujian laboratorium dengan alat DSR disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai *Complex Shear Modulus* (G^*) dan *Phase Angle* (δ)

No.	% Asbuton	Suhu (°C)	Delta (Degrees)	$ G^* $ (Pa)	$ G^* /\sin(\delta)$ (kPa)
1	0%	58	85.52	3575	3.586
		64	86.93	1591	1.593
		70	88.00	742.7	0.7431
2	2%	58	85.50	3648	3.66
		64	86.96	1577	1.58
		70	87.97	720.9	0.7213
3	4%	58	85.36	4133	4.146
		64	86.81	1818	1.821
		70	87.90	844.2	0.8448

No.	% Asbuton	Suhu (°C)	Delta (Degrees)	$ G^* $ (Pa)	$ G^* /\sin(\delta)$ (kPa)
4	6%	58	85.78	3316	3.325
		64	87.11	1452	1.454
		70	88.08	679.6	0.68
5	8%	58	85.46	3898	3.91
		64	86.87	1721	1.724
		70	87.95	809.6	0.8101
6	10%	58	84.18	5764	5.794
		64	85.95	2518	2.524
		70	87.28	1154	1.155
7	20%	58	83.31	6688	6.734
		64	85.24	2914	2.924
		70	86.69	1319	1.322
8	30%	58	82.99	7919	7.978
		64	85.11	3390	3.403
		70	86.67	1531	1.534
9	40%	58	76.12	44160	45.48
		64	79.20	18850	19.19
		70	81.95	8226	8.308
10	50%	58	70.12	1.30.E+05	138.3
		64	73.27	58720	61.32
		70	76.60	8226	8.308
11	60%	58	73.27	2.79.E+05	300.3
		64	76.60	1.38.E+05	146.6
		70	73.46	64400	67.18
12	70%	58	64.01	6.51.E+05	723.7
		64	68.37	2.62.E+05	281.3
		70	70.66	1.33.E+05	141.3
13	80%	58	59.61	1.92.E+06	2226
		64	63.79	7.87.E+05	281.3
		70	68.49	3.10.E+05	141.3
14	90%	58	59.46	4.33.E+06	5028
		64	61.55	1.85.E+06	2106
		70	65.58	7.51.E+05	824.7
15	92%	58	58.62	5.92.E+06	6929
		64	60.83	2.47.E+06	2827
		70	64.59	1.02.E+06	1126
16	94%	58	58.46	6.10.E+06	7157
		64	60.51	2.58.E+06	2968
		70	64.11	1.08.E+06	1202
17	96%	58	59.49	8.44.E+06	9797
		64	60.59	3.54.E+06	4064
		70	63.35	1.50.E+06	1682
18	98%	58	60.48	9.69.E+06	11130
		64	60.87	4.11.E+06	4701
		70	63.14	1.75.E+06	1960
19	100%	58	61.73	1.02.E+07	11610
		64	60.98	4.44.E+06	5073
		70	63.26	1.88.E+06	2099

B. Modulus Kekakuan Bitumen (E^*) Berdasarkan Pengujian Dynamic Shear Rheometer (DSR)

Hasil perhitungan diperlihatkan pada Tabel 3 dan Gambar 2. Pada artikel ini, sapuan temperatur (*temperature sweep*) tidak dimulai dari suhu -20°C atau 10°C seperti pada referensi atau penelitian terdahulu,

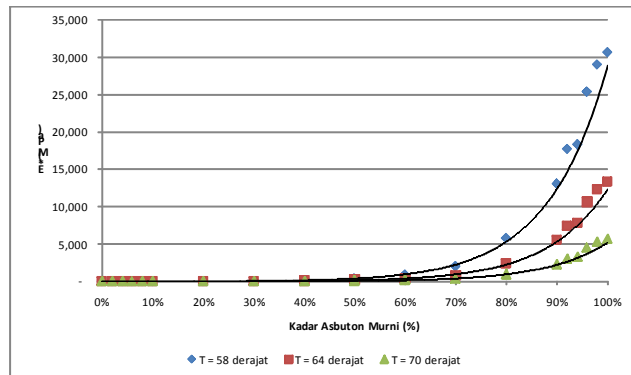
melainkan menyesuaikan dengan kondisi cuaca dan suhu yang ada di Indonesia yaitu 58°C, 64°C dan 70°C.

Tabel 3 menunjukkan semakin tinggi kadar Asbuton murni dalam aspal gabungan, makin tinggi pula Modulus Kekakuan Bitumen (E*). Sedangkan dari tinjauan suhu, semakin tinggi suhu pengujian, Modulus Kekakuan Bitumen (E*) semakin rendah. Hal ini disebabkan karena peningkatan suhu pengujian akan menurunkan nilai *phase angle* (δ) yang artinya menurunkan bagian elastis dari bitumen.

Tabel 3. Modulus Kekakuan Bitumen (E*) Berdasarkan Pengujian DSR

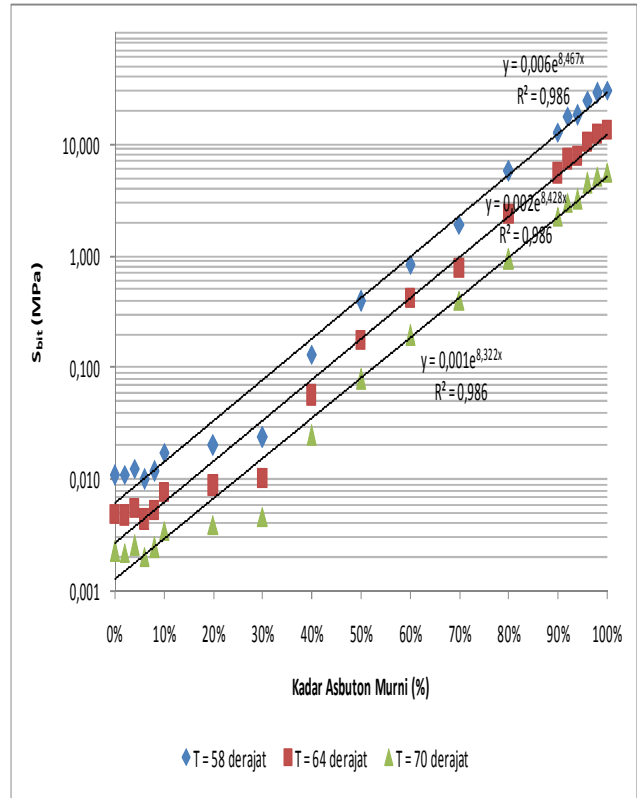
Kadar Asbuton Murni (%)	G* (Pa)			E* = 2 G* (1 + γ) (MPa)		
	T = 58°C	T = 64°C	T = 70°C	T = 58°C	T = 64°C	T = 70°C
0%	3575	1591	742.7	0.011	0.005	0.002
2%	3648	1577	720.9	0.011	0.005	0.002
4%	4133	1818	844.2	0.012	0.005	0.003
6%	3316	1452	679.6	0.010	0.004	0.002
8%	3898	1721	809.6	0.012	0.005	0.002
10%	5764	2518	1154	0.017	0.008	0.003
20%	6688	2914	1319	0.020	0.009	0.004
30%	7919	3390	1531	0.024	0.010	0.005
40%	44160	18850	8226	0.132	0.057	0.025
50%	130100	58720	26120	0.390	0.176	0.078
60%	278500	138100	64400	0.836	0.414	0.193
70%	650500	261500	133300	1.952	0.785	0.400
80%	1920000	787100	310200	5.760	2.361	0.931
90%	4330000	1852000	750900	12.990	5.556	2.253
92%	5916000	2469000	1017000	17.748	7.407	3.051
94%	6100000	2584000	1081000	18.300	7.752	3.243
96%	8440000	3540000	1503000	25.320	10.620	4.509
98%	9687000	4107000	1749000	29.061	12.321	5.247
100%	10220000	4436000	1875000	30.660	13.308	5.625

Pada Gambar 2, nilai Modulus Kekakuan Bitumen (E*) tampak meningkat tajam mulai kadar Asbuton murni 60% dan berhenti pada kadar Asbuton murni 100%. Peningkatan ini dapat dilihat dari perubahan gradien kurva yang berubah secara drastis mulai dari kadar Asbuton murni 60%. Hal ini disebabkan karena nilai G* juga memiliki kecenderungan (*trend*) yang sama, yaitu meningkat tajam pada kadar Asbuton murni 60%.



Gambar 2. Hubungan Kadar Asbuton Murni dan Modulus Kekakuan Bitumen (E*)

Gambar 3 berikut menggambarkan hubungan kadar Asbuton murni dan Modulus Kekakuan Bitumen (E*) jika E* digambarkan dalam skala logaritmik.



Gambar 3. Hubungan Kadar Asbuton Murni dan Modulus Kekakuan Bitumen (E* dalam skala logaritmik)

Dari tinjauan tersebut diperoleh hubungan Kadar Asbuton murni (Ab) dan Modulus Kekakuan Bitumen (E*), sebagai berikut;

Untuk suhu 58 °C:

$$E^* = 0,006 \cdot 10^{8,467 (Ab)} \quad (3)$$

Untuk suhu 64 °C:

$$E^* = 0,002 \cdot 10^{8,428 (Ab)} \quad (4)$$

Untuk suhu 70 °C:

$$E^* = 0,001 \cdot 10^{8,322 (Ab)} \quad (5)$$

dimana :

Ab : Kadar Asbuton murni

C. Perbandingan Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit})

Perhitungan Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit}) dengan model Ullidtz hanya bisa dilakukan untuk kadar Asbuton murni 0% - 30%. Hal ini disebabkan karena pada kadar Asbuton murni 40% sudah tidak memenuhi salah satu syarat berlakunya model Ullidtz, yaitu nilai (SP_r - T) berkisar antara 20 °C - 60 °C. Sedangkan pada kadar Asbuton murni 40% nilai (SP_r - T) sebesar 65,14 °C dan semakin besar seiring bertambahnya kadar Asbuton murni.

Tabel 4. Perhitungan Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit}) dengan Persamaan Ullidtz

% Asbuton	t	P_i	P_r	SP_r	PI_r	$SP_r - T$	S_{bit} (MPa)
0%	0.016	66.5	43.2	55.30	-0.294	30.298	18.161
2%	0.016	58.0	37.7	56.86	-0.264	31.863	22.672
4%	0.016	52.2	33.9	58.08	-0.243	33.076	26.752
6%	0.016	43.2	28.1	60.24	-0.208	35.244	35.489
8%	0.016	41.7	27.1	60.65	-0.202	35.648	37.348
10%	0.016	37.3	24.3	61.90	-0.184	36.905	43.622
20%	0.016	27.2	17.7	65.54	-0.138	40.543	66.663
30%	0.016	19.2	12.5	69.53	-0.096	44.535	102.207
40%	0.016	3.2	2.1	90.14	0.042	65.139	596.026
50%	0.016	2.0	1.3	95.40	0.064	70.398	859.054
60%	0.016	1.5	1.0	98.69	0.077	73.690	1066.119
70%	0.016	1.2	0.8	101.57	0.087	76.566	1278.044
80%	0.016	0.8	0.5	105.42	0.100	80.416	1613.194
90%	0.016	0.5	0.3	111.26	0.116	86.262	2252.992
92%	0.016	0.5	0.3	111.26	0.116	86.262	2252.992
94%	0.016	0.5	0.3	111.26	0.116	86.262	2252.992
96%	0.016	0.5	0.3	111.26	0.116	86.262	2252.992
98%	0.016	0.5	0.3	111.26	0.116	86.262	2252.992
100%	0.016	0.5	0.3	111.26	0.116	86.262	2252.992

Keterangan: Baris yang diarsir adalah kondisi kadar Asbuton murni yang tidak memenuhi persyaratan berlakunya formula Ullidtz.

Nilai Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit}) yang diperoleh dari Persamaan Ullidtz tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan nilai Modulus Kekakuan Bitumen (E^*) dari pengujian DSR, karena dilakukan pada suhu pengujian yang berbeda. Nilai Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit}) dari Persamaan Ullidtz menggunakan data Nilai Penetrasi yang diperoleh dari pengujian Penetrasi pada suhu 25 °C, sedangkan pengujian DSR dilakukan pada suhu 58 °C, 64 °C dan 70 °C.

Untuk dapat membandingkan kedua nilai Modulus Kekakuan tersebut, maka nilai *Complex Shear Modulus* (G^*) dari pengujian DSR ditarik menjadi nilai G^* pada suhu pengujian 25 °C dengan menggunakan persamaan hubungan antara *Complex Shear Modulus* (G^*), suhu (T) dan kadar Asbuton murni (Ab) menurut Indriyati (2012):

$$G^* = 10,269,633 - 172,058 T + 41,701.538 (Ab) \quad (6)$$

dimana: G^* = *Complex Shear Modulus* (Pa)

T = suhu (°C)

Ab = kadar Asbuton murni

Kemudian nilai G^* tersebut digunakan untuk menghitung Modulus Kekakuan Bitumen (E^*) pada suhu 25 °C. Nilai Modulus Kekakuan Bitumen (E^*) pada Tabel 5 tersebut dapat dibandingkan dengan nilai Modulus Kekakuan Bitumen (S_{bit}) yang diturunkan dari persamaan Ullidtz. Perbandingan nilai Modulus Kekakuan Bitumen dari pengujian DSR (E^*) dan persamaan Ullidtz (S_{bit}) disajikan pada Tabel 6.

Tabel 5. Modulus Kekakuan Bitumen (E^*) untuk Suhu Pengujian 25°C

Kadar Asbuton Murni (%)	G^* (Pa) T = 25 °C	E^* (MPa) T = 25 °C $E^* = 2 G^* (1 + \nu)$ (asumsi $\nu = 0.5$)
0%	5,968,183	17.90
2%	6,051,586	18.15
4%	6,134,989	18.40
6%	6,218,392	18.66
8%	6,301,795	18.91
10%	6,385,198	19.16
20%	6,802,214	20.41
30%	7,219,229	21.66
40%	7,636,245	22.91
50%	8,053,260	24.16
60%	8,470,275	25.41
70%	8,887,291	26.66
80%	9,304,306	27.91
90%	9,721,321	29.16
92%	9,804,724	29.41
94%	9,888,128	29.66
96%	9,971,531	29.91
98%	10,054,934	30.16
100%	10,138,337	30.42

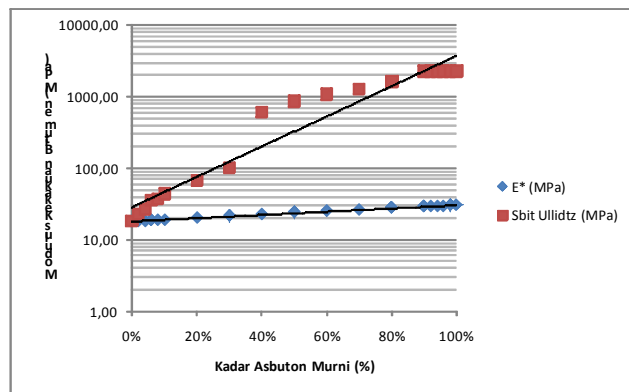
Tabel 6. Nilai Modulus Kekakuan Bitumen dari Persamaan Ullidtz (S_{bit}) dan Pengujian DSR (E^*)

Kadar Asbuton Murni (%)	E^* (MPa)	S_{bit} Ullidtz (MPa)
0%	17.90	18.16
2%	18.15	22.67
4%	18.40	26.75
6%	18.66	35.49
8%	18.91	37.35
10%	19.16	43.62
20%	20.41	66.66
30%	21.66	102.21
40%	22.91	596.02
50%	24.16	859.05
60%	25.41	1066.11
70%	26.66	1278.03
80%	27.91	1613.18
90%	29.16	2252.96
92%	29.41	2252.96
94%	29.66	2252.96
96%	29.91	2252.96
98%	30.16	2252.96
100%	30.42	2252.96

Dari tabel 6, dapat diambil kesimpulan bahwa Modulus Kekakuan Bitumen yang diperoleh dari pengujian Dynamic Shear Modulus (E^*) mempunyai nilai yang hampir sama dengan nilai Modulus Kekakuan Bitumen dari Persamaan Ullidtz (S_{bit}), tetapi hanya

untuk kadar Asbuton murni 0%. Semakin besar kadar Asbuton, semakin besar pula perbedaan nilai E^* dan S_{bit} .

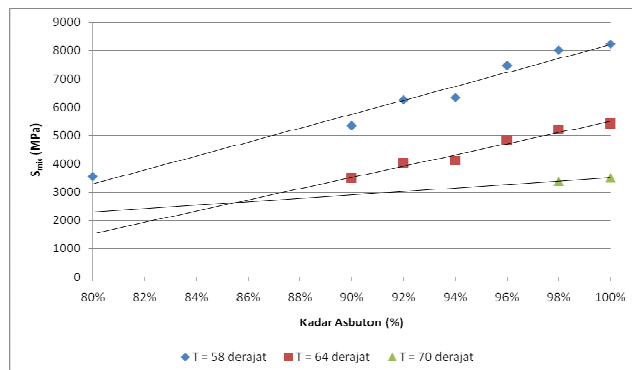
Kesimpulan yang dapat diambil dari perbandingan Modulus Kekakuan Bitumen ini adalah bahwa E^* adalah S_{bit} pada kondisi 0% kadar Asbuton murni atau aspal pen 60/70 murni. Sedangkan untuk aspal gabungan, E^* adalah bukan S_{bit} . Semakin besar kadar Asbuton murni, semakin besar pula perbedaan antara E^* dan S_{bit} . Hal ini menunjukkan bahwa S_{bit} yang dihasilkan dari formula Ullidtz lebih sensitif terhadap perubahan kadar Asbuton murni yang disebabkan karena ada pengaruh parameter sifat reologi dasar, yaitu nilai penetrasi, titik melembek dan *Penetration Index* (PI). Jadi, perubahan pada ketiga nilai tersebut akan memberikan pengaruh yang signifikan pada perubahan nilai S_{bit} . Sedangkan nilai E^* kurang sensitif terhadap perubahan kadar Asbuton murni, karena tidak ada pengaruh dari ketiga parameter sifat reologi dasar.



Gambar 4. Perbandingan Modulus Kekakuan Bitumen untuk Suhu 25°C

D. Hubungan Kadar Asbuton Murni dengan Modulus Kekakuan Campuran (S_{mix})

Analisis modulus kekakuan campuran (S_{mix}) dilakukan dengan asumsi jenis campuran Laston (AC) dan hanya untuk kondisi nilai S_{bit} yang sama atau lebih besar dari 5 MPa. Batasan nilai minimum S_{bit} ini adalah batasan dimana pengaruh bitumen terhadap penentuan modulus kekakuan campuran beraspal adalah kecil.



Gambar 5. Hubungan Kadar Asbuton Murni dan Modulus Kekakuan Campuran (S_{mix}) untuk $S_{bit} > 5$ MPa

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara kadar Asbuton murni dan S_{mix} pada kondisi $S_{bit} > 5$ MPa. Tampak peningkatan nilai kekakuan campuran dari 3,55 GPa pada 80% Asbuton murni menjadi 8,24 GPa pada 100% Asbuton murni untuk suhu pengujian 58 °C. Sedangkan pada suhu pengujian 64 °C terjadi peningkatan nilai S_{mix} dari 3,48 GPa pada 90% Asbuton murni menjadi 5,41 GPa pada 100% Asbuton murni, dan terjadi peningkatan dari 3,38 GPa pada 98% Asbuton murni menjadi 3,50 GPa pada 100% Asbuton murni untuk suhu pengujian 70 °C.

E. Kriteria Kerusakan Perkerasan

Kriteria kerusakan yang ditinjau pada penelitian ini adalah *Permanent Deformation* dan *Fatigue Cracking*. Kajian kriteria kerusakan *Permanent Deformation* dilakukan pada suhu dimana *Permanent Deformation* tersebut terjadi, yaitu pada PG atas. Menurut Nono yang dikutip oleh Kurniadji (2008), PG atas yang terjadi di Indonesia adalah 70 °C. Tabulasi perhitungan batas *Permanent Deformation* disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai $|G^*|/\sin \delta$ pada Suhu 70°C

Kadar Asbuton Murni %	<i>Permanent Deformation</i> T = 70 °C		
	G^*	δ	$G^*/\sin \delta$
0%	743	88.00	743.15
2%	721	87.97	721.35
4%	844	87.90	844.77
6%	680	88.08	679.98
8%	810	87.95	810.12
10%	1,154	87.28	1,155.30
20%	1,319	86.69	1,321.20
30%	1,531	86.67	1,533.59
40%	8,226	81.95	8,307.86
50%	26,120	76.60	26,850.99
60%	64,400	73.46	67,179.82
70%	133,300	70.66	141,271.98
80%	310,200	68.49	333,421.62
90%	750,900	65.58	824,676.01
92%	1,017,000	64.59	1,125,921.14
94%	1,081,000	64.11	1,201,599.76
96%	1,503,000	63.35	1,681,653.57
98%	1,749,000	63.14	1,960,513.59
100%	1,875,000	63.26	2,099,528.90

Menurut *Apshalt Institute* (1997) bitumen yang memiliki nilai $|G^*|/\sin \delta$ lebih besar dari 1,00 kPa adalah bitumen yang dapat kuat terhadap kriteria kerusakan *Permanent Deformation*. Dari batasan tersebut dapat diketahui bahwa untuk dapat menahan *Permanent Deformation* terdapat batas ijin kadar Asbuton murni, yaitu minimal 10%.

Sedangkan untuk kriteria *Fatigue Cracking*, analisis dilakukan pada suhu dimana kriteria kerusakan tersebut terjadi, yaitu pada PG bawah. Menurut Nono yang dikutip oleh Kurniadji (2008), PG bawah yang terjadi di

Indonesia adalah pada suhu 22 °C. Untuk menghitung batasan nilai $|G^*| \cdot \sin \delta$ pada suhu 22 °C diperlukan nilai G^* dan δ pada suhu yang sama. Nilai-nilai tersebut diperoleh dari persamaan-persamaan yang telah dibentuk sebelumnya. Tabulasi perhitungan batas *Fatigue Cracking* disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai $|G^*| \cdot \sin \delta$ pada Suhu 22°C

Kadar Asbuton Murni %	<i>Fatigue Cracking</i> T = 22 °C		
	G*	δ	$G^* \cdot \sin \delta$
0%	6,484,357	78.00	6,342,564
2%	6,567,760	77.76	6,418,463
4%	6,651,163	77.44	6,491,993
6%	6,734,566	78.76	6,605,393
8%	6,817,969	77.90	6,666,496
10%	6,901,372	74.60	6,653,709
20%	7,318,388	72.87	6,993,736
30%	7,735,403	71.51	7,335,923
40%	8,152,419	58.66	6,962,947
50%	8,569,434	51.08	6,666,849
60%	8,986,449	52.67	7,145,440
70%	9,403,465	42.27	6,324,521
80%	9,820,480	33.51	5,421,715
90%	10,237,495	43.22	7,011,173
92%	10,320,898	42.28	6,942,896
94%	10,404,302	42.98	7,093,060
96%	10,487,705	49.59	7,985,602
98%	10,571,108	54.40	8,594,946
100%	10,654,511	60.00	9,227,263

Pada suhu 22 °C, ternyata tidak ada satu nilai kadar Asbuton murni pun yang memenuhi syarat batas nilai $|G^*| \cdot \sin \delta$, yaitu maksimal 5.000 kPa (*Asphalt Institute*, 1997). Oleh karena itu, pada kajian ini dicari suhu dimana ada beberapa nilai kadar Asbuton murni yang memenuhi syarat batas nilai $|G^*| \cdot \sin \delta$, yaitu 34°C, yang selanjutnya bisa disimpulkan menjadi nilai PG bawah yang baru. Tabulasi perhitungan batas *Fatigue Cracking* pada suhu tersebut disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Nilai $|G^*| \cdot \sin \delta$ pada Suhu 34°C

Kadar Asbuton Murni %	<i>Fatigue Cracking</i> T = 34 °C		
	G*	δ	$G^* \cdot \sin \delta$
0%	4,419,661	78.08	4,324,344
2%	4,503,064	77.50	4,396,375
4%	4,586,467	76.93	4,467,598
6%	4,669,870	76.35	4,537,991
8%	4,753,273	75.78	4,607,529
10%	4,836,676	75.20	4,676,190
20%	5,253,692	72.32	5,005,519
30%	5,670,707	69.44	5,309,476
40%	6,087,723	66.56	5,585,304
50%	6,504,738	63.68	5,830,353
60%	6,921,753	60.80	6,042,092
70%	7,338,769	57.92	6,218,125
80%	7,755,784	55.04	6,356,193
90%	8,172,799	52.16	6,454,192
92%	8,256,202	51.58	6,468,810
94%	8,339,606	51.01	6,481,732
96%	8,423,009	50.43	6,492,944
98%	8,506,412	49.86	6,502,431
100%	8,589,815	49.28	6,510,180

Dari batasan yang diberikan oleh *Asphalt Institute* (1997) dapat diketahui bahwa pada suhu 34 °C, untuk dapat menahan *Fatigue Cracking* terdapat batas ijin kadar Asbuton murni, yaitu maksimal 10%.

Dari kajian mengenai kriteria kerusakan, dapat ditarik kesimpulan bahwa bitumen yang kuat terhadap dua kriteria kerusakan *Permanent Deformation* dan *Fatigue Cracking* adalah bitumen yang memiliki nilai $|G^*| \cdot \sin \delta$ lebih besar dari 1,00 kPa dan nilai $|G^*| \cdot \sin \delta$ lebih kecil dari 5.000 kPa (*Asphalt Institute*, 1997).

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa hal, yaitu:

1. Batas ijin kadar Asbuton murni yang tahan terhadap *Permanent Deformation* adalah minimal 10%.
2. Untuk *Fatigue Cracking*, batas ijin kadar Asbuton murni yang memenuhi syarat adalah maksimal 10%.
3. Daerah ijin kadar Asbuton murni yang memenuhi syarat keduanya, yaitu tahan terhadap *Permanent Deformation* dan *Fatigue Cracking* adalah 10%.
4. Dengan menggunakan nilai PG bawah menurut Nono yang dikutip oleh Kurniadji (2008), yaitu 22 °C, tidak ada satupun kadar Asbuton yang memenuhi syarat batas kriteria kerusakan *Fatigue Cracking*. Pada penelitian ini ditemukan satu kondisi yang menghasilkan beberapa kadar Asbuton murni memenuhi syarat batas kriteria kerusakan *Fatigue Cracking*, yaitu suhu 34 °C.

Tabel 10. Nilai $|G^*| \cdot \sin \delta$ dan $|G^*| \cdot \sin \delta$

Kadar Asbuton Murni %	<i>Permanent Deformation</i> T = 70 °C			<i>Fatigue Cracking</i> T = 34 °C		
	G*	δ	$G^* \cdot \sin \delta$	G*	δ	$G^* \cdot \sin \delta$
0%	743	88.00	743.15	4,419,661	78.08	4,324,344
2%	721	87.97	721.35	4,503,064	77.50	4,396,375
4%	844	87.90	844.77	4,586,467	76.93	4,467,598
6%	680	88.08	679.98	4,669,870	76.35	4,537,991
8%	810	87.95	810.12	4,753,273	75.78	4,607,529
10%	1,154	87.28	1,155.30	4,836,676	75.20	4,676,190
20%	1,319	86.69	1,321.20	5,253,692	72.32	5,005,519
30%	1,531	86.67	1,533.59	5,670,707	69.44	5,309,476
40%	8,226	81.95	8,307.86	6,087,723	66.56	5,585,304
50%	26,120	76.60	26,850.99	6,504,738	63.68	5,830,353
60%	64,400	73.46	67,179.82	6,921,753	60.80	6,042,092
70%	133,300	70.66	141,271.98	7,338,769	57.92	6,218,125
80%	310,200	68.49	333,421.62	7,755,784	55.04	6,356,193
90%	750,900	65.58	824,676.01	8,172,799	52.16	6,454,192
92%	1,017,000	64.59	1,125,921.14	8,256,202	51.58	6,468,810
94%	1,081,000	64.11	1,201,599.76	8,339,606	51.01	6,481,732
96%	1,503,000	63.35	1,681,653.57	8,423,009	50.43	6,492,944
98%	1,749,000	63.14	1,960,513.59	8,506,412	49.86	6,502,431
100%	1,875,000	63.26	2,099,528.90	8,589,815	49.28	6,510,180

F. Rekomendasi Kadar Asbuton Murni

Dari beberapa analisis yang telah dilakukan, pada bagian ini akan diberikan satu nilai kadar Asbuton murni yang dinilai optimum pada kondisi perkerasan di Indonesia. Rekomendasi kadar Asbuton murni tersebut diambil berdasarkan parameter-parameter yang telah dikaji sebelumnya dan kriteria-kriteria batasannya masing-masing, yaitu:

1. Modulus Kekakuan Bitumen

Kriteria batasan yang diambil untuk Modulus Kekakuan Bitumen adalah batasan nilai minimum Modulus Kekakuan Bitumen, yaitu sama atau lebih besar dari 5 MPa pada suhu 25 °C (*Asphalt Institute*, 1997). Batasan ini adalah batasan dimana pengaruh bitumen terhadap penentuan modulus kekakuan campuran beraspal adalah kecil.

Berdasarkan batasan tersebut, semua kadar Asbuton murni memiliki nilai Modulus Kekakuan Bitumen lebih besar dari 5 MPa. Nilai Modulus Kekakuan Bitumen yang digunakan di sini adalah nilai Modulus Kekakuan Bitumen yang diperoleh dari pengujian DSR (E^*). Sehingga dapat disimpulkan bahwa semua kadar Asbuton murni memenuhi persyaratan Modulus Kekakuan Bitumen.

2. Kriteria Kerusakan

Kriteria kerusakan yang ditinjau pada penelitian ini adalah *Permanent Deformation* dan *Fatigue Cracking*.

a. *Permanent Deformation*

Permanent Deformation terjadi pada suhu maksimum perkerasan atau pada PG atas, yaitu 70 °C. Pada batasan tersebut, kadar Asbuton murni yang memenuhi syarat adalah kadar Asbuton murni 10% - 100%.

b. *Fatigue Cracking*

Fatigue Cracking terjadi pada suhu minimum perkerasan atau pada PG bawah. Pada suhu 34 °C, kadar Asbuton murni yang memenuhi syarat adalah kadar Asbuton murni 0% - 10%.

Tabel 11. Rekomendasi Kadar Asbuton

Kadar Asbuton	Parameter				
	Sifat Reologi Dasar		Modulus Kekakuan Bitumen	Kriteria Kerusakan	
	Daktilitas	Viskositas		<i>Permanent Deformation</i>	<i>Fatigue Cracking</i>
	min 50 cm	maks 200°C	> 5 MPa, 25 °C	$ G^* /\sin \delta > 1$ kPa	$ G^* .\sin \delta < 5$ MPa
0%					
2%					
4%					
6%					
8%					
10%					
20%					
30%					
40%					
50%					
60%					
70%					
80%					
90%					
92%					
94%					
96%					
98%					
100%					

Kajian mengenai rekomendasi kadar Asbuton murni tersebut, diringkas dalam bentuk Tabulasi seperti ditunjukkan Tabel 11. Pada Tabel 11, rekomendasi kadar asbuton murni optimum yang diberikan adalah sekitar 10%. Rekomendasi tersebut berlaku dengan batasan nilai PG bawah, yaitu sebesar 34 °C. Kelemahan dengan kondisi tersebut adalah batas PG bawah tersebut jarang ditemukan di Indonesia. Tetapi rekomendasi kadar Asbuton murni optimum tersebut masih potensial digunakan, karena pada kondisi temperatur tinggi batas PG bawah jarang sekali digunakan.

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Kesimpulan dari rangkaian pengujian dan analisis yang telah dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Modulus Kekakuan Bitumen yang diperoleh dari pengujian *Dynamic Shear Modulus* (E^*) mempunyai nilai yang hampir sama dengan nilai Modulus Kekakuan Bitumen dari Persamaan Ullidtz (S_{bit}), tetapi hanya untuk kadar Asbuton murni 0%, atau aspal pen 60/70 murni.
2. Dari kajian mengenai kriteria kerusakan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:
 - a. Sifat campuran yang mengandung bitumen Asbuton murni mengalami peningkatan ketahanan terhadap deformasi permanen (*Permanent Deformation*) tetapi mengurangi ketahanan terhadap retak leleh (*Fatigue Cracking*), seiring dengan penambahan kadar Asbuton murni.
 - b. Berdasarkan persamaan *Complex Shear Modulus* (G^*) dan *Phase Angle* (δ), untuk menentukan batasan kriteria kerusakan: *Permanent Deformation* dan *Fatigue Cracking*, diperoleh nilai batas bawah PG yang baru, yaitu 34 °C.
3. Dari beberapa kajian yang telah dilakukan, dapat direkomendasikan kadar Asbuton murni optimum yang ditinjau dari beberapa parameter dan kriterianya masing-masing, yaitu sekitar 10%.

B. Saran

Berikut disampaikan beberapa saran untuk dapat melanjutkan dan melengkapi ide dasar penelitian, sebagai berikut:

1. Melakukan percobaan laboratorium untuk menentukan nilai Modulus Resilien Campuran Beraspal dan kriteria deformasi permanen.
2. Melakukan kajian perbaikan sifat reologi bitumen dengan menggunakan aspal dengan nilai pen yang lebih tinggi, sehingga diperoleh rentang (*range*) kadar Asbuton murni optimum lebih besar dari 10%.

DAFTAR PUSTAKA

- Asphalt Institute, 1996, *Observations of Field Experience with Superpave Projects Constructed in 1996*, Asphalt Institute, Executive Offices and Research Centre, USA.
- Asphalt Institute, 1997, *Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing*, Asphalt Institute, USA.
- Bonnaure, F., 1977, Prosiding, *A New Method of Predicting The Stiffness of Asphalt Paving Mixture*, Association of Asphalt Paving Technology Vol. 46, 64-104.
- Brown, S.F., 1982, *Design of Asphalt Pavements*, Vol. 1, Nottingham, UK, 209-220.
- Francken, L., 1998, *Bituminous Binders and Mixes; State Of The Art And Interlaboratory Tests On Mechanical Behaviour And Mix Design*, Routledge, New York, NY 100001, 52-55.
- Indriyati, Eva Wahyu, 2012, Tesis, Kajian Perbaikan Sifat Reologi *Visco-Elastic* Aspal dengan Penambahan Asbuton Murni Menggunakan Parameter *Complex Shear Modulus*, Institut Teknologi Bandung.
- Indriyati, Eva Wahyu, 2014, Jurnal, Perbaikan Sifat Reologi *Visco-Elastic* Aspal dengan Penambahan Asbuton Murni Menggunakan Parameter *Complex Shear Modulus*, *Dinamika Rekayasa*, Edisi 10, Volume 1.
- Mezger, T.G., 2002, *The Reology Handbook; For Users Of Rotational and Oscillatory Rheometers*, Vincentz Verlag, Hannover, 30, 56.
- Nono. Kurniadji. Riswan., 2005, Jurnal, Kinerja Campuran Beton Aspal Dengan Pengikat Aspal Yang Dimodifikasi Asbuton, Puslitbang Jalan dan Jembatan, Departemen Pekerjaan Umum, Republik Indonesia.
- Rahman, Harmein., 2010, Laporan Disertasi, Evaluasi Model Modulus Bitumen Asbuton Dan Model Modulus Campuran Yang Mengandung Bitumen Asbuton, Institut Teknologi Bandung.
- Read J., 2003, *The Shell Bitumen Handbook*, Thomas Telford Publishing, London, 7.
- Van Der Poel, 1954, *A General System Describing Asphaltic Bitumens With The Aid Of Their Mechanical Behaviour Of Asphaltic Bitumens*, *Journal of Applied Chemistry*, 221-236.
- Yoder, E.J. dan Witczak, M.W., 1975, *Principle of Pavement Design*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 269-271.