

## Pengembangan Model Korelasi antara Modulus Resilien dengan Modulus Dinamis untuk Campuran Stone Matrix Asphalt

**Nyoman Suaryana**

Puslitbang Jalan dan Jembatan, Jl. AH. Nasution No. 264 Bandung 40294  
E-mail: nyomansuaryana@yahoo.com

**Bambang Sugeng Subagio**

Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No 10 Bandung 40132  
E-mail: bssubagio@yahoo.com

**Djunaedi Kosasih**

Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No 10 Bandung 40132  
E-mail: kosasih@si.itb.ac.id

**Sjahdanulirwan**

Puslitbang Jalan dan Jembatan, Jl. AH. Nasution No. 264 Bandung 40294

### Abstrak

*Parameter yang berhubungan dengan sifat mekanistik bahan, seperti modulus kekakuan sangat diperlukan baik untuk perencanaan tebal lapisan perkerasan jalan maupun untuk mengevaluasi kinerja campuran beraspal. Mengingat campuran beraspal merupakan material yang tidak bersifat elastis sempurna maka pemakaian istilah modulus elastis kurang tepat digunakan. Sebagai gantinya digunakan beberapa istilah seperti modulus resilien dan modulus dinamis. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan korelasi antara dua parameter modulus campuran beraspal tersebut, khususnya pada campuran SMA (Stone Matrix Asphalt). SMA yang digunakan dibedakan menjadi dua, yaitu dengan serat selulosa sebagai bahan penstabil dan dengan asbuton butir sebagai bahan penstabil. Berdasarkan hasil pengujian pengaliran aspal (draindown) terlihat asbuton butir dapat berfungsi sebagai penstabil SMA. Nilai modulus resilien dan modulus dinamis SMA akan berkurang apabila temperatur pengujian bertambah. Sementara dengan turunya frekwensi pembebanan maka nilai modulus resilien dan modulus dinamis akan menurun juga. Korelasi antara modulus dinamis dengan modulus resilien pada kondisi frekwensi pembebanan dan temperatur yang sama cukup baik dengan  $R^2 = 0,97$  dimana nilai modulus dinamis sekitar 0,9 dari nilai modulus resilien.*

**Kata-kata Kunci:** Modulus resilien, Modulus dinamis, Asbuton, Stone Matrix Asphalt.

### Abstract

*Parameters that are related to the mechanistic properties of material, such as the modulus is an important factor both for thick layers design and for pavement performance evaluation. It is well known that most paving materials are not elastic but experience some permanent deformation after each load application and term of elastic modulus inappropriate to use. Another alternative that can be used is the terms such as dynamic modulus and resilient modulus. The purpose of this research is to develop a correlation between the two modulus parameters, especially for the SMA mix (Stone Matrix Asphalt). SMA is used can be divided into two, i.e. with cellulose fibers as a stabilizer and with granular asbuton as stabilizer. Based on the results of the draindown asphalt testing, granular asbuton can serve as a stabilizer. The value of dynamic and resilient modulus will be reduced when the temperature testing increased. While the decrease of loading frequencies will be reduced the value of dynamic and resilient modulus. Correlation between the dynamic modulus and the resilient modulus quite well with  $R^2 = 0.97$  on the same conditions of temperature and loading frequency, where the dynamic modulus value about 0.9 the resilient modulus value.*

**Keywords:** Resilient modulus, Dynamic modulus, Asbuton, Stone Matrix Asphalt.

## 1. Pendahuluan

Parameter yang berhubungan dengan sifat mekanistik bahan, seperti nilai modulus sangat diperlukan baik untuk perencanaan tebal lapisan perkerasan jalan maupun untuk mengevaluasi kinerja campuran beraspal. Mengingat campuran beraspal merupakan material yang tidak bersifat elastis sempurna maka pemakaian istilah modulus elastis kurang tepat digunakan. Sebagai gantinya digunakan beberapa istilah seperti modulus resilien dan modulus dinamis.

Pengujian modulus resilien di laboratorium sesuai dengan ASTM D4123-82; menggunakan pola pembebanan *cyclic loading* dengan konfigurasi beban berupa *diametral loading*. Pada saat awal beban diberikan, benda uji akan mengalami deformasi permanen yang cukup tinggi, yang ditunjukkan pada regangan plastis (*plastic strain*). Regangan plastis akan meningkat sejalan dengan peningkatan jumlah pengulangan beban yang diberikan. Tetapi setelah 100 sampai 200 pengulangan beban, regangan yang terjadi selanjutnya akan balik hampir secara sempurna (*nearly complete recoverable*) dan proporsional terhadap pembebanan, maka material tersebut dianggap material elastis, sehingga persamaan untuk modulus resilien menjadi (Huang, 2004):

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

dimana :

$M_R$  = modulus resilien  
 $\sigma_d$  = tegangan deviator  
 $\epsilon_r$  = regangan balik (*recoverable strain*)

Modulus dinamis kompleks  $E^*$  adalah merupakan bilangan yang menunjukkan hubungan antara tegangan dan regangan untuk kondisi material viskoelastik linier. Pengujian modulus dinamis dengan metoda AASHTO Designation: PP 61-10; menggunakan pola pembebanan sinusoidal dengan *axial loading*.

$$E^* = E' + iE'' \quad (2)$$

dimana:

$E^*$  = modulus kompleks  
 $E'$  = *storage modulus* atau bagian riil  
 $E''$  = *loss modulus* atau bagian imajiner  
 $i$  = bilangan imajiner

*Storage modulus* dan *loss modulus* dinyatakan dengan persamaan :

$$E' = \frac{\sigma_0 \cos(\delta)}{\epsilon_0} \quad (3)$$

dimana:

$\sigma_0$  = tegangan maksimum (*peak stress*)  
 $\epsilon_0$  = regangan maksimum (*peak strain*)  
 $\delta$  = sudut fase (*phase angle*), derajat

Sudut fase ( $\delta$ ) merupakan indikator sifat elastis atau viskous material, untuk material yang elastik murni, maka sudut fase,  $\delta = 0$ , dan untuk material yang murni viskous, sudut fase  $\delta = 90^\circ$ . Sehingga untuk material yang elastik dengan sudut fase,  $\delta = 0$  akan diperoleh modulus kompleks sama dengan nilai absolut modulus kompleks. Nilai absolut dari modulus kompleks, disebut sebagai modulus dinamis (Yoder & Witczak, 1975), yaitu :

$$E^* = |E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (4)$$

Untuk memperhitungkan pengaruh dari temperatur dan kecepatan pembebanan, dapat dibuat master curve modulus dinamis berdasarkan suatu temperatur referensi. Model persamaan umumnya dapat menggunakan persamaan *power law* untuk campuran beraspal pada temperatur rendah dan sedang. Pada temperatur tinggi persamaan polinomial dapat juga digunakan. Namun penggunaan persamaan polinomial pada semua temperatur menghasilkan perkiraan yang kurang baik (Pellinen et al., 2002). Berdasarkan hasil penelitian di University of Maryland, master curve modulus dinamis yang mewakili dapat dibuat dengan menggunakan persamaan sigmoidal (Bonaquist & Christensen, 2005).

Campuran SMA (*Split Mastic Asphalt* atau *Stone Matrix Asphalt*) diperkenalkan pertama kali oleh Dr. Zichner, pada tahun 1968. SMA bergradasi senjang dan mengandalkan kekuatan dari rangka agregat kasar, dan rongga diantaranya diisi dengan mastik dengan kadar aspal yang tinggi untuk memberikan durabilitas yang baik, sementara untuk menjaga kadar aspal tidak berkurang akibat pengaliran aspal (*draindown*) selama proses pengangkutan maka jika diperlukan ditambahkan bahan penstabil (Blazejowski, 2011).

Asbuton (aspal batu Buton) diharapkan dapat berfungsi sebagai pestabil dan sekaligus memberikan tambahan filler. Menurut Affandi (2012), asbuton butir yang ditambahkan pada AC (*Asphaltic Concrete*) dengan proporsi yang tepat dapat meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen.

Kehandalan SMA terlihat dari hasil evaluasi pemanfaatan SMA di Amerika yang dilakukan oleh NCAT (Brown et. al., 1997), dari 86 proyek yang menggunakan SMA diperoleh kesimpulan antara lain; (i) lebih dari 90 % perkerasan mempunyai alur kurang dari 4 mm, (ii) retak bukan menjadi masalah besar, (iii) tidak terbukti terjadinya pelepasan butir (*ravelling*).

Mengingat pentingnya nilai modulus, dan saat ini di Indonesia digunakan dua metoda pengujian tersebut, maka dianggap perlu untuk mengadakan penelitian dengan tujuan mengembangkan korelasi nilai modulus resilien dengan modulus dinamis, khususnya untuk campuran beraspal jenis Stone Matrix Asphalt (SMA) yang dipercaya lebih tahan terhadap deformasi permanen.

## 2. Penyiapan Contoh Uji

### 2.1 Karakteristik agregat dan aspal

Agregat yang digunakan berasal dari daerah Sewo, Kabupaten Subang Provinsi Jawa Barat dengan karakteristik seperti diperlihatkan pada **Tabel 1**. Karakteristik agregat tersebut telah memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan SMA berdasarkan standar AASHTO M 325-08 dan standar agregat untuk campuran beraspal sesuai Spesifikasi Bina Marga 2011.

Gradasi campuran yang digunakan mengacu pada spesifikasi AASHTO M 325-08. SMA dirancang dengan proporsi agregat kasar yang banyak sehingga membentuk rangka (*skeleton*) agregat yang kuat.

Aspal minyak yang digunakan adalah aspal minyak penetrasi 60 yang diproduksi oleh PT. Pertamina (Persero). Sementara asbuton yang digunakan berupa asbuton butir yang diproduksi oleh PT. BAI (Buton Asphalt Indonesia), yaitu asbuton butir LGA 50/25. Angka pertama menunjukkan nilai penetrasi dengan koridor nilai dari 40 dmm sampai dengan 60 dmm, sementara angka kedua menunjukkan kadar bitumen dalam asbuton dengan koridor kadar bitumen dari 20% sampai dengan 30%. Asbuton mempunyai nilai penetrasi yang relatif tinggi yaitu termasuk dalam klasifikasi aspal pen 40. Penggunaan asbuton dengan penetrasi tinggi tersebut memungkinkan pemakaian yang lebih banyak, sementara mineral yang terkandung di dalamnya dapat bermanfaat sebagai bahan pengisi (*filler*) dalam SMA yang kebutuhannya relatif tinggi.

Hasil pengujian karakteristik bitumen asbuton dan aspal minyak pen 60 diperlihatkan pada **Tabel 2**.

**Tabel 1. Sifat fisik agregat**

| Sifat Fisik                             | Nilai         |                |               | Satuan |
|-----------------------------------------|---------------|----------------|---------------|--------|
|                                         | Agregat Kasar | Agregat Sedang | Agregat Halus |        |
| Abrasi Los Angeles                      | 16,91         | -              | -             | %      |
| Setara Pasir ( <i>sand equivalent</i> ) | -             | -              | 74,2          | %      |
| Berat Jenis                             |               |                |               |        |
| - Bulk                                  |               | 2,657          | 2,677         | -      |
| - SSD                                   |               | 2,695          | 2,706         | -      |
| - Apparent                              |               | 2,762          | 2,758         | -      |
| Penyerapan                              | 1,434         | 1,092          | -             | %      |
| Prosentase agregat pecah                | 100/100       | 100/100        | -             | %      |
| Kekekalan bentuk ( <i>soundness</i> )   | 1,04          | 1,54           | 1,73          | %      |

**Table 2. Karakteristik bitumen LGA dan aspal minyak pen 60**

| Property                                        | Asbuton                       | Aspal            | Satuan |
|-------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|--------|
|                                                 | Lawele Granular Asphalt (LGA) | Minyak Pen 60/70 |        |
| Penetrasi, 25 °C                                | 41                            | 62               | 0.1 mm |
| Titi lembek (R& B)                              | 58,1                          | 50,3             | °C     |
| Duktiitas                                       | > 140                         | > 140            | cm     |
| Kelarutan dalam C <sub>2</sub> HCL <sub>3</sub> | -                             | 99,5             | %      |
| Titik nyala                                     | -                             | 317              | °C     |
| Berat jenis                                     | 1,125                         | 1,035            | -      |
| Kehilangan berat, TFOT                          | 3,96                          | 0,0041           | %      |
| Penetrasi setelah TFOT                          | 27,8                          | 47,12            | 0.1 mm |
| Titik lembek setelah TFOT                       | 68,6                          | 51,3             | °C     |
| Duktilitas setelah TFOT                         | 25                            | > 140            | cm     |
| Kadar aspal (bitumen)                           | 23,3                          |                  | %      |

Kepekaan aspal terhadap perubahan temperatur dapat diketahui dengan jelas bila sifat aspal dinyatakan dalam Indeks Penetrasinya (IP). Nilai IP aspal berkisar antara -3 sampai +7, aspal dengan nilai IP yang tinggi lebih tidak peka terhadap perubahan temperatur dan sebaliknya. Selain itu, nilai IP aspal dapat juga digunakan untuk memprediksi kinerja campuran beraspal, aspal dengan IP yang tinggi akan menghasilkan campuran beraspal yang memiliki modulus kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi yang tinggi. Nilai IP aspal dapat dihitung dengan menggunakan rumusan yang diturunkan oleh Pfeiffer dan dikembangkan lebih lanjut oleh Heukelom (Shell, 2003), yaitu:

$$IP = \frac{20(1 - 25A)}{1 + 50A} \quad (5)$$

dengan

$$A = \frac{\log .PenI_{25} - \log .800}{T_{25} - T_{pen800}} \quad (6)$$

dimana :

- Pen = Nilai penetrasi aspal yang diuji pada temperatur 25°C
- T<sub>25</sub> = Temperatur pengujian 25°C
- T<sub>25</sub> = Temperatur aspal yang memberikan nilai penetrasi 800

Dengan rumus tersebut, maka diperoleh IP bitumen asbuton sebesar + 0,17. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan IP aspal minyak, yaitu - 0,61. Hasil tersebut menunjukkan bitumen asbuton mempunyai kinerja yang lebih baik, khususnya kepekaan terhadap temperatur.

### 2.2 Karakteristik campuran beraspal

Metoda perancangan campuran mengacu pada NAPA QIS 122: SMA Guidelines dan AASHTO M325, dengan hasil ditunjukkan pada Tabel 3.

SMA konvensional dengan bahan penstabil serat selulosa disebut SMA, sementara SMA dengan asbuton butir sebagai penstabil selanjutnya disebut SMAB.

Berdasarkan data pada Tabel 3, Penambahan serat selulosa sebanyak 0,2% atau penambahan asbuton butir LGA sebanyak 7,5 % dapat mencegah draindown aspal tidak melewati batas persyaratan (maks 0,3 %). Hal ini menunjukkan draindown aspal dapat dicegah dengan menggunakan binder absorbers yaitu dengan serat selulosa atau dengan menggunakan viscosity boosters yaitu dengan asbuton.

Nilai stabilitas SMAB dengan bahan penstabil asbuton, relatif lebih besar sementara nilai flow lebih kecil dibandingkan SMA. Hal ini mengindikasikan SMAB lebih kaku dibandingkan dengan SMA.

## 3. Hasil Pengujian dan Analisa

### 3.1 Modulus Resilien

Modulus resilien adalah modulus elastisitas berdasarkan regangan dipulihkan (*recoverable strain*) dengan pembebanan yang berulang. Pengujian modulus resilien dilaksanakan dengan variasi frekwensi, yaitu pada frekwensi 1,33 Hz (*pulse repetition period* 750 ms) dan pada frekwensi 0,33 Hz (*pulse repetition period* 3000 ms), serta dengan variasi temperatur yaitu 15, 35 dan 45 °C. Beban puncak yang digunakan adalah 1500 N. Pengujian dilakukan dengan dua contoh uji (duplo) dengan hasil rata-rata seperti diperlihatkan pada Tabel 4.

Dari Tabel 4, terlihat bahwa nilai modulus resilien akan turun dengan meningkatnya temperatur pengujian dan dengan penurunan frekwensi pembebanan. Nilai modulus resilien untuk SMAB dengan asbuton sebagai penstabil terlihat lebih besar dibandingkan dengan SMA yang menggunakan serat selulosa dengan penstabil, untuk temperatur dan frekwensi yang sama.

Gambar 1, memperlihatkan hubungan antara modulus resilien dengan frekwensi pembebanan serta temperatur pengujian, dimana nilai modulus resilien akan turun jika temperaaur pengujian naik atau frekwensi pembebanan turun.

Table 3. Karakteristik campuran beraspal SMA

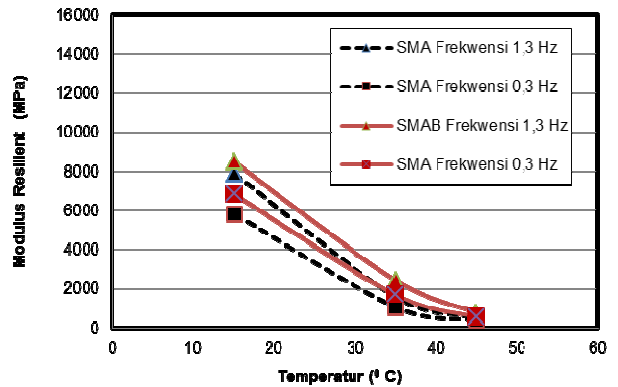
| Kriteria Campuran               | Spesifikasi AASHTO D: M 325-08      | SMA                             | SMAB                                     | Satuan |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|--------|
|                                 |                                     | Penambahan 0,2 % serat selulosa | Penambahan 7,5 % asbuton, tanpa selulosa |        |
| Kadar aspal                     | min. 6,0                            | 6,05                            | 6,54                                     | %      |
| Void in Mix (VIM)               | 4,0                                 | 4,0                             | 4,0                                      | %      |
| Void in Mineral Aggregate (VMA) | min 17,0                            | 17,1                            | 17,9                                     | %      |
| Void Filled Bitumen (VFB)       | -                                   | 76,5                            | 76,8                                     | %      |
| Marshall Stability              | -                                   | 634                             | 651                                      | kg     |
| Flow                            | -                                   | 5,4                             | 4,1                                      | mm     |
| VCA mix                         | lebih kecil dari VCA <sub>DRC</sub> | VCA mix = 0,81 VCA              | VCA mix = 0,82 VCA                       | %      |
| Draindown                       | maks. 0,3                           | DRC 0,18                        | DRC 0,22                                 | %      |

### 3.2 Modulus Dinamis

Modulus Dinamis adalah bilangan yang menunjukkan hubungan antara tegangan dan regangan untuk kondisi material viskoelastik linier yang mengalami pembebanan beban sinusoidal dengan frekwensi tertentu. Pengujian modulus dinamis kompleks dilakukan pada sejumlah data, yaitu dilakukan untuk 3 variasi temperatur (4 °C, 20 °C dan 45 °C), 4 variasi frekwensi pembebanan (10 Hz, 1 Hz, 0,01 Hz dan 0,01 Hz). Contoh uji dengan ukuran silinder 10x15 cm. Pengujian dilakukan dari mulai temperatur terendah ke tinggi dan dari frekwensi tinggi ke frekwensi rendah. Pengujian modulus dinamis dilakukan dengan tiga contoh uji dengan hasil rata-rata seperti diperlihatkan pada Tabel 5.

Berdasarkan Tabel 5, terlihat pola yang sama antara modulus resilien dengan modulus dinamis, yaitu: pada frekwensi pembebanan yang sama, modulus dinamis akan menurun dengan bertambahnya temperatur pengujian untuk campuran yang sama. Sementara pada temperatur yang sama, nilai modulus dinamis akan naik dengan naiknya frekwensi pembebanan.

Nilai modulus dinamis SMAB lebih tinggi dibandingkan dengan nilai modulus dinamis SMA pada semua temperatur dan frekwensi pengujian. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa karakteristik SMAB lebih baik dibandingkan dengan SMA dilihat dari parameter modulus. Perbedaan nilai modulus dinamis SMA dan SMAB lebih terlihat jelas pada temperatur tinggi, yaitu 45°C. Fenomena ini menunjukkan SMAB lebih tahan terhadap temperatur tinggi.



Gambar 1. Hubungan Modulus Resilien dengan temperatur dan frekwensi pembebanan

Tabel 4. Pengujian Modulus Resilien SMA

| Temperatur Pengujian (°C) | Frekwensi Pengujian (Hz) | SMA                             | SMAB                                           | Satuan |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|--------|
|                           |                          | Penambahan 0,2 % serat selulosa | Penambahan 7,5 % asbuton butir, tanpa selulosa |        |
| 15                        | 1,333                    | 7909                            | 8493                                           | MPa    |
| 15                        | 0,333                    | 5822                            | 6831                                           | MPa    |
| 35                        | 1,333                    | 1581                            | 2437                                           | MPa    |
| 35                        | 0,333                    | 1067                            | 1685                                           | MPa    |
| 45                        | 1,333                    | 505                             | 767                                            | MPa    |
| 45                        | 0,333                    | 382                             | 538                                            | MPa    |

Tabel 5. Pengujian Modulus Dinamis SMA

| Temperatur Pengujian (°C) | Frekwensi Pengujian (Hz) | SMA                            | SMAB                                           | Satuan |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|--------|
|                           |                          | Penambahan 0,2% serat selulosa | Penambahan 7,5 % asbuton butir, tanpa selulosa |        |
| 4                         | 10                       | 17114,9                        | 18080,0                                        | MPa    |
| 4                         | 1                        | 1198,7                         | 13399,6                                        | MPa    |
| 4                         | 0,1                      | 6991,6                         | 8492,7                                         | MPa    |
| 4                         | 0,01                     | 3342,2                         | 4311,4                                         | MPa    |
| 20                        | 10                       | 9545,8                         | 9478,5                                         | MPa    |
| 20                        | 1                        | 5205,2                         | 4931,3                                         | MPa    |
| 20                        | 0,1                      | 1784,0                         | 1986,5                                         | MPa    |
| 20                        | 0,01                     | 531,8                          | 746,9                                          | MPa    |
| 45                        | 10                       | 1534,3                         | 2425,4                                         | MPa    |
| 45                        | 1                        | 531,2                          | 869,9                                          | MPa    |
| 45                        | 0,1                      | 276,8                          | 351,7                                          | MPa    |
| 45                        | 0,01                     | 199,8                          | 202,3                                          | MPa    |

3.3 Korelasi Modulus Resilien dan Modulus Dinamis

Mengingat temperatur dan frekwensi pengujian untuk modulus resilien dan modulus dinamis tidak sama, maka perlu dilakukan penyesuaian nilai modulus dinamis. **Tabel 6** dan **Tabel 7** memperlihatkan parameter persamaan sigmoidal modulus dinamis untuk menyesuaikan temperatur referensi dengan temperatur pengujian seperti pada pengujian modulus resilien. Selanjutnya dengan parameter yang telah disesuaikan tersebut, dihitung kembali nilai modulus dinamis. Persamaan sigmoidal master curve modulus dinamis tersebut adalah sebagai berikut:

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{(\log(|E^*|_{\max}) - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \log f_r}} \quad (7)$$

dimana :

- |E\*| = modulus dinamis, ksi
- |E\*|<sub>max</sub> = nilai maksimum modulus, ksi
- f<sub>r</sub> = pengurangan frekwensi (*reduced frequency*), Hz
- δ, β, γ = konstanta persamaan sigmoidal

Pengurangan frekwensi (*reduced frequency*) dapat dihitung dengan persamaan Arrhenius :

$$\text{Log } f_r = \log f + \frac{\Delta E}{19,14714} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (8)$$

dimana:

- T = frekwensi pembebanan
- T = temperatur referensi, °K
- T<sub>r</sub> = temperatur pengujian, °K
- ΔE = *activation energy* (konstanta)

Nilai E\*<sub>max</sub> dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Hirsch (Christensen et. al., 2003) dengan membatasi nilai maksimum aspal adalah 1 GPa atau 145,000 psi, yaitu:

$$E^* = P \left[ 4.200.000 \left( 1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G^* \left( \frac{VFB \times VMA}{10.000} \right) \right] + \frac{\left( \frac{1 - VMA}{100} \right) + \frac{VMA}{4.200.000 + 3 |G^* |VFB}}{1 - P} \quad (9)$$

dimana:

$$P = \frac{\left( 20 + \frac{3 |G^* |VFB}{VMA} \right)^{0,58}}{650 + \left( \frac{3 |G^* |VFB}{VMA} \right)^{0,58}}$$

- |E\*| = modulus dinamis campuran beraspal, psi
- |G\*| = modulus dinamis aspal, psi
- VMA = rongga dalam mineral agregat (*Voids in mineral aggregates*), %
- VFB = rongga yang terisi aspal (*Voids filled with asphalt*), %

Dengan menggunakan program komputer (*microsoft excell - master solver*), diperoleh parameter seperti pada **Tabel 6** dan **Tabel 7**.

Berdasarkan data pengujian modulus dinamis dengan alat AMPT (*asphalt mixture performance tester*) seperti ditunjukkan pada **Table 5**, dapat dibuat persamaan master curve modulus dinamis.

Persamaan tersebut akan berbeda untuk masing-masing temperature referensi, seperti yang ditunjukkan dalam **Persamaan 8**. Umumnya temperature referensi yang digunakan adalah 20 °C, namun dalam penelitian ini dibuat berbeda untuk mengikuti temperatur pengujian modulus resilien.

Dengan persamaan master curve modulus dinamis untuk masing-masing temperatur referensi maka dapat dihitung perkiraan modulus dinamis untuk masing-masing temperatur dan frekwensi pengujian seperti diperlihatkan pada **Tabel 6** dan **Tabel 7**.

**Tabel 6. Penyesuaian Modulus Dinamis SMA**

| Temperatur °C |           | Frekwensi (Hz) |                    | Konstanta |         |         | Perkiraan  E* |      |
|---------------|-----------|----------------|--------------------|-----------|---------|---------|---------------|------|
| Referensi     | Pengujian |                | E*  <sub>max</sub> | δ         | β       | γ       | ΔE            | Mpa  |
| 15            | 15        | 1,333          | 3266,4             | 19,6      | -1,2205 | -0,8488 | 150704        | 7701 |
| 15            | 15        | 0,333          | 3266,4             | 19,6      | -1,2205 | -0,8488 | 150704        | 4670 |
| 35            | 35        | 1,333          | 3266,4             | 19,6      | 0,2838  | -0,8488 | 150704        | 1390 |
| 35            | 35        | 0,333          | 3266,4             | 19,6      | 0,2838  | -0,8488 | 150704        | 744  |
| 45            | 45        | 1,333          | 3266,4             | 19,6      | 0,9651  | -0,8488 | 150704        | 619  |
| 45            | 45        | 0,333          | 3266,4             | 19,6      | 0,9651  | -0,8488 | 150704        | 379  |

**Tabel 7. Penyesuaian Modulus Dinamis SMAB**

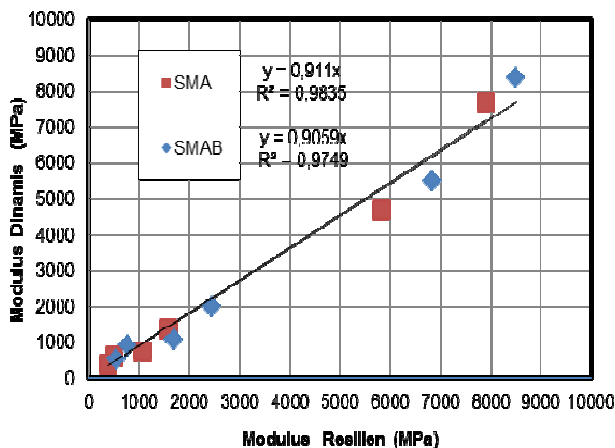
| Temperatur °C |           | Frekwensi (Hz) |                    | Konstanta |         |         | Perkiraan  E* |      |
|---------------|-----------|----------------|--------------------|-----------|---------|---------|---------------|------|
| Referensi     | Pengujian |                | E*  <sub>max</sub> | δ         | β       | γ       | ΔE            | Mpa  |
| 15            | 15        | 1,333          | 3233,3             | 15,9      | -1,3936 | -0,7691 | 144444        | 8385 |
| 15            | 15        | 0,333          | 3233,3             | 15,9      | -1,3936 | -0,7691 | 144444        | 5486 |
| 35            | 35        | 1,333          | 3233,3             | 15,9      | -0,0872 | -0,7691 | 144444        | 1992 |
| 35            | 35        | 0,333          | 3233,3             | 15,9      | -0,0872 | -0,7691 | 144444        | 1080 |
| 45            | 45        | 1,333          | 3233,3             | 15,9      | 0,5047  | -0,7691 | 144444        | 915  |
| 45            | 45        | 0,333          | 3233,3             | 15,9      | 0,5047  | -0,7691 | 144444        | 525  |

Hasil tersebut menunjukkan pengujian dengan alat AMPT memberikan keunggulan yang lebih, karena dapat digunakan untuk membuat *master curve* modulus dinamis. Dengan tersedianya *master curve* maka dapat dihitung nilai modulus dinamis pada frekwensi pembebanan dan temperatur yang diinginkan.

**Gambar 2** memperlihatkan korelasi antara modulus dinamis dengan modulus resilien pada kondisi frekwensi pembebanan dan temperatur yang sama.

Dari **Gambar 2** terlihat korelasi antara modulus resilien dengan modulus dinamis cukup baik, dimana nilai modulus dinamis sekitar 0,91 dari modulus resilien dengan  $R^2$  sekitar 0,97.

Garis persamaan untuk SMA dan SMAB berhimpit, yang menunjukkan korelasi antara modulus resilien dengan modulus dinamis relatif tidak dipengaruhi oleh karakteristik SMA yang digunakan.



**Gambar 2. Hubungan Modulus Dinamis dengan Modulus Resilien**

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan, diperoleh beberapa kesimpulan seperti disampaikan berikut ini.

1. Penambahan asbuton butir LGA sebanyak 7,5 % dapat mencegah *draindown* aspal tidak melewati batas persyaratan. Hal ini menunjukkan *draindown* aspal dapat dicegah dengan menggunakan *binder absorbers* yaitu dengan serat selulosa atau dengan menggunakan *viscosity boosters* yaitu dengan asbuton.
2. Nilai modulus resilien dan modulus dinamis akan berkurang apabila temperatur pengujian bertambah. Sementara dengan turunnya frekwensi pembebanan maka nilai modulus resilien dan modulus dinamis akan menurun juga.

3. Korelasi antara modulus dinamis dengan modulus resilien pada kondisi frekwensi pembebanan dan temperatur yang sama cukup baik dengan  $R^2 = 0,97$  dimana nilai modulus dinamis sekitar 0,9 dari nilai modulus resilien.

#### Daftar Pustaka

Affandi, F., 2012, *The Performance of Bituminous Mixes Using Indonesia Natural Asphalt*, Perth, Australia: Proceeding of 25<sup>th</sup> ARRB Conference.

Blazejowski, K., 2011, *Stone Matrix Asphalt Theory and Practice*, <http://www.crcpress.com>, Download (diturunkan/diunduh) pada 5 Desember 2012.

Bonaquist, R., Christensen, D.W., 2005, *A Practical Procedure for Developing Dynamic Modulus Master Curve for Pavement Structural Design*, Washington DC: 84<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Paper No. 05-0389.

Brown, E.R., Mallick, Haddock, J., Bukowski, J., 1997, *Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) in The United States*, NCAT Report No. 97-1, Alabama: National Center for Asphalt Technology, Auburn University.

Christensen, D.W., Pellinen, T.K., Bonaquist, R.F. 2003, Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies*, Volume 72, Lexington

Huang Y.H., 2004, *Pavement Analysis and Design*, New Jersey, USA: Prentice Hall, Second Edition.

Pellinen, T.K., Witczak, M.W., 2002, Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic Modulus, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies*, Vo. 71

Shell, 2003, *The Shell Bitumen Handbook (fifth edition)*, Shell, UK National

Yoder, E.J., Witczak, M.W., 1975, *Principles of Pavement Design*, J. Wiley and Sons, Inc, second edition.

