

**ANALISIS KOMPARASI HASIL UJI LABORATORIUM DENGAN PEMODELAN
PRONY SERIES ASPAL BETON****Arief Fath Atiya***Arief Fath Atiya, Universitas Sains dan Teknologi Jayapura, arief.ustj@gmail.com***ABSTRAK**

Aspal beton adalah salah satu tipe lapisan perkerasan lentur yang dimana pada proses pembuatannya ada koordinasi antara bahan penyusun yaitu, agregat kasar, agregat halus dan juga aspal. Aspal sendiri adalah material yang bersifat viskoelastik dimana akan mencair ketika dipanaskan dan mengeras ketika didinginkan. Dari sifat tersebut dapat dikatakan bahwa temperatur sangat berpengaruh pada perkerasan aspal pada khususnya dan pasti juga berdampak pada campuran aspal beton pada umumnya. Selain itu adanya sifat elastic juga berdampak pada perubahan bentuk aspal pada kondisi beban yang berbeda. Ketika beban yang diberikan lebih dari ambang batas elastis aspal, maka pada akhirnya akan memasuki fase plastis dimana aspal tidak akan kembali ke bentuk semula sbm diberikan beban. Hal inilah yang menjadi salah satu penyebab mengapa jalan saat ini sering mengalami kerusakan.

Untuk mengetahui kerusakan jalan secara menyeluruh perlu dilakukan penelitian jangka panjang yang mana memerlukan waktu yang lama dan juga biaya yang tidak kecil, sehingga dalam beberapa tahun terakhir telah dilakukan berbagai macam simulasi dan pemodelan yang bertujuan untuk mendapatkan spectrum perkembangan kerusakan jalan dalam waktu yang lebih singkat. Salah satunya pemodelan yang ada adalah dengan pengaplikasian model *Prony Series* yang menggunakan keofisien *Prony Series* untuk fitting data uji laboratorium dan pemodelan viskoelastik material. Untuk penelitian ini diharapkan dapat mendapatkan jumlah nilai *Prony Series* yang paling efisien agar menghasilkan fitting hasil uji laboratorium yang paling mendekati pemodelan *Prony Series*.

Dari hasil penelitian, didapatkan kesimpulan bahwa dengan menggunakan lebih banyak mengimplementasikan keofisien *Prony Series* ke dalam pemodelan, akan didapatkan hasil fitting yang lebih smooth atau memiliki tren error yang lebih kecil dibandingkan penggunaan keofisien yang lebih sedikit.

Kata kunci: *Aspal beton, Viskoelastis, Prony Series*

1. PENDAHULUAN

Aspal beton adalah sebuah campuran material yang unik. Pada proses pembuatannya ada koordinasi antara bahan penyusun yaitu, agregat kasar, agregat halus dan juga aspal. Dengan adanya koordinasi tersebut akan didapatkan sebuah lapis permukaan jalan yang dapat menahan beban kendaraan yang melintas di atasnya dengan tentu saja bantuan lapisan pondasi dan tanah dasar di bawahnya (Sukirman, 1999). Aspal beton adalah lapisan teratas dari sebuah jalan raya yang mana menjadi lapisan yang paling terdampak dari apapun perubahan yang terjadi di atasnya, baik itu cuaca yang berpengaruh dengan adanya aliran air permukaan, perubahan volume dan berat kendaraan, dan juga perubahan karena umur penggunaan.

Aspal adalah material yang berasal dari hasil penyulingan minyak bumi dimana salah satu unsur pembentuknya adalah karbon (The Blue Book–Building & Construction, 2010). Karbon sendiri adalah sebuah unsur kimia yang sangat mudah teroksidasi ketika berhubungan langsung dengan oksigen. Sehingga ketika aspal pada campuran aspal beton mengalami oksidasi, maka sebuah

proses penuaan aspal beton (*asphalt aging*) juga akan terjadi. Selain itu, temperatur dan beban juga menjadi salah satu faktor yang ikut memengaruhi *asphalt aging*.

Untuk melihat perubahan akibat *asphalt aging* terhadap aspal beton perlu penelitian dengan durasi yang panjang karena efek dari kondisi ini tidak sama besarnya dengan kerusakan yang ditimbulkan oleh air ataupun beban kendaraan yang melintas. Oleh karena itu pemodelan, simulasi laboratorium, dan testing terus dilakukan untuk mendapatkan hasil dari kondisi real dilapangan dengan waktu yang lebih singkat. *Prony Series* sendiri adalah sebuah term yang menghubungkan antara pemodelan viskoelastik dan simulasi di laboratorium. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat mengetahui jumlah bilangan *Prony Series* yang ideal untuk jenis material aspal beton sehingga kedepannya dapat lebih mudah dalam menentukan seberapa banyak keefisien *Prony Series* yang harus digunakan untuk material aspal beton.

2. TINJAUAN PUSTAKA

ASPAL BETON

Aspal beton adalah lapis permukaan perkerasan yang biasa digunakan untuk perkerasan lentur.. Fungsi dari lapis permukaan adalah sebagai penerima beban utama kendaraan yang kemudian juga akan disalurkan kelapisan pondasi dan tanah dasar yang seharusnya sudah lebih kecil dari daya dukung tanah dasarnya. Ketebalan lapis aspal beton sangat bergantung dengan seberapa banyak beban kendaraan yang direncanakan. Semakin banyak beban kendaraan yang akan melalui jalan tersebut maka akan semakin tebal lapis permukaannya. Begitu juga halnya dengan tebal lapisan dibawahnya dimana juga sangat bergantung terhadap beban rencana.

Lapisan aspal beton terdiri dari aspal sebagai perekat, filler, agregat kasar dan agregat halus yang tercampur secara homogen. Agregat kasar adalah kerikil atau batu pecah yang diperoleh dari stone crusher dan mempunyai ukuran buitr antara 4.76 mm hingga 40 mm (SNI 1970-2008, 2008). Sedangkan untuk agregat halus adalah agregat dengan ukuran butir maksimum 4.76 mm dan dapat berasal dari hasil alam atau olahan stone crusher (SNI 03-6820-2002,2002). Aspal berasal dari hasil bumi atau olahan industri minyak bumi. Aspal memiliki sifat visco-elastic dan tergantung dari waktu pembebanan. Aspal akan mengeras jika didinginkan dan akan mencair jika dipanaskan. Senyawa yang terkandung dalam aspal yaitu 80% karbon, 10% hidrogen, 6% belerang dan sisanya nitrogen dan oksigen.

ELASTISITAS MATERIAL

Material dengan bahan jenis dasar polimer seperti aspal akan mengalami perubahan elastis ketika diberi beban tarik ataupun tekan. Perubahan elastis tersebut dapat kembali ke bentuk semula ketika beban dihilangkan. Ketika tegangan dan regangan masih dalam batas yang kecil, kurva yang akan terbentuk akibat keduanya adalah kurva linier dan hubungan keduanya dapat didiskripsikan dengan Hukum Hook. Keefisien yang mempengaruhi besarnya perubahan tersebut adalah young modulus dimana makin tinggi nilai young modulus suatu material maka makin banyak kebutuhan tegangan untuk mendapatkan banyaknya regangan yang diinginkan. Persamaan yang digunakan untuk mendiskripsikan young modulus adalah seperti pada Rumus 1 dibawah ini.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

Dimana E adalah modulus elastisitas, σ adalah tegangan dan ϵ adalah regangan.

MODEL PRONY SERIES

Prony Series model sudah dikenal secara luas penggunaannya untuk pemodelan material yang memiliki sifat viskoelastik seperti aspal beton. Dengan adanya pemodelan ini, peneliti dapat memprediksi parameter material viskoelastik. Persamaan untuk model *Prony Series* yang paling umum digunakan adalah seperti pada Rumus 2.

$$\sum_{i=0}^N \alpha_i e^{\frac{-t}{\tau_i}} \quad (2)$$

Untuk beton aspal, model *Prony Series* digunakan untuk fitting dynamic modulus hasil uji laboratorium untuk mendapatkan parameter viskoelastik dari sampel yang diuji. Kemudian dengan menggunakan parameter yang ada, perubahan tingkah laku sampel uji dapat diprediksi.

3. METODE PENELITIAN

MATERIAL

Material yang digunakan adalah ready mix aspal beton modifikasi dengan ukuran agregat maksimal 19 mm dengan gradasi seperti pada Tabel 1. Selain itu untuk mendapatkan sifat fisik dari agregat, dilakukan juga *abbration test*, *sand equivalent test* dan *soundness test* sesuai dengan standard yang ada. Aspal yang digunakan adalah aspal polimer modifikasi tipe III. Uji viskositas menggunakan Brookfield HBDV-II+ dilakukan untuk mendapatkan nilai viskositas aspal di setiap temperatur dengan hasil seperti pada Tabel 2. Hasil campuran aspal beton yang digunakan juga memenuhi spesifikasi standar seperti pada Tabel 3.

Tabel 1. Gradasi Agregat Aspal Beton

Ukuran Saringan		Persen Lolos (%)	
		JMF	Standar
25.0 mm	1-inch	100	100
19.0 mm	0.75-inch	98	90~100
12.5 mm	0.5-inch	83	-
9.5 mm	0.375-inch	74	56~80
4.75 mm	No.4	48	35~65
2.36 mm	No.8	33	23~49
1.18 mm	No.16	25	-
600 µm	No.30	19	-
300 µm	No.50	13	5~9
150 µm	No.100	8	-
75 µm	No.200	4.9	2~8

Tabel 2. Viskositas Aspal

Temp (°C)	Model Rotor	Kecepatan putaran (rpm)	Harga Torsi (%)	Visksositas	
				CP	Poise
160	SC4-18	75	20.2	689	6.89
180			9.3	317	3.17
200			4.9	167	1.67

Tabel 3. Sifat Fisis Aspal Beton

Pengujian	Hasil Uji	Standar
Binder Content (%)	4.7	-
Maximum Specific Gravity (Gmm)	2.467	-
Bulk Specific Gravity (Gmb)	2.379	-
Density (kg/m ³)	2379	-
Stability (lbf)	5120	≥2700 lbf
Air Void (%)	4	3~5
Voids in Mineral Aggregate (VMA, %)	13.1	≥12.7

Persiapan Sampel

Untuk membuat sampel aspal beton yang mendekati kondisi lapangan, maka digunakan Superpave Gyratory Compactor (SGC) untuk pengaplikasian tekanannya. Sampel hasil dari SGC kemudian akan di coring serta dipotong dengan diameter 101.6 mm dan tinggi 12.4 mm sesuai dengan ketentuan dari AASHTO T312. Sampel akan dibuat sebanyak 3 buah untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.



Gambar 1. Superpave Gyratory Compactor (SGC)



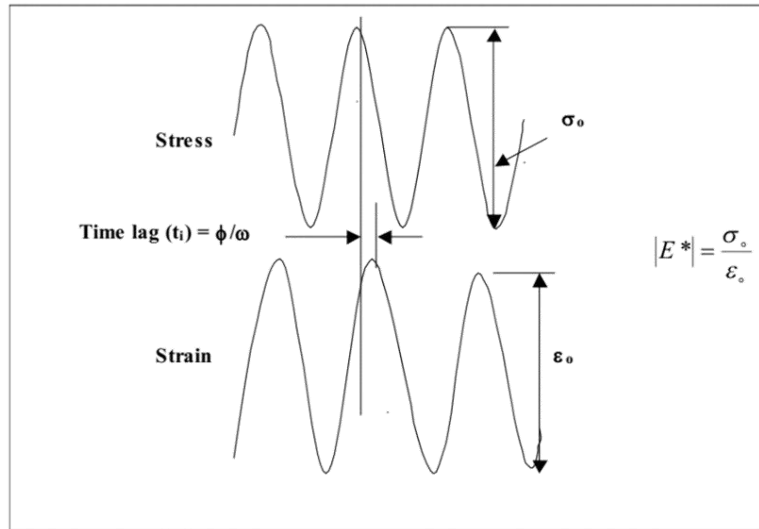
Gambar 2. Sampel setelah coring dan pemotongan

Uji Laboratorium (*Dynamic Modulus Test*)

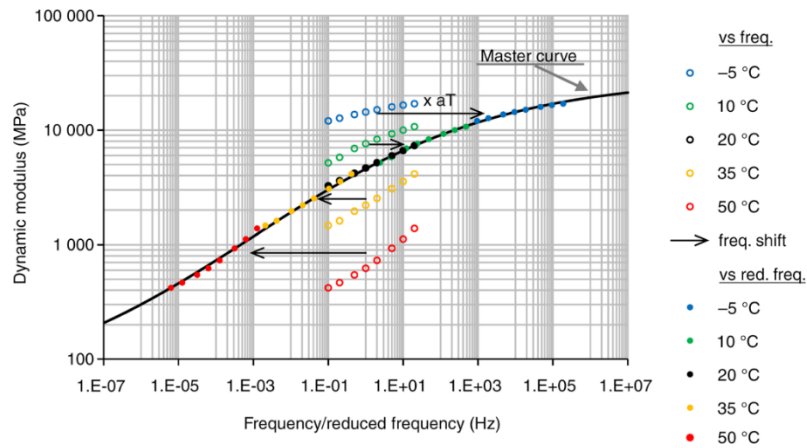
Sampel yang telah disiapkan kemudian di tes menggunakan *Material Testing System* (MTS) (Gambar 3) dan 4 *Linear Variable Different Transformer* (LVDT). Tes akan dilakukan pada 4 temperatur (15°C , 25°C , 40°C , 55°C) dan 6 frekuensi beban (25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1 Hz) pada setiap temperatur. Selain dua alat diatas, oven bertemperatur dan termometer juga digunakan selama pengujian untuk mengontrol temperatur ruang uji. Tekanan (stress) dikontrol sehingga harus berbentuk sinusoidal. Regangan (strain) aksial juga di kontrol diantara $50\sim 150\ \mu\epsilon$ dan dipertahankan dibawah $1500\ \mu\epsilon$ guna menghindari deformasi permanen (Kennedy et al., 2001).. Tipikal stress dan strain untuk uji modulus elastisitas dinamis dapat dilihat pada Gambar 4 dan begitu juga tipikal data hasil uji menggunakan setting diatas dapat dilihat pada Gambar 5. Tujuan akhir dari uji diatas adalah untuk mendapatkan 2 paramater viskoelastik yaitu dynamic modulus (E^*) dan *phase angle* (ϕ) yang digunakan untuk mendiskripsikan sifat viskos dan elastik dari campuran aspal beton (Findley et al., 1989) (Pellinen & Witczak, 2002).



Gambar 3. Material Testing System



Gambar 4. Contoh Regangan akibat Tegangan Sinusoidal



Gambar 5. Contoh Kurva Master Modulus Elastisitas Dinamis Aspal Beton

PEMODELAN PERILAKU VISKOELASTIK ASPAL BETON

Time – temperature shift factor

Hasil dari dynamic modulus test adalah modulus elastisitas dinamis (E^*) dan *phase angle* (θ) pada beberapa frekuensi dan temperatur suatu sampel. Data yang didapatkan kemudian dikonversi ke *complex creep compliance* (D^*) menggunakan Rumus 3 dan Rumus 4. *Time-temperature shift factor* kemudian dapat dicari menggunakan Rumus 5.

$$|D^*| = \frac{1}{|E^*|} \tag{3}$$

$$|D^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp[\beta + \gamma \log(\omega_r)]} \quad (4)$$

Dimana :

$|D^*|$ = complex creep compliance

δ = harga maksimum dari *dynamic compliance*

$\delta + \alpha$ = harga minimum dari *dynamic compliance*

$\beta + \gamma$ = *shape parameters*

ω_r = frekuensi yang direduksi

$$a_T = \frac{\omega_r}{\omega} \quad (5)$$

Dimana ω adalah frekuensi dan a_T adalah the *time-temperature shift factor*

Identifikasi Parameter Viskoelastik Aspal Beton

Secara umum total regangan (strain) dari aspal beton dapat dibagi menjadi dua yaitu regangan yang tertahan (storage compliance / D'_{exp}) dan regangan yang hilang (loss compliance / D''_{exp}). Kedua data diatas didapatkan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$D'_{exp} = |D^*| \cos \theta ; \quad D''_{exp} = |D^*| \sin \theta, \quad (6)$$

Menggunakan *Prony Series*, storage dan loss compliance yang didapatkan dari pemodelan akan dikoneksikan dengan hasil yang didapatkan dari pengujian (Rumus 6 dan Rumus 7) dengan cara memperkecil kesalahan (*error*) diantara keduanya menggunakan Rumus 8.

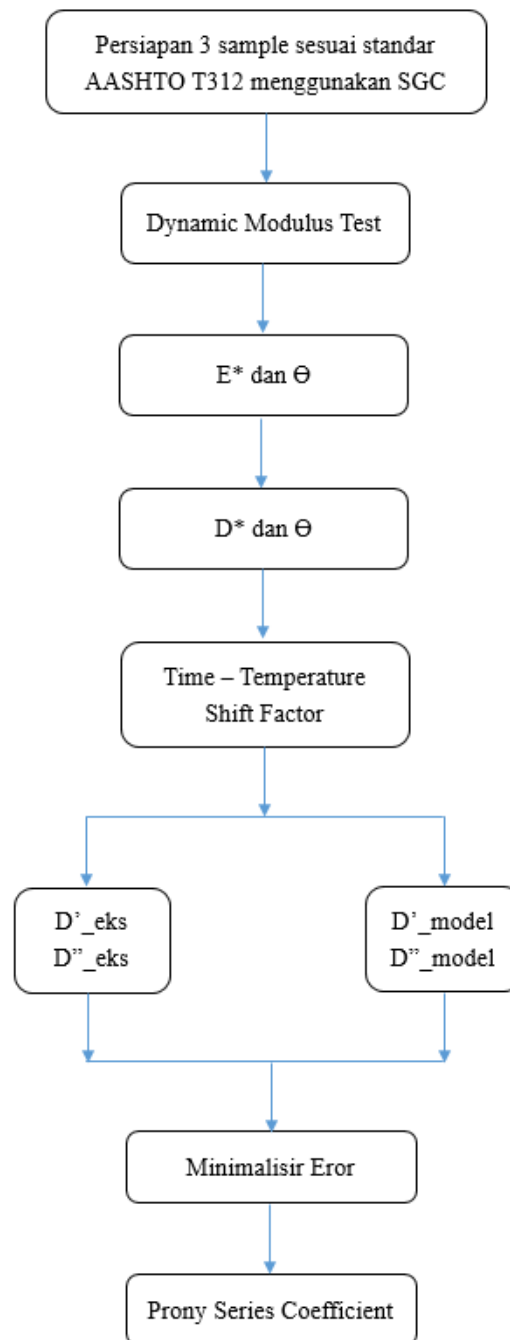
$$D'_{model} = D_0 + \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} ; \quad D''_{model} = \sum_{i=1}^N \frac{D_i \omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (7)$$

$$error = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{D'_{fit}}{D'_{exp}} - 1 \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{D''_{fit}}{D''_{exp}} - 1 \right) \right]^2 \quad (8)$$

Dimana N adalah jumlah koefisien *Prony Series* yang dapat diasumsikan mulai dari 0 hingga 9, M adalah total data yang tersedia, τ_n adalah $1/\lambda$, D_n adalah koefisien *Prony Series* ke nth dan λ_n adalah waktu retardasi. Kemudian *Prony Series* di formulasikan untuk merepresentasikan *creep compliance* dalam fungsi waktu menggunakan Rumus 9.

$$D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^N D_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (9)$$

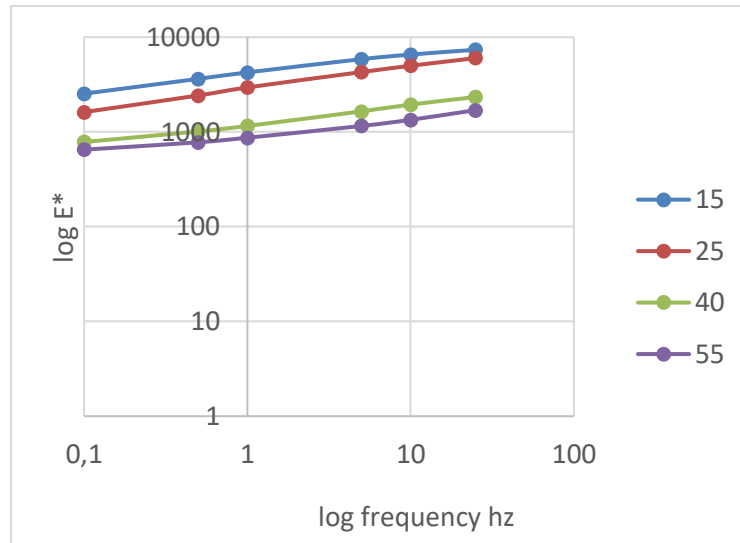
Berikut adalah flowchart dari metode untuk mendapatkan koefisien *Prony Series* yang dibutuhkan.



Gambar 6. Flowchart Penelitian

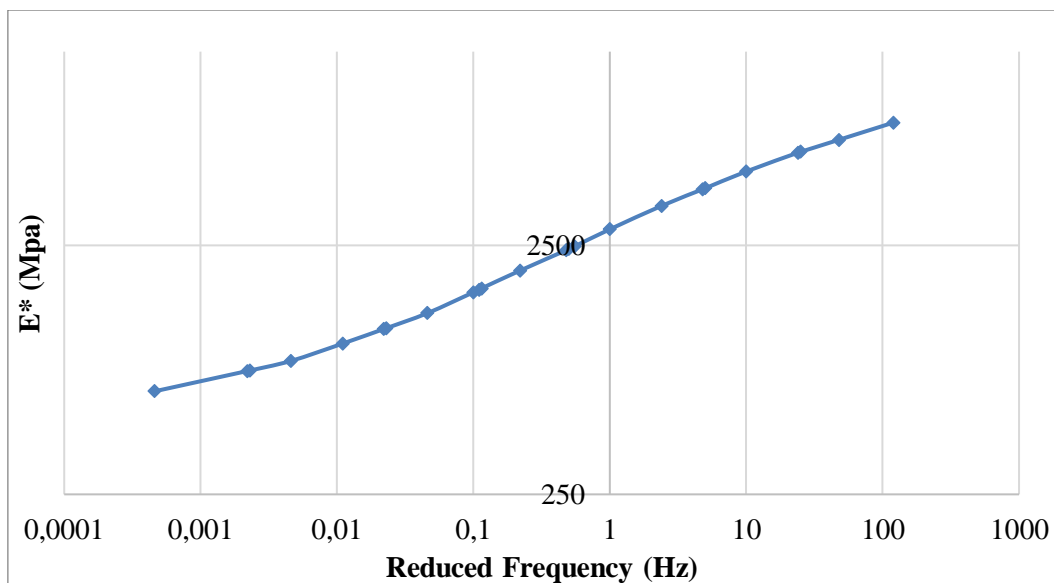
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari uji modulus elastisitas dinamis menggunakan MTS didapatkan data modulus elastisitas sampel dalam beberapa temperature dan frekuensi seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Modulus Elastisitas Dinamis pada Beberapa Temperatur dan Frekuensi

Dengan menggunakan prinsip time – temperatur superposisi, Gambar 8 menunjukkan hasil dari Modulus Elastisitas Dinamis (Mpa) master curve dari sampel yang diuji dalam setiap frequency (Hz) di temperature 25°C. Dengan menggunakan metode iterasi untuk meminimalisir error antara data eksperimen (Rumus 6) dan pemodelan (Rumus 7), maka koefisien Prony Series akan didapatkan.



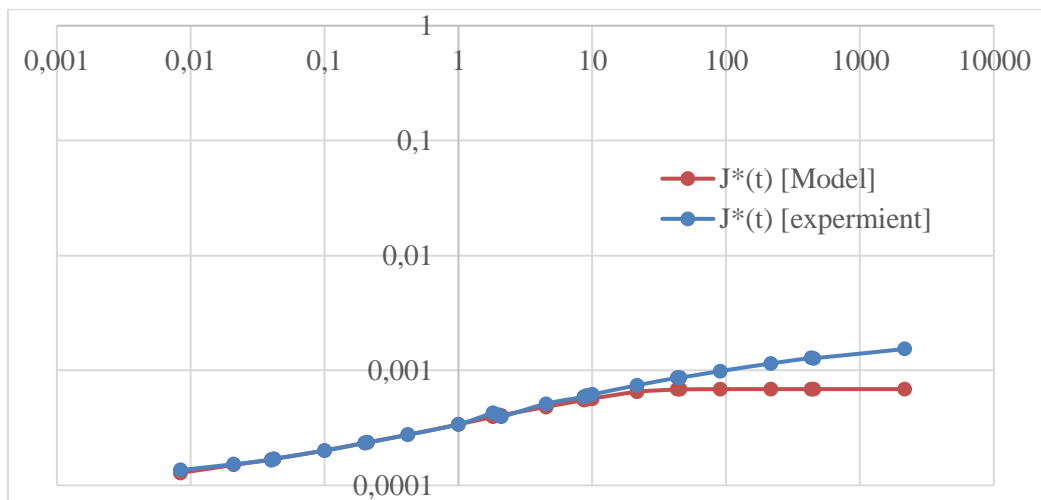
Gambar 8. Kurva Master Modulus Elastisitas Dinamis

Dari hasil perhitungan yang dilakukan, didapatkan hasil yang menunjukkan bahwa dengan menggunakan lebih banyak data / koefisien *Prony Series* untuk proses fitting, maka *error* yang dihasilkan akibat perbandingan antara hasil laboratorium dan hasil pemodelan akan menunjukkan tren *error* yang menurun. Tabel 4 menunjukkan tren *error* yang menurun dari hasil penggunaan lebih banyak koefisien *Prony Series*.

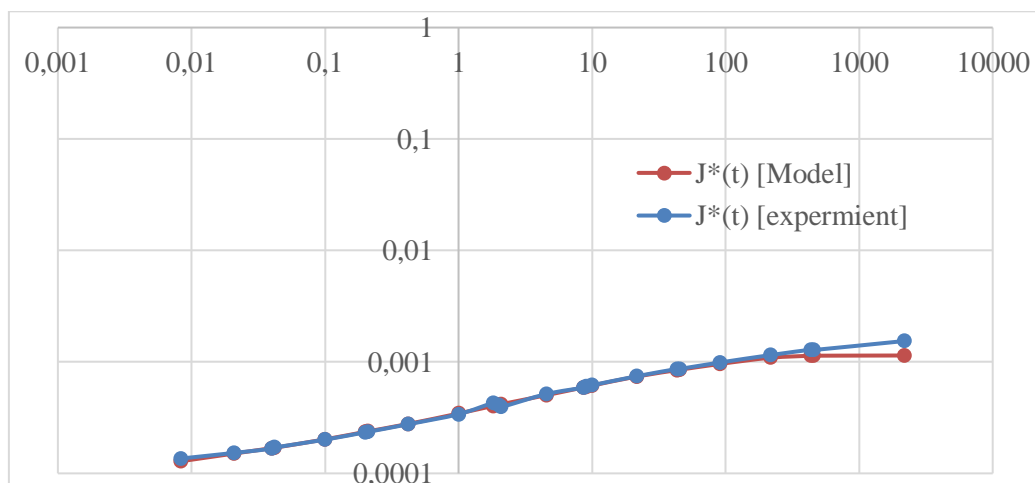
Tabel 4. Tren Error hasil Fitting dengan Beberapa Koefisien

Number of <i>Prony Series</i> Coefficient	Error
5	1.82E-06
6	2.07E-07
7	1.70E-08
8	1.69E-08
9	1.87E-09

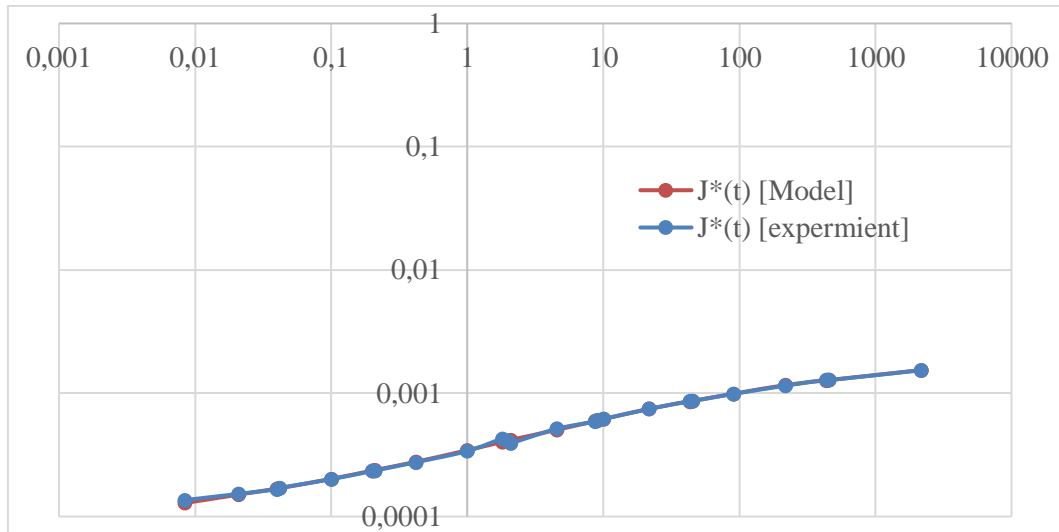
Selain itu peningkatan kualitas hasil fitting juga dapat dilihat pada Gambar 9a untuk penggunaan 5 koefisien, Gambar 9b untuk penggunaan 7 koefisien dan Gambar 9c untuk penggunaan 9 koefisien. Untuk aspal beton koefisien *Prony Series* yang digunakan maksimal berjumlah 9 koefisien. Tabel 5 menampilkan hasil koefisien *Prony Series* untuk sample yang sudah diuji.



Gambar 9a. Fitting Hasil Uji Laboratorium dan Model *Prony Series* dengan 5 Koefisien



Gambar 9b. Fitting Hasil Uji Laboratorium dan Model *Prony Series* dengan 7 Koefisien



Gambar 9c. Fitting Hasil Uji Laboratorium dan Model *Prony Series* dengan 9 Koefisien

Tabel 5. Nilai Koefisien *Prony Series*

τ_n (sec)	D_n (1/MPa)
	4.24E-05
0.001	5.71E-05
0.01	3.82E-05
0.1	7.20E-05
1	1.57E-04
10	3.21E-04
100	4.53E-04
1000	3.18E-04
10000	1.00E-06
100000	5.50E-03

5. PENUTUP

Dari hasil analisis dan pembahasan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa penggunaan lebih banyak koefisien Prony Series dapat meningkatkan kehalusan atau keakuratan data hasil uji laboratorium terhadap pemodelan Prony Series untuk material viskoelastik seperti aspal beton.

Untuk penelitian lebih lanjut perlu juga dilakukan uji Dynamic Shear Recovery Test untuk aspal, sehingga akan didapatkan juga hasil dari yang dapat membuktikan bahwa penggunaan lebih banyak koefisien Prony Series akan berpengaruh juga terhadap bahan aspal.

6. DAFTAR PUSTAKA

Badan Standarisasi Nasional 2008. SNI 1970-2008 : Cara Uji Berat Jenis Dan Penyerapan Air Agregat Halus

Badan Standarisasi Nasional 2002. SNI 03 – 6820 – 2002: Spesifikasi Agregat Halus Untuk Pekerjaan Adukan Dan Plesteran Dengan Bahan Dasar Semen

Contractors Register. (2010). The Blue book building and construction. Jefferson Valley, N.Y.

Findley, W. N., Lai, J. S., Onaran, K., & Christensen, R. M. (1977). Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials with an introduction to linear viscoelasticity. *Journal of Applied Mechanics*, 44, 364.

Pellinen, T. K., & Witczak, M. W. (2002). Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 71.

Robert, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials. Mixture Design, and Construction*, NAPA Education Foundation, Second Edition, Lanham, Maryland.

Sukirman, Silvia, 1999, *Perkerasan Lentur Jalan Raya*, Penerbit Nova, Bandung

Sukirman, S., 2003. *Perkerasan Jalan Raya*. Bandung: NOVA.