

Analisis *Master Curves* pada Aspal Pen 60/70 dengan Penambahan Bahan Campur Plastik *Polyethylene Terephthalate* (PET) Olahan

A.A. Permana^{1*}, H. Rahman¹, N. Zain¹

¹Program Studi Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya, Institut Teknologi Bandung, Bandung, INDONESIA

*Corresponding author: angga.ap21@gmail.com

INTISARI

Perkerasan aspal adalah perkerasan yang paling sering digunakan di Indonesia. Aspal sebagai komponen utama memiliki sifat viskoelastis yang mempengaruhi sifat reologi, terutama kekakuan dan ketahanan termal, yang penting dalam menahan beban lalu lintas dan suhu. Modifikasi aspal dilakukan untuk meningkatkan kinerjanya, salah satunya dengan menambahkan polimer. Terdapat beberapa aditif polimer hasil olahan limbah plastik *polyethylene terephthalate* (PET) salah satunya newtlac, yang dapat meningkatkan kinerja aspal, khususnya ketahanan terhadap deformasi permanen. Studi bertujuan untuk menyelidiki pengaruh penambahan limbah olahan PET pada aspal Pen 60/70 yang umum digunakan di Indonesia. Evaluasi kinerja aspal dilakukan dengan pengujian reologi dasar (uji aspal konvensional) dan analisis *master curves* dari hasil uji alat *Dynamic Shear Rheometer* (DSR). Dari uji reologi dasar, penambahan PET meningkatkan kekerasan aspal dan ketahanan terhadap suhu dengan naiknya nilai Indeks Penetrasi (IP). Sedangkan hasil analisis *master curves* terlihat peningkatan nilai *Complex Shear Modulus* (G^*) seiring dengan peningkatan kadar PET, sehingga aspal memiliki nilai modulus yang lebih tinggi dan meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan deformasi permanen. Uji lebih lanjut pada *rutting* dan *fatigue* direkomendasikan untuk memahami pengaruh PET - newtlac pada campuran aspal dan agregat.

Kata kunci: *polyethylene terephthalate*, aspal, polimer, *dynamic shear rheometer*, DSR, *master curves*

1 PENDAHULUAN

Jenis Perkerasan yang umum digunakan di Indonesia sebagai permukaan jalan adalah perkerasan aspal. Perkerasan aspal terdiri dari agregat kasar dan halus, pengisi (*filler*), dan aspal yang merupakan komponen utama karena memiliki sifat viskoelastis. Campuran Aspal tergantung dari kinerja aspal yang membentuknya yang memiliki pengaruh signifikan pada sifat reologi, terutama pada kekakuan dan kerentanan terhadap suhu. Aspal memiliki kapasitas terbatas dalam menahan beban lalu lintas berat direntang suhu tertentu.

Usaha mengatasi masalah tersebut yaitu dengan penggunaan bahan tambahan pada aspal, dimana aspal memiliki fleksibilitas untuk memungkinkan penambahan bahan lain sebagai aditif untuk meningkatkan kinerja (Francken, 1998). Salah satu produk aditif aspal adalah PET – newtlac yang dikembangkan oleh *Kao Specialties Americas LLC* (KSA) (anak perusahaan dari *Kao Corporation*). Newtlac adalah bahan aditif / modifikasi aspal berjenis polimer yang terbuat dari plastik *polyethylene terephthalate* (PET) hasil limbah yang diolah secara kimiawi. Bahan campur ini dapat meningkatkan nilai modulus kekakuan, sehingga memberikan ketahanan terhadap deformasi permanen untuk memperpanjang umur jalan dan secara signifikan mengurangi biaya perbaikan dan pemeliharaan.

Reologi adalah ilmu yang mempelajari dan mengevaluasi bagaimana suatu bahan padat mengalir dan bahan cair dapat berubah bentuk pada waktu dan suhu tertentu ketika dikenai gaya (hukum newton dan hukum hooke). Parameter reologi utama adalah modulus geser kompleks yang dapat didefinisikan sebagai resistensi bahan terhadap deformasi dan sudut fasa, yang mewakili selang waktu tertunda antara tegangan yang diberikan dan deformasi yang dihasilkan (Thives dan Trichês, 2020). Uji rheologi dilakukan dengan alat *Dynamic Shear Rheometer* (DSR).

Master curves menggambarkan hubungan antara modulus geser kompleks dengan suhu dan frekuensi pembebanan, dimana modulus kompleks G^* pada sumbu Y dan suhu dan frekuensi pada sumbu X dengan menggunakan prinsip superposisi waktu – suhu. Data uji pada suhu dan frekuensi yang berbeda dapat digeser secara horizontal pada suhu atau frekuensi referensi, untuk membentuk kurva tunggal (Clyne et al, 2003).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sifat reologi aspal dengan berbagai kadar PET – newtlac. Pengujian dilakukan dengan alat DSR, untuk dilakukan analisis *master curves* untuk membandingkan dengan aspal PEN 60/70 sebagai acuan.

2 MATERIAL DAN METODE PENELITIAN

2.1 Material dan Persiapan Pengujian

Material aspal yang digunakan adalah aspal Pen 60/70 yang akan dicampurkan dengan plastik PET – newtlac. Pencampuran dilakukan menggunakan alat *high shear mixer* Silverson dengan berbagai kandungan plastik PET sebesar 0%, 3%, 5%, dan 7% dari berat aspal. Karena suhu titik leleh PET – newtlac adalah 103,5°C, maka dilakukan pencampuran pada suhu 150°C selama 60 menit, dengan kecepatan pencampuran adalah 2000 rpm. Pencampuran dimulai dengan pencampuran lembut pada 700 rpm selama 10 menit pertama untuk memastikan tidak terdapat rongga udara dalam campuran. Setelah itu, kecepatan mixer dinaikkan menjadi 2000 rpm selama 50 menit secara terus-menerus. Gambar alat *mixer* dan proses pencampuran ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alat Mixer Silverson (kiri); Pencampuran Aspal dan PET – Newtlac dengan Menjaga Suhu pada 150°C (kanan).

2.2 Metode Pengujian

Penelitian dilakukan dengan metode penelitian berbasis eksperimen di Laboratorium. Komponen pengujian utama adalah pengujian sifat viskoelastis aspal pen 60/70 yang ditambahkan dengan PET – newtlac pada kadar 3%, 5%, dan 7%, dan dilihat bagaimana pengaruh penambahan PET tersebut dibandingkan dengan aspal pen 60/70. Pengujian aspal dilakukan dengan uji aspal konvensional dan dengan menggunakan DSR *time sweep* untuk melihat respon aspal terhadap suhu dan waktu pembebanan. Pengujian aspal yang dilakukan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengujian pada Aspal.

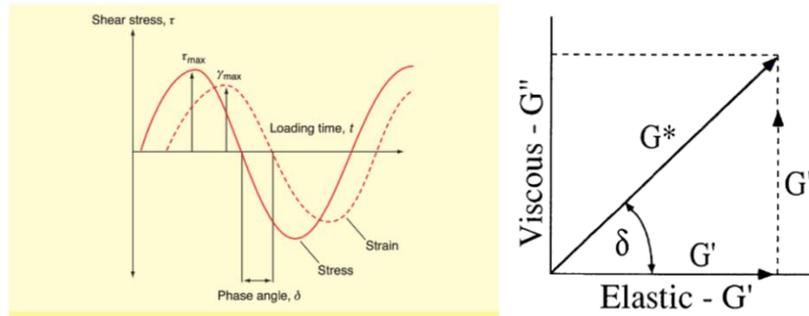
Pengujian	Penggunaan	Prosedur
Uji Penetrasi	SNI 2456 : 2011	25° C, 100 g, 5 detik (0,1 mm)
Viskositas (<i>Brookfield Viscometer</i>)	ASTM D4402 – 87	Pada suhu 135 °C
Titik Lembek, dalam Celcius	SNI 2434 : 2011	≥48
Titik Nyala, dalam Celcius	SNI 2433 : 2011	≥232
Perubahan Berat (%)	AASHTO M 320	≤ 1
Uji DSR <i>frequency sweep</i>	-	20 Hz – 100 Hz (20°C - 70°C)

3 TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Pengujian DSR

Dynamic Shear Rheometer (DSR) digunakan untuk mengukur modulus dan sudut fasa pada pengikat aspal perkerasan pada suhu berkisar dari sekitar 5°C hingga 70°C atau bahkan lebih tinggi. Modulus yang diukur dengan DSR disebut modulus geser dinamis. Magnitudo keseluruhan dari modulus geser dinamis disebut modulus kompleks (G^*), atau "G-bintang". G' (modulus penyimpanan geser) menggambarkan semakin elastis dan kaku materialnya, sedangkan G'' (modulus kehilangan geser) menggambarkan, semakin tinggi viskositas atau karakteristik aliran material. Bahan yang sepenuhnya elastis akan menunjukkan sudut fase yang sama dengan nol, sementara bahan yang bersifat viskos akan menunjukkan sudut sebesar 90° (SHRP, 1994). Sudut fasa ditentukan dari selisih waktu pada tegangan geser diberikan dan regangan geser yang terjadi. Aspal cenderung bersifat elastis ($\delta = 0$) pada suhu dingin

dan bersifat viskos ($\delta = 90^\circ$) pada suhu yang sangat tinggi. Gambar berikut menunjukkan sudut fasa dan parameter pengujian DSR



Gambar 2. Kurva Tegangan dan Regangan Geser pada zat viskoelastis (Shell, 2014) (kiri); Grafik dari komponen-komponen Modulus Geser Kompleks G^* (SHRP, 1994) (kanan).

3.2 Master Curves

Karakteristik reologi aspal dievaluasi dengan mempelajari *master curves* yang memberikan informasi dasar tentang sifat mekanik aspal dalam berbagai suhu dan waktu pembebanan yang beragam. *Master curves* adalah diagram yang menggambarkan hubungan antara modulus kompleks (E^*) pada sumbu Y dengan suhu dan frekuensi pada sumbu X. *Master curves* dibentuk menggunakan prinsip superposisi waktu – suhu / *Time – Temperature Superposition* (TTS) yang memungkinkan data uji pada suhu dan frekuensi yang berbeda digeser secara horizontal terhadap suhu atau frekuensi referensi, sehingga membentuk kurva tunggal (Clyne et al, 2003).

Master curves pada berbagai waktu atau frekuensi dapat digunakan untuk memprediksi efek jangka panjang dari tekanan atau regangan pada berbagai waktu dan suhu (Yao, et al, 2012). Dalam menentukan *shifting factor* dapat diestimasi menggunakan persamaan Williams-Landel-Ferry (WLF) (Hadiwardyo et al, 2020), seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan berikut:

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T-T_d)}{C_2+T-T_d} \tag{1}$$

dimana $\log \alpha_T$ adalah shifting factor, T adalah suhu ($^\circ\text{C}$), dan T_d adalah suhu referensi ($^\circ\text{C}$). C_1 dan C_2 adalah parameter WLF.

Gradien *master curves* yang semakin kecil (kurva semakin landai) mengindikasikan bahwa campuran bitumen tersebut memiliki toleransi yang lebih baik terhadap variasi suhu dan frekuensi pembebanan. Hal ini memungkinkan penggunaan aspal pada rentang suhu dan pembebanan yang lebih lebar.

4 HASIL UJI DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Pengaruh PET - Newtlac

Hasil pengujian sifat fisik aspal PEN 60/70 serta aspal plastic PET – Newtlac dengan pengujian konvensional telah disajikan pada Tabel 2. Hasil pengujian sifat fisik aspal PEN 60/70 dibandingkan dengan aspal campuran plastik PET terlihat tren dari pengaruh plastik PET olahan yang dicampurkan.

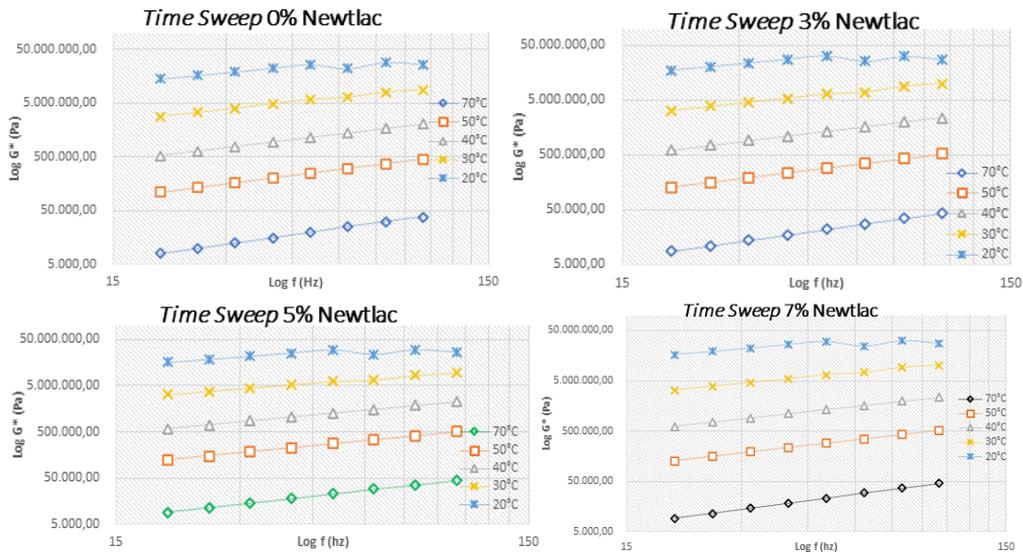
Tabel 2. Hasil Pengujian pada Aspal dengan .

Pengujian	Aspal Pen 60/70			
	0% PET - newtlac	3% PET - newtlac	5% PET - newtlac	7% PET - newtlac
Uji Penetrasi (dmm)	63,5	57	55	54
Viskositas (cSt)	505,71	529,96	550,20	600,10
Titik Lembek, dalam Celcius	48,13	50,68	51,25	51,50
Titik Nyala, dalam Celcius	338	334	332	331
Perubahan Berat (%)	0,23	0,33	0,43	0,22
Berat Jenis	1,034	1,035	1,042	1,045
Indeks Penetrasi (IP)	-1,122	-0,745	-0,681	-0,633

Dengan penambahan PET – newtlac pada aspal PEN 60/70, penurunan nilai penetrasi, peningkatan suhu titik lembek, dan peningkatan nilai Indeks Penetrasi seiring penambahan kadar PET – newtlac, menunjukkan penambahan PET menghasilkan efek pengerasan (penetrasi dan viskositas) dengan peningkatan ketahanan terhadap suhu (titik lembek dan IP). Dimana perubahan sifat ini menguntungkan untuk daerah dengan iklim tropis seperti di Indonesia.

4.2 Uji Time Sweep DSR

Hasil pengujian DSR *time sweep* digambar terhadap parameter yang direduksi (skala log), dimana skala log membantu pengamatan pada rentang nilai yang tinggi sehingga kita dapat melihat perubahan yang signifikan pada kedua ujung spektrum yang dianalisis dan pada perbedaan orde besar dapat direpresentasikan secara proporsional dalam jarak yang lebih kecil di grafik. Berikut hasil pengujian DSR *time sweep*.



Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Time Sweep DSR pada Frekuensi 20 Hz – 100 Hz, pada Suhu 20°C – 70°C

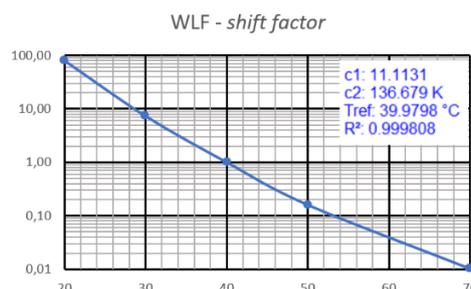
4.3 Master Curves

Dilakukan perhitungan *shift factor* berdasarkan persamaan WLF (1) dan didapat nilai *shift factor* untuk setiap kadar PET - newtlac. Berikut hasil perhitungan *shift factor* pada aspal dengan berbagai kadar PET:

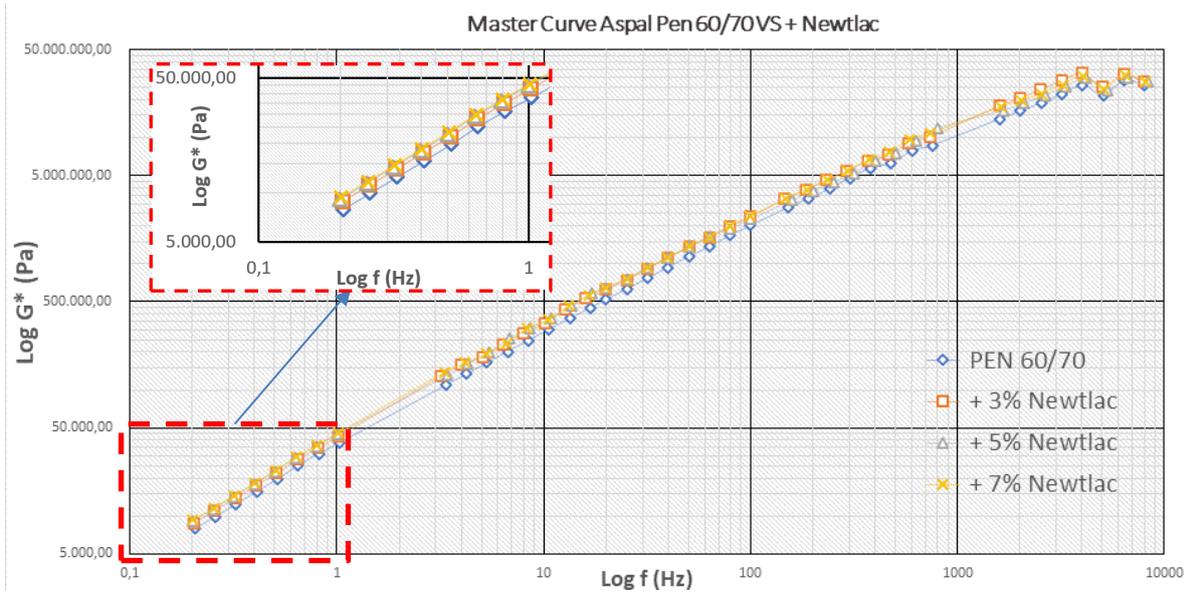
Tabel 3. Shift Factor pada Aspal Berbagai Kadar PET - Newtlac

Suhu	αT (x variable) 0%	αT (x variable) 3%	αT (x variable) 5%	αT (x variable) 7%
20°C	79,91	79,59	83,61	80,64
30°C	7,58	7,31	7,97	7,41
40°C	1,00	1,00	1,00	1,00
50°C	0,17	0,16	0,17	0,17
70°C	0,01	0,01	0,01	0,01

Dari nilai αT dengan suhu referensi 40°C, berdasarkan data dari Grafik *master curves*, bila kita bandingkan aspal setelah dimodifikasi dengan bahan campur PET – newtlac dengan aspal PEN 60/70, didapat perbandingan *master curves* sebagai berikut:

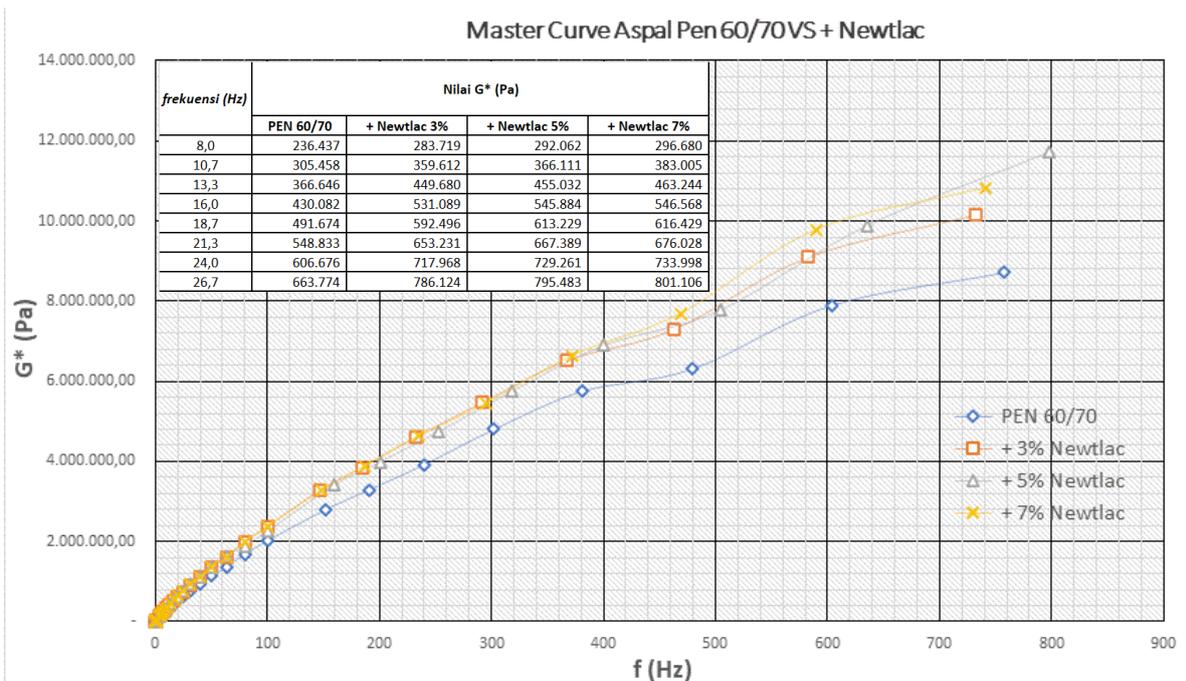


Gambar 4. Grafik Nilai Shift Factor Berdasarkan Persamaan WLF



Gambar 5. Master Curves Aspal pada Berbagai Kadar dengan Suhu Referensi 40°C Skala Log

Pada Gambar 5 menunjukkan tren keseluruhan yang serupa, dimana pada *master curves* aspal PEN 60/70 yang telah dimodifikasi dengan PET – Newtlac, memiliki bentuk grafik yang tetap serupa, namun dengan kenaikan nilai G^* . Artinya, aspal memiliki bentuk respon pada tegangan yang mirip, namun terdapat kenaikan nilai modulus geser kompleks yang konsisten seiring kenaikan kadar PET - newtlac. Kenaikan G^* terlihat semakin tinggi seiring kenaikan kadar PET – newtlac, sehingga material menjadi lebih kaku. Kenaikan G^* artinya terjadi kenaikan yang konsisten pada G' dan G'' sehingga material tersebut memiliki kemampuan yang lebih besar untuk menyimpan energi (G' , *storage modulus*) dan untuk menahan deformasi atau perubahan bentuk (G'' , *loss modulus*). Semakin tinggi G^* , semakin meningkat juga ketahanan material aspal terhadap deformasi dan memiliki respons yang lebih kaku. Skala log digunakan untuk melihat lebih jelas perubahan yang terjadi pada frekuensi yang kecil dimana dengan skala log akan terlihat perbedaan G^* pada ujung spektrum. Untuk melihat lebih jelas kenaikan nilai G^* pada frekuensi tinggi, dapat dilihat *master curves* dengan skala normal pada Gambar 6.



Gambar 6. Master Curves Aspal pada Berbagai Kadar dengan Suhu Referensi 40°C pada Skala Normal dan Tabel Nilai Frekuensi pada frekuensi 8 – 26,7 Hz

Pada skala normal, terlihat lebih jelas kenaikan nilai G^* pada aspal dengan penambahan PET – newtlac pada frekuensi tinggi. Grafik *master curves* menunjukkan adanya kecenderungan kenaikan persentase G^* yang landai ketika aspal sudah dicampur oleh newtlac. Kenaikan G^* dari kadar 0% ke 3% rata – rata adalah 17% - 23%, sedangkan kenaikan dari kadar 3% - 7% rata – rata hanya 2% - 3%. Ini mengindikasikan penambahan kadar PET lebih besar pada aspal 60/70 tidak meningkatkan kekakuan secara signifikan. Adanya kecenderungan ini, dimana penggunaan minimal PET – newtlac menghasilkan peningkatan yang tidak berbeda jauh dengan kadar lebih tinggi dapat diartikan sebagai keuntungan, yaitu dengan penggunaan seminimal mungkin menghasilkan peningkatan kinerja yang tidak berbeda dengan kadar lebih tinggi, sehingga pemilihan penggunaan kadar rendah dapat menekan biaya produksi pada pekerjaan perkerasan nantinya. Namun untuk menjawab lebih lanjut pengaruh dari PET – newtlac, perlu dilakukan uji lanjut terhadap deformasi permanen (*rutting*) dan *fatigue* pada campuran aspal dan agregat.

5 KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, secara umum, penambahan PET – newtlac pada aspal PEN 60/70, secara keseluruhan menghasilkan efek yang konsistensi dalam perubahan sifat reologi aspal, dimana terdapat peningkatan kekerasan aspal dan juga peningkatan daya tahan terhadap suhu yang mana hal ini menguntungkan untuk daerah dengan iklim tropis seperti di Indonesia.

Dari analisis *master curves* yang telah dibuat berdasarkan hasil pengujian, semakin tinggi kadar PET – newtlac, terdapat kenaikan nilai modulus geser kompleks (G^*), yang menunjukkan bahwa material menjadi lebih kaku. Ini berarti material tersebut memiliki kemampuan yang lebih besar untuk menyimpan energi (G' , *storage modulus*) dan untuk menahan deformasi atau perubahan bentuk (G'' , *loss modulus*). Dengan kata lain, semakin tinggi G^* , semakin tahan terhadap deformasi dan memiliki respons yang lebih kaku.

Kenaikan nilai G^* pada aspal dengan penambahan PET – newtlac menunjukkan adanya kecenderungan kenaikan G^* yang landai ketika aspal sudah dicampur oleh PET – newtlac. Kenaikan G^* dari kadar 0% ke 3% rata – rata adalah 17% - 23% dan turun menjadi sekitar 2% - 3% pada kadar selanjutnya, yang mengindikasikan penambahan kadar tidak meningkatkan modulus kekakuan secara signifikan pada penambahan kadar PET – newtlac. Penggunaan minimal akan menghasilkan kinerja yang tidak berbeda jauh dengan penambahan kadar lebih tinggi, sehingga secara penggunaan akan menguntungkan dalam menekan biaya produksi pada pekerjaan perkerasan jalan nantinya.

Perlu dilakukan pengujian lebih lanjut dalam campuran perkerasan, untuk melihat pengaruh dari PET – newtlac yang lebih jelas terhadap deformasi permanen (*rutting*) dan *fatigue* pada campuran aspal dan agregat.

REFERENSI

- SHRP-A-410 (1994) : *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product Of The SHRP Asphalt Research Program*.
- Hunter R. N., Self A., Read J. (2014): *The Shell Bitumen Handbook Sixth Edition*, ICE Publishing, London.
- Thives L. P., Trichês G. (2020). *Rheological Huet-Sayegh Model Applied For Asphalt Rubber*. IJERA.
- 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.
- Rahman, H., & Zega, R. T. (2018). Analisis Kesesuaian Model Modulus Aspal Dan Campuran Laston Lapis Aus Untuk Aspal Modifikasi Asbuton Murni. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Mashaan N. S., Chegenizadeh A., Nikraz H., Rezagholilou A. (2021). *Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer*. ScienceDirect.
- Wang, D., Baliello, A., Poulikakos, L., Vasconcelos, K., Kakar, M. R., Giancontieri, G., Pasquini, E., Porot, L., Tušar, M., Riccardi, C., Pasetto, M., Lo Presti, D., & Cannone Falchetto, A. (2022). *Rheological properties of asphalt binder modified with waste polyethylene: An interlaboratory research from the RILEM TC WMR*. Resources, Conservation and Recycling, 186, [106564].
- Asgharzadeh S. M. (2016). *Modified Asphalt Binders Evaluation Using Rheological Master Curves And Black Diagrams*. ISSN: 2321-9009.
- Hadiwardoyo S. P., Sumabrata R. J., Wahjuningsih N. (2020). *Dynamic Shear Rheometer to Measure the Improvement of Asphalt Properties with the Addition of Buton Natural Asphalt-Rubber (BNA-R)*. IRPHOUSE.
- Timothy R. Clyne, Xinjun Li, Mihai O. Marasteanu, Eugene L. Skok. (2003). *Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures*. NCHRP Projects 1-37A.
- Yao H., You Z., Li L., Goh S. W., Dedene C. (2012). *Evaluation of the Master Curves for Complex Shear Modulus for Nano-modified Asphalt Binders*. CICTP.