

MODULUS KEKAKUAN LENTUR DAN SUDUT FASE CAMPURAN MATERIAL PERKERASAN DAUR ULANG DAN POLIMER ELASTOMER

Novita Pradani
Fakultas Teknik
Universitas Tadulako Palu
`pradaninovita@gmail.com

Ismadarni
Fakultas Teknik
Universitas Tadulako Palu
isma.fatek@gmail.com

Abstract

Pavement Flexural Stiffness Modulus and Phase Angle tend to bend due to over load of vehicle. Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), in this case asphalt recycling will decrease deformation endurance of asphaltic mixture. The lower deformation endurance of asphaltic mixture, the worse asphaltic mixture quality is. Therefore modified of asphalt recycling, must be done to improve deformation endurance of asphalt. This research using Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) which is elastomer polimer as asphalt modifier. Variation of SBS polimer are 2.5% and 5% of asphalt weight and variation of RAP are 20% and 30% of mixture weight. The value of Flexural Stiffness Modulus and Phase Angle was determined by Fatigue testing using Four Point Loading Apparatus. According to the result, the highest Flexural Stiffness Modulus is 5,763.67 MPa which found in variation RAP 30% and SBS 5%. This mixture composition also have the lowest Phase Angle that is 23.33°. The result showing that the stiffness will be increase by adding Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and SBS Polimer.

Keywords: Flexural Stiffness Modulus, Phase Angle, Reclaimed Asphalt Pevement (RAP), SBS polimer

Abstrak

Nilai Modulus Kekakuan Lentur dan Sudut Fase campuran beraspal memperlihatkan kecenderungan material untuk mengalami deformasi akibat beban yang diterimanya. Penggunaan perkerasan daur ulang, dalam hal ini aspal daur ulang, akan menurunkan tingkat ketahanan campuran beraspal terhadap deformasi akibat beban yang diterimanya. Makin rendah tingkat ketahanan campuran terhadap deformasi yang terjadi, makin buruk mutu campuran tersebut. Untuk itu diperlukan modifikasi terhadap aspal daur ulang sehingga dapat memperbaiki tingkat ketahanannya terhadap deformasi yang terjadi. Pada penelitian ini digunakan modifikasi aspal dengan tambahan polimer elastomer, yaitu polimer *Styrene-Butadiene-Styrene* dengan persentase 2,5% dan 5% terhadap berat aspal. Kandungan material daur ulang yang digunakan adalah sebesar 20% dan 30% terhadap berat campuran. Nilai-nilai Kekakuan Lentur dan Sudut Fase diperoleh dari pengujian kelelahan campuran menggunakan *Four Point Loading Apparatus*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai Modulus Kekakuan Lentur tertinggi diberikan oleh campuran dengan kandungan material daur ulang 30% dan *Styrene-Butadiene-Styrene* 5%, yaitu sebesar 5.763,67 MPa. Komposisi campuran ini juga memberikan nilai Sudut Fase yang terkecil, yaitu 23,33°. Hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan polimer SBS pada material daur ulang meningkatkan kekakuan.

Kata-kata kunci: Modulus Kekakuan Lentur, Sudut Fase, material daur ulang, polimer SBS

PENDAHULUAN

Penggunaan material daur ulang memiliki keuntungan, yaitu dapat membantu dalam usaha konservasi energi. Namun, di sisi lain dapat menurunkan mutu campuran yang menggunakan material daur ulang tersebut. Material daur ulang merupakan

pemanfaatan kembali material perkerasan jalan lama, yang berupa kupasan material permukaan jalan beraspal. Material daur ulang tersebut dikenal dengan istilah *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Material RAP ini tentulah telah mengalami penurunan kualitas selama masa layannya, misalnya penurunan nilai penetrasi, perubahan gradasi, penuaan aspal, maupun kelelahan campuran. Untuk itu diperlukan modifikasi sehingga material tersebut dapat digunakan kembali sebagai material penyusun perkerasan jalan baru. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan membatasi penggunaan material daur ulang dalam campuran perkerasan jalan. Asphalt Institute (1981) membatasi penggunaan material daur ulang antara 10% sampai 60%. Bila jumlah penggunaan material daur ulang lebih besar dari 20%, perlu ditambahkan bahan peremaja. Selain membatasi penggunaan material daur ulang, salah satu usaha yang dilakukan untuk memperbaiki kinerja campuran daur ulang adalah dengan penambahan *additive*, seperti polimer, yang diharapkan dapat memperbaiki kinerja kelengketan, titik lembek, dan kelenturan material daur ulang.

Studi ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan campuran Laston Lapis Aus (AC-WC) yang menggunakan material daur ulang (RAP) dengan aspal modifikasi polimer *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS), terhadap perubahan bentuk yang ditunjukkan oleh nilai Modulus Kekakuan Lentur dan Sudut Fase. Campuran yang digunakan adalah campuran Beton Aspal Lapis Aus (AC-WC) yang menggunakan 20% dan 30% material RAP terhadap berat total campuran, sesuai dengan rentang yang disyaratkan oleh Asphalt Institute, serta aspal Pen 60/70 yang dimodifikasi dengan polimer SBS 2,5% dan 5% terhadap berat aspal berdasarkan penelitian sebelumnya (Pradani, 2011).

Polimer *Styrene-Butadiene-Styrene*

Polimer elastomer merupakan salah satu solusi untuk memodifikasi aspal. Penambahan polimer elastomer berfungsi sebagai bahan peremaja yang diharapkan dapat mengembalikan sifat *thermoplastis* aspal, sehingga aspal daur ulang dapat memiliki kepekaan yang rendah terhadap perubahan temperatur. *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS) merupakan salah satu jenis polimer sintesis tipe elastomer. Jenis polimer ini mulai mendapat perhatian lebih dalam modifikasi aspal karena mengkombinasikan sifat elastis dan termoplastis dalam sifat materialnya sehingga sering disebut sebagai *thermoplastic rubbers* (TR). Sifat ini dimungkinkan dari jenis monomer pembentuknya, yaitu *styrene* dan *butadiene*. SBS merupakan blok *copolymer*, yang terdiri atas bagian *polystyrene* yang terikat pada pusat bagian *polybutadiene*.

SBS memiliki dua fase morfologi, yaitu "*soft segments*", yang berada pada pusat rantai ikatan, dan "*hard segments*", yang membentuk *physical crosslinks* pada temperatur ruang. *Soft segments* ini terbentuk dari monomer *butadiene*, sedangkan *hard segments* terbentuk dari monomer *styrene*. Setelah *physical crosslinks* pada *hard segments* terjadi, yaitu pada temperatur ruang, polimer tersebut akan membentuk jaringan elastomerik (Francken, 1998). Pada temperatur di atas *glass transition point* dari *polystyrene* (100°C), bagian *polystyrene* akan melunak bahkan akan cenderung memisah bila diberi *stress*

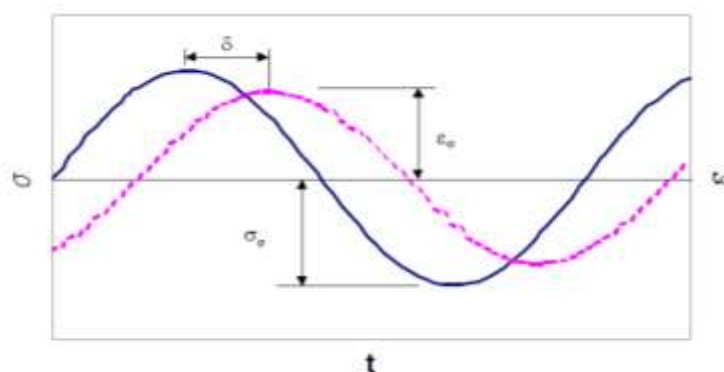
sehingga memudahkan proses pencampuran. Bila temperatur menurun, bagian *polystyrene* ini akan menyatu kembali dan memberikan kekuatan serta elastisitas dalam menerima beban. Ketika polimer SBS ini ditambahkan pada aspal panas, polimer ini akan menyerap bagian *maltenes* dari aspal dan akan mengembang sebesar sembilan kali lebih besar daripada volume awalnya. Sifat polimer SBS yang unik ini memungkinkan perubahan secara signifikan pada sifat fisik aspal modifikasi polimer SBS, seperti viskositas dan ketahanan terhadap temperatur (Francken, 1998).

Modulus Kekakuan Lentur

Modulus Kekakuan Lentur merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan pada *flexural deformation*. Regangan pada modulus kekakuan lentur merupakan fungsi temperatur (T) dan *time of loading* (t). Nilai ini memperlihatkan kecenderungan material untuk mengalami deformasi (*bending*) akibat beban yang diterimanya (AASHTO, 1998). Nilai Modulus Kekakuan Lentur dapat diperoleh dari *bending test*, yang salah satunya dengan menggunakan *Four Point Loading Apparatus*.

Sudut Fase

Sudut fase merupakan sudut yang mencerminkan kecenderungan perubahan fase suatu material, yang dalam hal ini fase *elastic* dan fase *viscous*. Bila sudut fase bitumen sama dengan 0° , material bitumen tersebut murni *elastic*. Sebaliknya material tersebut murni *viscous* bila sudut fasenya sama dengan 90° (Shell, 2003). Sedangkan sudut fase campuran beraspal merupakan sudut yang terbentuk antara *stress amplitude* (σ_0) dan *recoverable strain amplitude* (ϵ_0) pada pembebanan sinusoidal selama satu *cycle* dalam t detik (Yoder dan Witczak, 1975). Bila sudut fase yang terjadi pada suatu material makin besar, campuran tersebut akan memperlihatkan kecenderungan *viscous*, begitu pula sebaliknya. Gambaran mengenai sudut fase (δ) pada campuran beraspal dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Ilustrasi Sudut Fase Campuran Beraspal

Ketahanan campuran terhadap deformasi, atau perubahan bentuk akibat beban yang diterimanya, dapat digambarkan melalui nilai Modulus Kekakuan Lentur maupun dari nilai

sudut fase campuran. Nilai Modulus Kekakuan Lentur yang semakin besar dan nilai sudut fase campuran yang semakin kecil dapat berindikasi menaikkan tingkat ketahanan campuran terhadap perubahan bentuk akibat pembebanan.

Penelitian ini menitikberatkan pada pengujian laboratorium terhadap kinerja kelelahan, menggunakan material lama (RAP), material baru, dan polimer SBS. Dengan ketiga material tersebut dilakukan pengujian mengikuti standar Standar Nasional Indonesia (SNI).

Dalam pengujian campuran terdapat dua variasi kadar material RAP terhadap berat total campuran, yaitu 20% dan 30%. Kemudian pada masing-masing variasi RAP tersebut dibedakan persentase kandungan polimer SBS, yaitu 0%, 2,5%, dan 5% terhadap berat aspal total. Pengujian campuran ini dilakukan sesuai dengan standar pengujian campuran beraspal panas. Untuk mendapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) digunakan Metode Marshall dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak. Kadar Aspal Optimum (KAO) diperoleh untuk keenam variasi campuran. Selanjutnya, masing-masing KAO tersebut digunakan dalam pembuatan benda uji untuk pengujian ketahanan campuran terhadap perubahan bentuk atau deformasi.

Persiapan benda uji untuk pengujian ketahanan campuran terhadap perubahan bentuk terdiri atas agregat kasar, agregat halus, dan *filler* pada KAO yang didapat dari analisis Marshall dengan pendekatan kepadatan mutlak. Kemudian dilakukan pencampuran, pemadatan, dan pemotongan. Benda uji berbentuk balok berukuran lebar nominal 63,5 mm, tinggi 50 mm, dan panjang 380 mm.

Pengujian ketahanan campuran terhadap perubahan bentuk dilakukan dengan *Four Point Bending Apparatus* pada temperatur $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$, serta pembebanan dengan kontrol regangan (*controlled-strain*). Semua pengujian dilakukan pada frekuensi 8 Hz (8 siklus per detik) dengan pola pembebanan sinusoidal. Nilai Modulus Kekakuan Lentur dan Nilai Sudut Fase diperoleh sesuai prosedur pengujian kelelahan menggunakan konsep empat titik pembebanan.



Gambar 2 *Four Point Bending Apparatus*

ANALISIS DATA

Pengujian Material

Aspal yang digunakan dalam campuran ini adalah aspal dengan penetrasi 60/70, aspal RAP, dan aspal modifikasi polimer SBS. Penentuan kandungan aspal pada material RAP dilakukan terlebih dahulu, kemudian dilakukan pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1 Kadar Aspal Hasil Ekstraksi dari *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP)

Sampel	Berat (gr)			Kadar Aspal (%)
	Sampel	Agregat	Aspal	
(1)	(2)	(3)	(4) = (2) - (3)	(5) = ((4) / (2)) x100
1	500	475,6	24,4	4,88
2	500	474,6	25,4	5,08
Kadar Aspal Rata-rata				4,98

Sumber: Pradani (2011).

Tabel 2 Pengujian Sifat-sifat Aspal Hasil Ekstraksi dari RAP

Jenis Pemeriksaan	Hasil Uji	Metode Uji
Penetrasi, 25 °C, 100 gr, 5 detik; 0,1 mm	21,6	SNI 06-2456-1991
Titik Lembek; °C	57	SNI 06-2434-1991
Berat Jenis	1,043	SNI 06-2441-1991

Sumber: Pradani (2011).

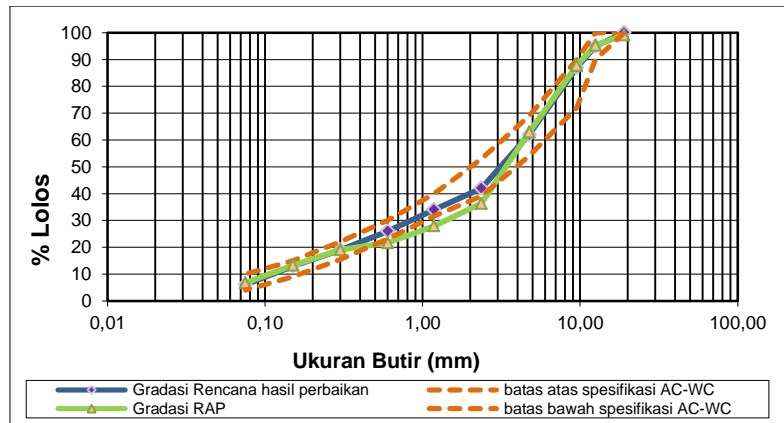
Untuk pengujian selanjutnya dilakukan penambahan aspal lama ke dalam aspal baru (Pen 60/70) dan diuji untuk enam campuran dengan perbandingan RAP 20% dan material baru 80%; RAP 30%, dan material 70% di mana yang dibedakan adalah persentase polimer SBS. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Pengujian Pencampuran Aspal Lama dengan Aspal Baru Modifikasi Polimer

Jenis Pemeriksaan	Hasil Uji						Metode Pengujian
	20% RAP (Komposisi A)			30% RAP (Komposisi B)			
	0% SBS (A1)	2,5% SBS (A2)	5% SBS (A3)	0% SBS (B1)	2,5% SBS (B2)	5% SBS (B3)	
Penetrasi, 25°C (dmm)	57,2	46,20	41,40	56,6	43,83	40,30	SNI06-2456-1991
Titik Lembek, °C	51	54,3	55,2	52	54,8	56,0	SNI06-2434-1991
Berat Jenis	1,0383	1,042	1,044	1,0396	1,042	1,045	SNI06-2441-1991

Sumber: Pradani (2011).

Agregat yang digunakan meliputi agregat baru dan agregat dari material lama (RAP). Pengujian dilakukan untuk menentukan kelayakan agregat tersebut untuk digunakan campuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat RAP masih layak digunakan, namun gradasi material RAP tidak memenuhi spesifikasi sehingga perlu dilakukan perbaikan gradasi dengan menambahkan agregat baru, seperti pada Gambar 3.



Sumber: Pradani (2011).

Gambar 3 Gradasi Rencana dan Gradasi RAP Campuran AC-WC

Pengujian Kadar Aspal Optimum

Berdasarkan spesifikasi baru campuran beraspal dengan Kepadatan Mutlak, dilakukan perancangan sesuai dengan gradasi agregat yang dipilih. Kemudian untuk masing-masing campuran tersebut dilakukan pengujian Marshall dengan variasi kadar aspal yang digunakan. Selanjutnya, dilakukan pengujian Kepadatan Mutlak dengan penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) dilakukan dengan metode *barchart*. KAO ini merupakan rentang kadar aspal yang memenuhi semua syarat kriteria campuran beraspal, yaitu VIM_{Marshall} , VIM_{Refusal} , VMA, VFB, stabilitas, kelelahan, dan MQ. Nilai KAO yang didapat dari masing-masing campuran digunakan sebagai kadar aspal dalam Pengujian Ketahanan Campuran terhadap deformasi.

Berdasarkan analisis Marshall dengan metode Kepadatan Mutlak dihasilkan KAO yang semakin berkurang dengan bertambahnya kadar polimer SBS. Untuk kandungan 20% RAP, diperoleh KAO sebesar 5,28% (0% SBS), 5,14% (2,5% SBS), dan 5,11% (5% SBS). Sedangkan untuk campuran dengan kandungan 30% RAP didapat KAO masing-masing sebesar 5,34% (0% SBS), 5,20%, (2,5% SBS), dan 5,18% (5% SBS). Hal ini menunjukkan bahwa polimer dapat menggantikan fungsi aspal sebagai unsur pengikat dalam campuran.

Pengujian Ketahanan Campuran terhadap Perubahan Bentuk

Pengujian ketahanan campuran terhadap perubahan bentuk ditentukan berdasarkan Pengujian Kelelahan menggunakan *Four Point Loading Apparatus*. Pengujian dilakukan pada Temperatur $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, pada balok-balok dengan enam variasi campuran yang berbeda pada KAO. Tiap variasi campuran diuji pada tiga tingkat regangan yang berbeda, yaitu 500 $\mu\epsilon$, 600 $\mu\epsilon$, dan 700 $\mu\epsilon$. Sebagai informasi AASHTO (1998) mensyaratkan regangan antara (250-750) $\mu\epsilon$. Ketiga tingkatan regangan ini berusaha dipertahankan dengan menyesuaikan nilai tegangan. Makin besar regangan yang berusaha dipertahankan, makin besar pula tegangan yang terjadi. Campuran yang mengandung 20% RAP (A1, A2, dan A3) menghasilkan tegangan tarik yang lebih kecil dibandingkan campuran dengan 30% RAP (B1, B2, dan B3) sehingga beban yang bekerja pada benda uji dengan 20% RAP lebih kecil

daripada beban untuk campuran dengan 30% RAP. Hasil pengujian Modulus Kekakuan Lentur dan Sudut Fase disajikan pada Tabel 4. Dengan mengambil nilai rata-rata Modulus Kekakuan Lentur dan Sudut Fase campuran diperoleh data seperti yang diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 4 Hasil Pengujian *Four Point Loading*

Jenis Campuran	Regangan Tarik ($\mu\epsilon$)	Tegangan Tarik (kPa)	Sudut Fase ($^{\circ}$)	Modulus Kekakuan Lentur (MPa)	Beban (kN)
20% RAP + 0% SBS	505	1518	34,6	3009	0,6593
	599	1760	43,0	2939	0,8506
	700	1775	33,2	2535	0,7615
20% RAP + 2,5% SBS	499	2728	27,6	5463	1,1989
	598	2587	27,8	4324	1,1413
	702	3690	27,0	5254	1,5914
20% RAP + 5% SBS	501	2786	25,5	5563	1,1905
	605	3287	26,2	5429	1,4122
	700	3138	26,4	4484	1,3719
30% RAP + 0% SBS	499	2142	36,1	4288	0,8822
	602	3017	31,3	5015	1,3580
	700	3127	32,0	4465	1,4170
30% RAP + 2,5% SBS	498	2849	25,8	5715	1,2806
	602	3522	27,8	5854	1,5208
	700	3445	28,2	4924	1,4819
30% RAP + 5% SBS	499	3144	24,2	6296	1,3876
	608	3462	22,4	5698	1,5072
	702	3720	23,4	5297	1,6236

Sumber: Pradani (2011).

Tabel 5 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Flexural Stiffness Modulus* dan *Phase Angle*

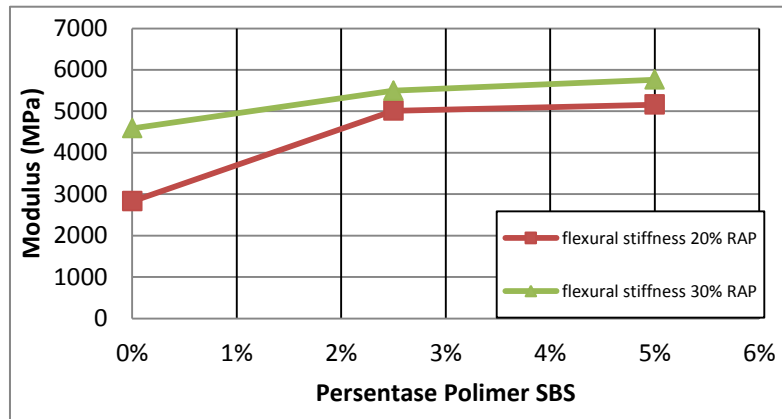
Jenis Campuran	Modulus Kekakuan Lentur (MPa)	Sudut Fase ($^{\circ}$)
20% RAP + 0% SBS	2.827,67	36,93
20% RAP + 2,5% SBS	5.013,67	27,47
20% RAP + 5% SBS	5.158,67	26,03
30% RAP + 0% SBS	4.589,33	33,13
30% RAP + 2,5% SBS	5.497,67	27,27
30% RAP + 5% SBS	5.763,67	23,33

Sumber: Pradani (2011).

Modulus Kekakuan Lentur

Berdasarkan hasil pengujian kelelahan dengan *Beam Fatigue Apparatus*, yang menggunakan konsep empat titik pembebanan, diperoleh nilai modulus kekakuan lentur untuk setiap variasi campuran dengan persentase material RAP dan polimer SBS yang berbeda. Hasil ini ditunjukkan pada Gambar 4. Terlihat bahwa nilai Modulus Kekakuan Lentur semakin meningkat seiring dengan penambahan persentase material RAP dan polimer SBS. Nilai modulus kekakuan lentur campuran dengan 30% RAP cenderung lebih besar daripada nilai modulus kekakuan lentur campuran dengan 20% RAP, dengan

kenaikan nilai modulus adalah 62,30% (pada 0% polimer SBS), 17,12% (pada 2,5% polimer SBS), dan 11,73% (pada 5% polimer SBS). Kecenderungan ini disebabkan karena makin besarnya tegangan yang menyebabkan *failure* seiring dengan penambahan kadar RAP dan polimer SBS. Tegangan ini semakin besar disebabkan oleh semakin besarnya nilai stabilitas campuran. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa semakin besar kandungan material RAP dan polimer SBS, semakin meningkat ketahanan campuran terhadap perubahan bentuk. Hal ini ditunjukkan dengan nilai Modulus Kekakuan Lentur yang semakin besar seiring dengan penambahan RAP dan polimer SBS.



Gambar 4 Perbandingan Nilai Modulus Kekakuan Lentur terhadap Persentase Polimer SBS

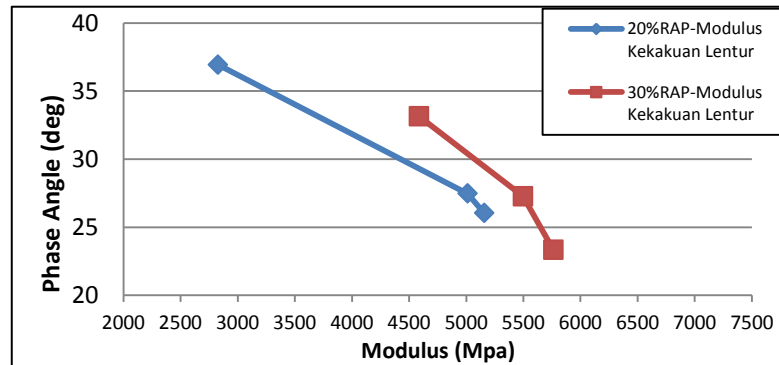
Sudut Fase

Berdasarkan hasil pengujian kelelahan dengan metode *Four Point Loading*, diperoleh besar sudut fase untuk setiap variasi campuran (Tabel 5). Dari hubungan antara modulus kekakuan lentur terhadap sudut fase (pada Gambar 5) terlihat bahwa nilai sudut fase berbanding terbalik dengan nilai modulus kekakuan lentur. Semakin besar nilai sudut fase, semakin kecil modulus kekakuan lentur. Hal ini sesuai dengan konsep yang telah dipaparkan sebelumnya, bahwa bila nilai sudut fase semakin besar, material tersebut mendekati fase *viscous*, sehingga nilai modulus kekakuan lenturnya akan cenderung menurun. Campuran dengan kandungan 20% RAP memiliki nilai sudut fase yang lebih besar daripada campuran dengan 30% RAP. Hal ini disebabkan karena campuran dengan 30% RAP memiliki nilai penetrasi aspal yang rendah dan menghasilkan campuran yang lebih kaku, sehingga nilai modulusnya menjadi lebih besar. Penambahan RAP meningkatkan nilai modulus sehingga ketahanan campuran terhadap deformasi juga akan meningkat.

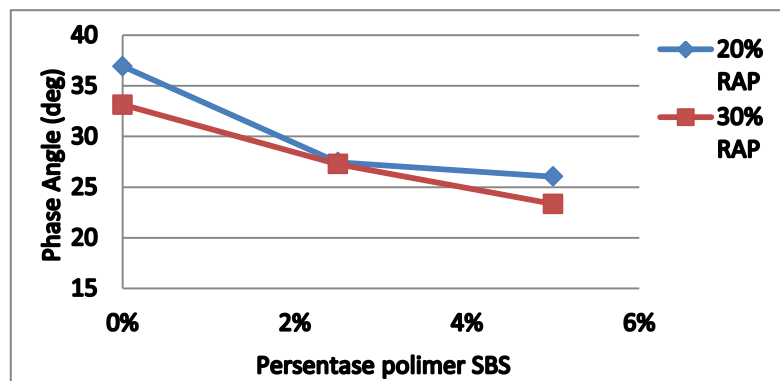
Hubungan antara sudut fase dengan persentase polimer SBS ditunjukkan pada Gambar 6. Terlihat bahwa terdapat perbandingan terbalik antara persentase polimer SBS terhadap sudut fase. Semakin tinggi persentase polimer SBS, semakin kecil sudut fase yang terbentuk. Hal ini terjadi karena sudut fase yang semakin kecil menunjukkan kecenderungan campuran tersebut berada pada fase *elastic*. Fenomena ini disebabkan karena semakin

tinggi kandungan polimer SBS, semakin rendah nilai penetrasi aspalnya atau aspal menjadi lebih keras.

Peningkatan persentase material RAP berkontribusi kepada makin *brittle* atau makin kakunya campuran. Hal ini ditunjukkan dengan nilai modulus yang semakin meningkat seiring dengan penambahan kadar RAP. Namun dengan penambahan *modifier* berupa aspal baru (Pen 60/70) dan polimer yang bersifat elastomerik, dalam hal ini polimer SBS, proporsi elastis dalam campuran akan meningkat. Kondisi ini terlihat pada nilai sudut fase yang semakin kecil seiring dengan peningkatan kadar polimer SBS.



Gambar 5 Perbandingan Nilai Modulus terhadap Sudut Fase



Gambar 6 Perbandingan Sudut Fase terhadap Persentase Polimer SBS

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada penelitian ini didapat kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Nilai Modulus Kekakuan Lentur tertinggi diberikan pada campuran dengan variasi RAP 30% dan Polimer SBS 5%.

- 2) Sudut fase campuran terkecil sebesar $23,33^{\circ}$, yaitu pada campuran dengan variasi RAP 30% dan Polimer SBS 5%.
- 3) Penambahan material RAP dan Polimer SBS berpotensi meningkatkan nilai modulus kekakuan lentur dan menurunkan nilai sudut fase campuran sehingga material menjadi lebih kaku dan lebih tahan terhadap perubahan bentuk.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. 1998. *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. Washington, D.C.
- Asphalt Institute. 1981. *Asphalt Hot Mix Recycling Construction of Hot Mix Asphalt Pavements*. Manual Series No. 20 (Ms-22). College Park, Md.
- Francken, L. (Editor). 1998. *Bituminous Binders and Mixes: State of the Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design*. E & FN Spon. Swansea.
- Pradani, N. 2011. *Kinerja Modulus Resilien dan Fatigue dari Campuran Lapis Aus (AC-WC) yang Menggunakan Material Hasil Daur Ulang dan Polimer Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)*. Tesis tidak diterbitkan. Bandung: Program Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya (STJR), Institut Teknologi Bandung.
- Shell Bitumen. 2003. *The Shell Bitumen Handbook*. London: Thomas Telford.
- Yoder, E.J. dan Witczak, M.W. 1975. *Principles of Pavement Design*. 2nd Edition. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.