

PENGEMBANGAN MODEL DEFORMASI PERMANEN UNTUK CAMPURAN STONE MATRIX ASPHALT (DEVELOPMENT OF PERMANENT DEFORMATION MODEL FOR STONE MATRIX ASPHALT MIXTURES)

Nyoman Suaryana

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Jl A.H Nasution No. 264 Bandung 40294
e-mail: nyomansuaryana@yahoo.com

Diterima: 9 Mei 2016; direvisi: 30 Mei 2016; disetujui: 22 Juni 2016

ABSTRAK

Deformasi permanen atau alur pada jejak roda merupakan jenis kerusakan yang banyak dijumpai dalam perkerasan jalan beraspal, dan flow number umumnya digunakan sebagai parameter untuk melihat ketahanan terhadap deformasi permanen. Salah satu jenis perkerasan beraspal yang dikembangkan untuk lebih tahan terhadap alur adalah Stone Matrix Asphalt. Makalah ini bertujuan untuk mengembangkan model deformasi permanen pada campuran beraspal panas, khususnya pada campuran Stone Matrix Asphalt. Metodologi yang digunakan adalah metode experimental yang dimulai dengan pengujian bahan, pembuatan rancangan campuran dan selanjutnya pengujian flow number dengan variasi temperatur pengujian, jenis aspal, rongga udara dalam campuran serta gradasi campuran. Temperatur pengujian digunakan bervariasi dari 20^oC, 35^oC, 45^oC, dan 56^oC. Dua jenis aspal digunakan, yaitu aspal minyak pen 60/70 dan aspal minyak yang dimodifikasi dengan aspal batu buton. Hasil studi menunjukkan nilai flow number (ketahanan terhadap alur) akan menurun jika temperatur dan void dalam campuran meningkat, dan flow number akan meningkat jika filler bertambah dalam rentang tertentu. Flow number juga akan meningkat dengan meningkatnya viskositas aspal. Pengembangan model deformasi permanen telah dikembangkan dengan jumlah data sebanyak 32 buah. Persamaan tersebut hanya berlaku untuk material Stone Matrix Asphalt dengan menggunakan gradasi AASHTO dan untuk beban axial 87 psi (unconfined test).

Kata kunci: *deformasi permanen, flow number, stone matrix asphalt, aspal batu buton, model deformasi permanen*

ABSTRACT

Rutting has been considered to be the most serious distress in flexible pavement, and flow number is commonly used as a parameter in evaluating the resistance to permanent deformation. One type of asphalt pavements developed to be more resistant to rutting is the Stone Matrix Asphalt. The paper aims to develop permanent deformation model for hot mix asphalt, especially for Stone Matrix Asphalt mix. The methodology used in this study is experimental method, started with material testing, mix design and followed by flow number test in different temperatures test, binder type, mix volumetric, and mix grading. The test temperature used varied from 20^oC, 35^oC, 45^oC, and 56^oC. Two different binder types were used, i.e. pure 60/70 pen grade bitumen and pure petroleum bitumen modified by granular Buton rock asphalt. The study result showed that the flow number (rutting resistance) of Stone Matrix Asphalt mixture decreases when the temperature and void in mix increase, and the flow number would increase if the filler increases in a certain range. Flow number would also increase with the increase of asphalt viscosity. The permanent deformation model has been developed based on 32 data. The equation is only valid for the Stone Matrix Asphalt materials mix by using AASHTO gradation standard and axial stress for testing of 87 psi (unconfined test).

Keywords: *permanent deformation, flow number, stone matrix asphalt, buton natural rock asphalt, permanent deformation model*

PENDAHULUAN

Kondisi perkerasan di Indonesia khususnya pada ruas pantai utara (pantura) Jawa pada awal tahun 1990-an sebelum mulai diadopsinya spesifikasi *Superior Performing Asphalt Pavement (Superpave)* banyak mengalami kerusakan deformasi permanen atau alur permukaan sebagai akibat dari geser. Kerusakan deformasi permanen akibat pergeseran tersebut umumnya dikenal dengan istilah pergeseran plastis (*plastic flow*). Berdasarkan hasil penelitian di beberapa lokasi di pulau Jawa, kerusakan deformasi plastis tersebut terjadi apabila *Void in Mix (VIM)* lapangan telah mencapai nilai kurang dari 3 % (Zamhari, Sterling, and Tool 1997).

Pada tahun 2003 mulai dibuat rancangan campuran dengan mengacu pada spesifikasi *Superpave* dan penggunaan aspal modifikasi dengan titik leleh yang relatif tinggi. Hal tersebut dapat mengurangi kerusakan deformasi plastis yang terjadi di pantura. Mulyani dan Solihin (2011) menyampaikan bahwa temperatur maksimum perkerasan di ruas jalan pantura adalah $58,4^{\circ}\text{C}$, sementara rata-rata temperatur udara tahunan adalah 28°C . Dengan temperatur yang tinggi dan beban lalu-lintas yang sangat berat seperti pada ruas Cirebon – Jakarta, jenis kerusakan ini masih banyak ditemukan (Riswan, Widayat, dan Nono 2011).

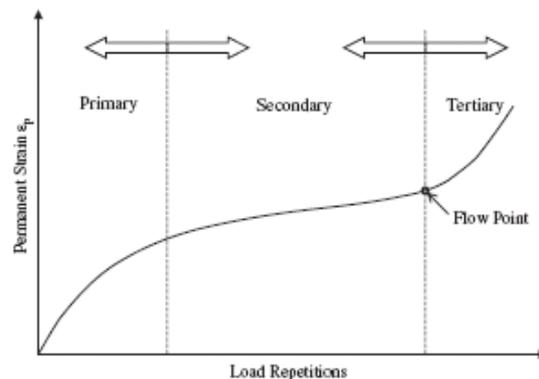
Penelitian mengenai ketahanan campuran beraspal terhadap deformasi permanen menjadi penting mengingat deformasi permanen terutama pada jejak roda sangat membahayakan pengguna jalan karena dapat merubah arah kendaraan dan menimbulkan genangan air sehingga muncul efek *hydroplaning*.

Makalah ini bertujuan untuk mengembangkan model deformasi permanen sehingga dapat diketahui variabel-variabel yang mempengaruhi ketahanan campuran terhadap deformasi permanen. Model yang dikembangkan dibatasi untuk *Stone Matrix Asphalt (SMA)* yang dipercaya merupakan campuran beraspal yang lebih tahan terhadap alur.

KAJIAN PUSTAKA

Flow number (Fn) merupakan indikator deformasi permanen dan telah diteliti sejak tahun 1970 untuk mengukur potensi alur pada campuran beraspal. Evaluasi terhadap pengujian modulus dinamis dan *flow number* yang dilaksanakan Wisconsin Highway Research Program (*WHRP Project: Testing Wisconsin Mixture for the AASHTO 2002 Mechanistic Design Procedure*), dan menyimpulkan bahwa *Fn* sangat sesuai sebagai indikator ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*) pada campuran beraspal (Bonaquist 2012).

Pengujian beban berulang *Fn (Fn)* merupakan pengujian rangkak (*creep*) dinamik yang mengalami pembebanan *haversine* dengan waktu jeda (*rest period*) tertentu. Tipikal hubungan antara *permanent strain* dengan *load cycle* dapat dibagi menjadi tiga fase utama seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Pada fase pertama (*primary*), *strain rate (slope)* dari kurva *permanent strain* meningkat tajam, pada fase kedua (*secondary*) kecepatan regangan permanen (*permanent strain rate*) adalah konstan, dan pada fase ke-tiga (*tertiary*) kecepatan regangan permanen meningkat secara tajam. Awal dimulainya fase ke-tiga adalah awal dimulainya deformasi akibat geser.



Gambar 1. Ilustrasi tiga fase deformasi permanen

Pada pengujian *Fn*, the Arizona State University menyarankan untuk menggunakan model algoritma Francken sebagai pengganti algoritma *finite difference* untuk membuat hubungan antara jumlah *cycle* dengan *permanent strain*, yaitu sebagai berikut :

$$\epsilon_p = a N^b + c (e^{dN-1}) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

- ϵ_p = permanent strain, %
- N = jumlah cycle
- a, b, c, d = konsanta

Turunan pertama dari Persamaan 1, merupakan *permanent strain rate* dan turunan kedua digunakan untuk mencari *Fn*, dimana nilai *Fn* adalah nilai pada saat nilai *strain* pada turunan kedua berubah dari negatif menjadi positif.

Deformasi permanen yang terjadi di lapangan berkorelasi baik dengan pengujian *Fn*, seperti dilaporkan Minnesota Road (MnRoad), Westrack dan Federal Highway Association (FHWA) (Shen and Yu 2012).

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) dan WHRP membuat rekomendasi batasan nilai *Fn* untuk berbagai jenis tingkat beban lalu-lintas, kriteria tersebut diperlihatkan pada Tabel 1. NCHRP mengembangkan kriteria tersebut berdasarkan pengujian *Fn* yang dikumpulkan oleh FHWA dari beberapa proyek. Pengujian *Fn* dilakukan pada contoh uji dengan rongga udara $7,0 \pm 0,5$ %, dengan pengujian *unconfinement* dan *axial stress* 87 psi (600kPa). Temperatur yang digunakan adalah 50 % *reliability high pavement temperature*. Kriteria tersebut untuk rata-rata kedalaman alur 7 mm dengan tingkat kepercayaan 95 % kedalaman alur akan kurang dari 12 mm.

Kriteria yang dikembangkan NCHRP selanjutnya direvisi WHRP berdasarkan perkembangan metode analisa data pada alat *Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*, dimana sebelumnya menggunakan algoritma *finite difference* dan diganti dengan model Francken seperti dibahas sebelumnya, dengan hasil seperti diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekomendasi nilai *Fn* menurut NCHRP dan WHRP

Tingkatan Lalu Lintas (Juta ESAL)	Minimum <i>Fn</i> (Cycle)	
	NCHRP	WHRP
< 3	-	15
3 - 10	53	50
10 - 30	190	135
> 30	740	415

Sumber: Bonaquist (2012)

Rodezno, Kaloush, dan Corrigan (2010) membuat model deformasi permanen yang bergantung pada variabel viskositas aspal, temperatur pengujian, rongga udara, dan variabel yang berkaitan dengan gradasi agregat, dengan Persamaan 2, sebagai berikut :

$$\text{Log}(Fn) = 2,174 + 0,649 \log(\text{Vis}) + 0,101 P_{200} + 18,465 \log(q) + 0,014 R_4 - 0,084 \text{Void} - 18,901 \log(p) - 0,872 R_{3/4} + 0,182 p - 0,193 q - 0,871 \log(T) \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- Fn* = flow number
- T = temperatur pengujian, °F
- Vis = viskositas aspal, *poise*
- Void = rongga dalam campuran, %
- p = shear stresses = $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$, psi
- q = normal stresses = $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$, psi
- R₄ = persentase tertahan saringan nomor 4 (4,76 mm)
- R_{3/4} = persentase tertahan saringan nomor 3/4 (19 mm)
- P₂₀₀ = persentase lolos saringan nomor 200 (0,075 mm)

HIPOTESIS

Model deformasi permanen untuk campuran SMA dapat dibuat dengan mengkorelasikan antara *Fn* dengan beberapa variabel, yaitu temperatur pengujian, viskositas aspal, rongga dalam campuran, dan gradasi.

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu dengan melakukan pengujian bahan, pembuatan campuran rencana, dan pengujian *Fn*. Bagan alir penelitian diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Metodologi Penelitian

Jumlah variasi data yang digunakan sebanyak 32, dan ini dianggap cukup mewakili untuk menganalisa model Rodezno yang sudah ada. Model Rodezno (2010) dikembangkan dengan menggunakan 1759 data.

Prosedur pengujian F_n mengacu pada AASHTO Designation: TP 79-12 (AASHTO 2012); *Determinaton the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. Pada penelitian ini digunakan tegangan axial 600 kPa (87 psi) dengan *loading pulse* 0,1 detik dan *rest period* 0,9 detik. Pengujian dilakukan sampai dengan 10.000 *pulse* atau sampai regangan permanen yang terjadi mencapai 5%. Sementara temperatur yang digunakan bervariasi dari 20°C, 35°C, 45°C, dan 56°C. Contoh uji berbentuk silinder dengan diameter 10 cm dan panjang 15 cm. Untuk mencapai temperatur pengujian yang diinginkan maka dilakukan pengkodisian selama 120 menit di dalam tabung sebelum

proses pengujian dimulai. Tidak ada pengkondisian dalam pemanas (*oven*) untuk simulasi penuaan (*aging*).

Pengujian viskositas aspal dilakukan dengan alat *Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Alat *DSR* digunakan untuk mengetahui perilaku viskos dan elastisitas aspal. Standar pengujian yang digunakan adalah AASHTO T 315: *Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)* (AASHTO 2012).

HASIL DAN ANALISIS

Sifat fisik agregat dan aspal

Agregat yang digunakan berasal dari daerah Sewo, Kabupaten Subang Provinsi Jawa Barat. Karakteristik agregat tersebut telah memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan SMA dan gradasi campuran yang digunakan mengacu pada spesifikasi AASHTO M 325-08 (AASHTO 2012).

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. Buton Asphalt Indonesia (PT. BAI), yaitu asbuton butir *Lawele Granular Asphalt (LGA) 50/25*.

Nilai penetrasi aspal minyak adalah 62 dmm dengan titik lembek 50,3°C. Sementara aspal asbuton mempunyai penetrasi 41 dmm dengan titik lembek 58,1°C.

Rancangan campuran

Prosedur perancangan campuran mengacu pada standar Amerika (Blazejowski 2011). Campuran SMA konvensional dengan aspal minyak pen 60 serta bahan penstabil serat selulosa disebut SMA, sementara SMA dengan aspal minyak ditambah asbuton serta asbuton sebagai penstabil selanjutnya disebut *Stone Matrix Aspal Buton (SMAB)*. Proporsi asbuton butir *LGA 50/25* yang ditambahkan dalam campuran *SMAB* adalah 7,5%.

Berdasarkan hasil rancangan campuran diperoleh kadar aspal optimum untuk SMA adalah 6,05% dan untuk *SMAB* adalah 6,54 %.

Karakteristik campuran SMA dan *SMAB* yang diperoleh memenuhi semua persyaratan yang ditentukan dalam spesifikasi AASHTO M 325-08 (AASHTO 2012).

Pengujian *flow number*

Untuk membuat model deformasi permanen maka dilakukan pengujian *Fn*, dengan membuat variasi temperatur, variasi kadar rongga udara dalam campuran, variasi gradasi yaitu gradasi ideal (tengah amplop), gradasi pada batas atas dan gradasi pada batas bawah. Hasil yang diperoleh diperlihatkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Untuk memperjelas pengaruh masing-masing variabel tersebut maka dipresentasikan hubungan antara nilai *Fn* dengan variasi temperatur, variasi rongga udara, dan variasi

gradasi seperti diperlihatkan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.

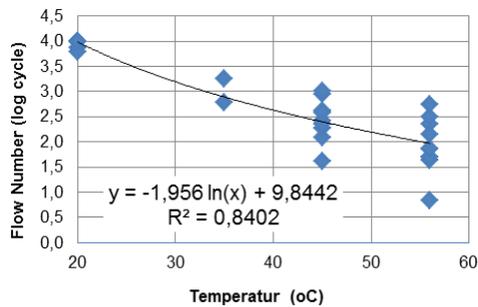
Dari gambar tersebut terlihat hubungan antara *Fn* dengan temperatur sangat berkaitan dan berpengaruh, sementara hubungan antara *Fn* dengan rongga udara dalam campuran (*VIM*) serta hubungan *Fn* dengan gradasi (lolos saringan no. 200) tidak terlalu berkaitan, karena masih dipengaruhi oleh variabel yang lain.

Tabel 2. Nilai *Flow Number* campuran SMA

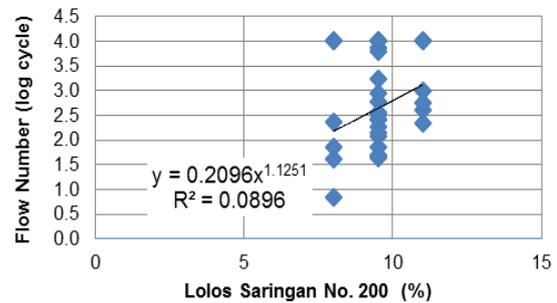
No.	<i>Fn</i> (AMPT) (cycle)	Variabel							
		Temperatur Pengujian		Rongga dalam Campuran	Persen tertahan # 3/4	Persen tertahan # 4	Persen lolos #200	σ_1	σ_3
		($^{\circ}$ C)	($^{\circ}$ F)	(%)	(%)	(%)	(%)	(psi)	(psi)
1	7500	20	68	3,82	0	72,5	9,5	87	0
2	596	35	95	3,82	0	72,5	9,5	87	0
3	263	45	113	3,82	0	72,5	9,5	87	0
4	72	56	133	3,82	0	72,5	9,5	87	0
5	6176	20	68	6,54	0	72,5	9,5	87	0
6	122	45	113	6,54	0	72,5	9,5	87	0
7	43	56	133	6,54	0	72,5	9,5	87	0
8	10000	20	68	5,06	0	72,5	9,5	87	0
9	187	45	113	5,06	0	72,5	9,5	87	0
10	49	56	133	5,06	0	72,5	9,5	87	0
11	10000	20	68	1,13	0	65	11	87	0
12	414	45	113	1,13	0	65	11	87	0
13	220	56	133	1,13	0	65	11	87	0
14	10000	20	68	7,57	0	80	8	87	0
15	41	45	113	7,57	0	80	8	87	0
16	7	56	133	7,57	0	80	8	87	0

Tabel 3. Nilai *Flow Number* campuran SMAB

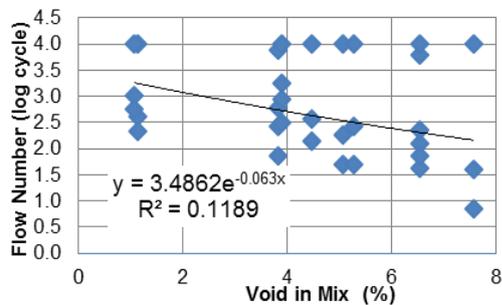
No.	<i>F_n</i> (AMPT)	Variabel							
		Temperatur Pengujian		Rongga dalam Campuran (%)	Persen tertahan # 3/4 (%)	Persen tertahan # 4 (%)	Persen lolos #200 (%)	σ ₁ (psi)	σ ₃ (psi)
		(°C)	(°F)						
1	10000	20	68	3,90	0	72,5	9,5	87	0
2	1758	35	95	3,90	0	72,5	9,5	87	0
3	886	45	113	3,90	0	72,5	9,5	87	0
4	316	56	133	3,90	0	72,5	9,5	87	0
5	10000	20	68	5,27	0	72,5	9,5	87	0
6	264	45	113	5,27	0	72,5	9,5	87	0
7	49	56	133	5,27	0	72,5	9,5	87	0
8	10000	20	68	4,48	0	72,5	9,5	87	0
9	372	45	113	4,48	0	72,5	9,5	87	0
10	138	56	133	4,48	0	72,5	9,5	87	0
11	10000	20	68	1,07	0	65	11	87	0
12	1014	45	113	1,07	0	65	11	87	0
13	562	56	133	1,07	0	65	11	87	0
14	10000	20	68	6,54	0	80	8	87	0
15	227	45	113	6,54	0	80	8	87	0
16	74	56	133	6,54	0	80	8	87	0



Gambar 3. Hubungan *F_n* dengan Temperatur



Gambar 5. Korelasi Antara *F_n* dan Lolos nomor 200



Gambar 4. Hubungan *F_n* dengan *VIM*

Pengujian viskositas

Hasil pengujian modulus dengan menggunakan alat *DSR* dan pengujian viskositas diperlihatkan pada Tabel 4. Parameter *G** merupakan resultan dari perilaku elastis dengan notasi *G'* (*elastic modulus*) dan perilaku viskos dengan notasi *G''* (*viscous modulus*).

Phase angle (δ) merupakan indikator sifat elastis atau viskos material, untuk material yang elastis murni, maka sudut fase, $\delta = 0$, dan untuk material yang murni viskos, sudut fase $\delta = 90^0$. Dari hasil pengujian terlihat pada temperatur yang tinggi, sifat aspal semakin

mendekati sifat viskos, seperti yang ditunjukkan pada nilai sudut fase (*phase angle*) yang membesar serta nilai viskositas dinamis (*dynamic viscosity*) yang mengecil.

Untuk menentukan nilai viskositas pada suhu tertentu, digunakan hubungan viskositas-temperatur dari ASTM, yaitu :

$$\text{Log} (\log \eta) = A + \text{VTS} \log (\text{TR}) \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

η = viskositas aspal, cPoise

TR = temperatur, ⁰Rankine

A, VTS= konstanta

Dengan menggunakan data pada Tabel 4 dan bantuan software Microsoft excel, diperoleh nilai A = 11,316 dan VTS = -3,8325 untuk aspal minyak pen 60/70.

Tabel 4. Hasil pengujian viskositas aspal minyak pen 60/70

Tempera- tur	Frekuen- si	Sudut fase (δ)	Modulus Komplek s (G^*)	Modulus Elastisita s (G')	Modulus Viskous (G'')	Frekuensi Sudut (ω)	G^*/Sin δ (Delta)	Viskosita sdinamis (η')
(⁰ C)	(Hz)	(⁰)	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(rad/s)	(Pa)	(Pas)
24,96	1,596	52,27	1445000	884100	1143000	10.03	1827000	114000
34,99	1,596	73,36	265200	75950	254100	10.03	276800	25340
45,01	1,596	81,94	43870	6151	43440	10.03	44310	4333
56,00	1,596	85,87	6901	497	6883	10.03	6919	686.5

PEMBAHASAN

Pengembangan model

Pengembangan model deformasi permanen didasarkan pada model yang telah dikembangkan Rodezno, Kaloush, dan Corrigan (2010) dengan menggunakan 1759 data seperti diperlihatkan pada Persamaan 2.

Untuk melihat dengan lebih jelas hubungan antar variabel yang digunakan dalam model tersebut, maka dilakukan analisa korelasi multi variable dengan menggunakan bantuan program SPSS dengan metode Spearman, seperti diperlihatkan pada Tabel 5.

Berdasarkan Tabel 5, diperoleh korelasi antara F_n yang sangat tinggi adalah dengan nilai viskositas dan temperatur. Sementara korelasi yang tinggi diperoleh dengan nilai rongga dalam campuran (*void*), dan korelasi yang sedang dengan nilai persentase agregat lolos saringan nomor 200 dan persentase agregat tertahan saringan nomor 4. Korelasi F_n dengan tegangan geser dan tegangan normal (p dan q), serta persentase tertahan saringan

nomor $\frac{3}{4}$ tidak dapat di evaluasi karena nilai yang digunakan konstan.

Pada tahap awal dari pengembangan model dalam studi ini terlebih dahulu digunakan model yang telah dikembangkan oleh Rodezno, Kaloush, dan Corrigan (2010). Model tersebut dibuat berdasarkan data pengujian sebanyak 1759 data. Dengan memasukkan data nilai F_n pada nilai temperatur, rongga udara, viskositas, dan gradasi bervariasi. diperoleh korelasi seperti diperlihatkan pada Gambar 6.

Korelasi yang diperoleh dengan menggunakan model deformasi Rodezno, perkiraan F_n seluruhnya di atas nilai hasil pengujian, dan jika ditarik garis lurus, seperti diperlihatkan pada Gambar 6, maka diperoleh nilai perkiraan F_n lebih tinggi sekitar 0,9 log (*cycle*).

Perbedaan hasil yang diperoleh diperkirakan karena contoh uji pada studi ini tidak dikondisikan terlebih dahulu dalam oven untuk mensimulasikan proses penuaan (*aging*).

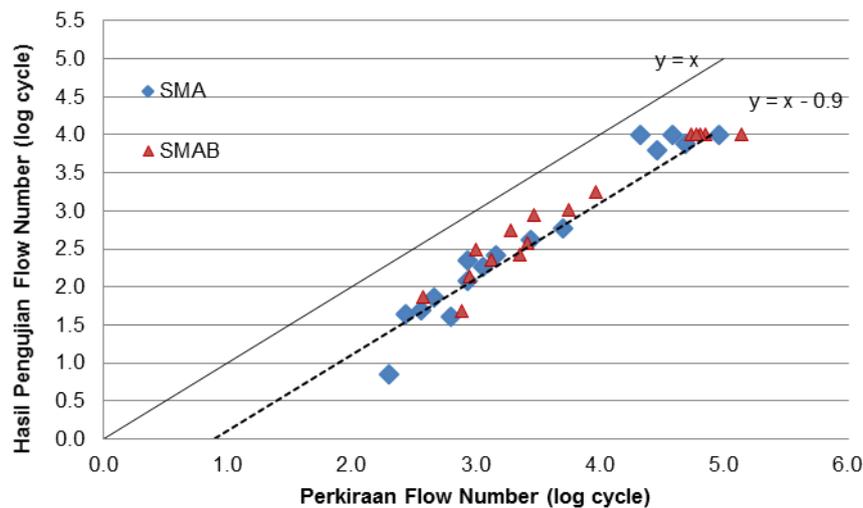
Tabel 5. Analisa korelasi multi varian

(Spearman's rho)									
	<i>Fn</i>	<i>Vis</i>	<i>P</i> ₂₀₀	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>R</i> ₄	<i>Void</i>	<i>R</i> _{3/4}	<i>T</i>
<i>Fn</i>	1.000	0.899 ^{*)}	0.251	b	b	-0.251	-0.318	b	-0.863 ^{*)}
<i>Vis</i>		1.000	0.000	b	b	0.000	-0.054	b	-0.964 ^{*)}
<i>P</i> ₂₀₀			1.000	b	b	-1.000 ^{*)}	-0.843 ^{*)}	b	0.000
<i>p</i>				b	b	b	b	b	b
<i>q</i>					b	b	b	b	b
<i>R</i> ₄						1.000	0.843 ^{*)}	b	0.000
<i>Void</i>							1.000	b	0.025
<i>R</i> _{3/4}								b	b
<i>T</i>									1.000

Keterangan:

^{*)} : Korelasi antar variable sangat jelas (*significant*)

b : Tidak dapat dihitung karena variabel yang digunakan tetap (*constant*)



Gambar 6. Kurva hasil pengukuran *Fn* versus perkiraan nilai *Fn* (Model Rodezno)

Pengembangan model deformasi permanen selanjutnya dibuat dengan mengikuti pola yang telah disampaikan Rodezno, yaitu dengan persamaan dasar sebagai berikut :

$$\text{Log}(Fn) = A + B \log(Vis) + C P_{200} + D \log(q) + E R_4 - F \text{Void} - G \log(p) - H R_{3/4} + I p - J q - K \log(T) \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

- Fn* = flow number
- T* = temperatur pengujian, °F

- Vis* = viskositas aspal, Poise
- Void* = rongga dalam campuran, %
- p* = shear stresses = $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$, psi
- q* = normal stresses = $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$, psi
- R*₄ = persentase tertahan saringan nomor 4 (4,76 mm)
- R*_{3/4} = persentase tertahan saringan nomor 3/4 (19 mm)
- P*₂₀₀ = persentase lolos saringan nomor 200 (0,075 mm)

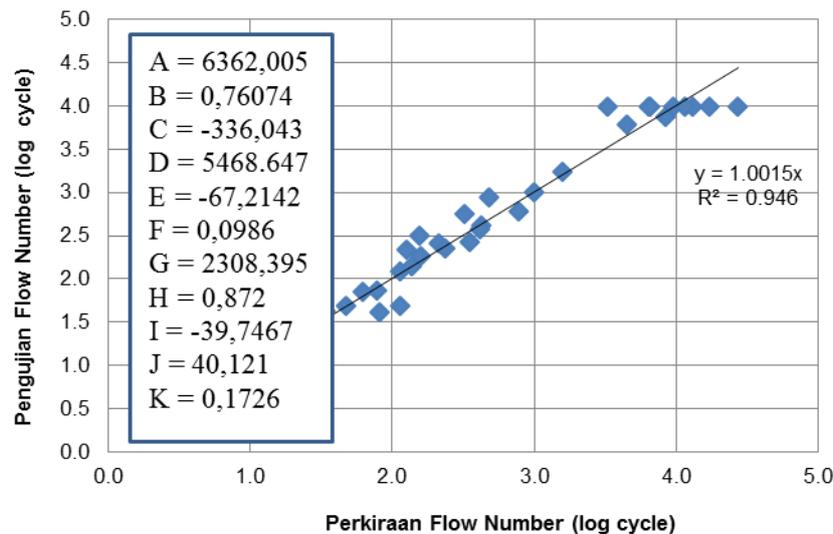
Dengan bantuan program *Statistical Product and Service Solution (SPSS) statistics non linear regression*, diperoleh nilai A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, dan K seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

Dilihat dari nilai R^2 , persamaan model deformasi permanen ke-1 cukup baik, namun disadari bahwa data pengujian yang ada memberikan nilai konstan pada tiga variabel, yaitu p, q dan $R_{3/4}$. Nilai p dan q konstan karena pada saat pengujian digunakan tegangan axial 87 psi tanpa tegangan samping (*unconfined*). Sementara $R_{3/4}$ konstan, karena ukuran maksimum agregat yang digunakan dalam penelitian ini adalah $\frac{3}{4}$ inci. Dengan demikian ketiga parameter tersebut dapat dihilangkan.

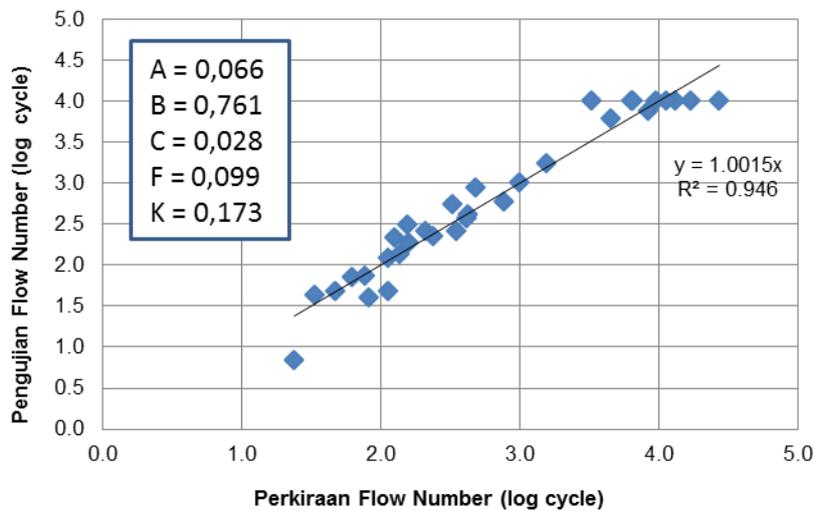
Berdasarkan analisis korelasi antar variabel, temperatur berkorelasi baik dengan viskositas dan demikian juga rongga dalam campuran dengan gradasi campuran (tertahan saringan nomor 4 dan lolos saringan nomor

200). Namun demikian untuk membedakan antara aspal pen 60 dengan aspal modifikasi, maka dianggap perlu untuk tetap memasukkan variabel viskositas. Sementara variasi gradasi dapat diwakili oleh persen lolos saringan nomor 200.

Dengan demikian model deformasi permanen yang diusulkan untuk dipakai pada campuran SMA adalah dengan mempertimbangkan temperatur, viskositas, rongga dalam campuran, serta gradasi. Dengan bantuan program *SPSS statistics non linear regression* diperoleh hasil seperti diperlihatkan pada Gambar 8. Hasil pengujian F_n dan perkiraan ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Korelasi yang dinyatakan oleh R^2 pada Gambar 7 dan Gambar 8 terlihat sama dan juga mempunyai nilai yang baik (mendekati satu) sehingga variabel yang dihilangkan tidak berpengaruh pada persamaan, karena nilai variabel tersebut konstan.



Gambar 7. Pengembangan model deformasi permanen ke-1



Gambar 8. Pengembangan model deformasi permanen ke-2

Berdasarkan analisis di atas, maka diperoleh persamaan model deformasi permanen sebagai berikut:

$$\text{Log}(Fn) = 0,066 + 0,761 \log(Vis) + 0,028 P_{200} - 0,099 \text{Void} - 0,173 \log(T) \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

- Fn = flow number
- T = temperatur pengujian, °F
- Vis = viskositas aspal pada temperatur pengujian, Poise
- $Void$ = rongga udara dalam campuran, %
- P_{200} = persen kumulatif lolos saringan nomor 200 (0,075 mm)

Model tersebut mempunyai batasan keberlakuan, yaitu untuk pengujian *unconfined* dengan tegangan *axial* 87 *psi*, dan untuk campuran SMA dengan batasan gradasi dan spesifikasi yang mengacu pada AASHTO M 325-08 (AASHTO 2012).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan, diperoleh nilai Fn (ketahanan terhadap alur) akan menurun jika temperatur dan void dalam campuran meningkat, dan Fn akan meningkat jika *filler* bertambah dalam rentang tertentu. Fn juga akan meningkat

dengan meningkatnya viskositas (kekentalan) aspal pada temperatur pengujian.

Saran

Dari hasil pembahasan di atas, dapat disampaikan saran untuk melakukan kajian terhadap pengaruh pengkondisian contoh uji (pemanasan selama waktu tertentu pada temperatur tertentu) terhadap nilai Fn untuk melihat efek penuaan jangka pendek (*short term aging*) dan penuaan jangka panjang (*long term aging*).

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini sampai dengan diterbitkan. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Badan Litbang Kementerian PUPR yang telah membantu memberikan fasilitas pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

American Association of State Highway and Transportation Officials. 2012. "Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA)". AASHTO M 325-08. *Standard*

- Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing Part I B Specification*. Washington, D.C.: AASHTO.
- _____. 2012. "Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)". 2012 *AASHTO Provisional Standard*. 16th ed. Washington, D.C.: AASHTO.
- _____. 2012. "Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)". AASHTO T 315. *Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. 32nd ed. Part II B Test. Washington, D.C.: AASHTO.
- Blazejowski, K. 2011. *Stone Matrix Asphalt Theory and Practice*. Boca Raton : CRC Press. <http://www.crcpress.com>. (accessed December 5th, 2012).
- Bonaquist, R. 2012. *Evaluation of Flow Number (Fn) as a Discriminating HMA Mixture Property*. WHP Report 12-01. Madison: Wisconsin Department of Transportation.
- Mulyani Y., dan A. Solihin. 2011. *Kajian Pengaruh Lingkungan Terhadap mutu Perkerasan Lentur*. Laporan Penelitian. Bandung: Pusat Litbang Jalan dan Jembatan.
- Riswan I., J. Widayat, dan Nono. 2011. *Monitoring dan Evaluasi Perkerasan Lentur*, Laporan Penelitian. Bandung: Pusat Litbang Jalan dan Jembatan.
- Rodezno, M.C., K.E. Kaloush, and M.W. Corrigan, 2010. "Development of a Flow Number Predictive Model". *Journal of the Transportation Research Board*, Volume No. 2181/Bituminous Materials and Mixture TRR 2010: 79-87.
- Shen, S. and H. Yu 2012. *An Investigation of Dynamic Modulus and Flow Number Properties of Asphalt Mixture in Washington State*. Final Report TNW2012-02. Seattle: University of Washington.
- Zamhari, K.A., T. Sterling, dan T. Toole. 1997. "Penyempurnaan Spesifikasi Campuran Aspal Panas". Dalam *Konferensi Regional Teknik Jalan ke-5*. Yogyakarta: HPJI.