

PENGARUH BASA NITROGEN DARI ASBUTON TERHADAP SIFAT REOLOGI ASPAL (THE EFFECT OF ASBUTON NITROGEN-BASES ON ASPHALT RHEOLOGICAL PROPERTIES)

Madi Hermadi

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Jalan A.H. Nasution No. 264, Bandung, 40294
e-mail:madi.hermadi@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 4 Mei 2016; direvisi: 30 Mei 2016; disetujui: 22 Juni 2016

ABSTRAK

Pada umumnya aspal terdiri dari berbagai jenis senyawa hidrokarbon yang diantaranya adalah basa nitrogen yang merupakan bagian dari aspal yang larut dalam pelarut n-pentana (pelarut parafin normal dengan berat molekul ringan) tetapi menjadi tidak larut setelah ditambahkan ke dalam larutan tersebut larutan asam sulfat 85%. Kandungan basa nitrogen dalam aspal sangat penting karena berfungsi sebagai bahan anti pengelupasan (anti-stripping agent) yang dapat meningkatkan daya lekat aspal pada agregat. Namun karena basa nitrogen memiliki kereaktifan yang tinggi maka mudah mengalami penuaan. Untuk lebih memahami fenomena ini maka pada tulisan ini akan disampaikan hasil kajian pengaruh senyawa basa nitrogen aspal batu Buton terhadap sifat reologi aspal, baik sebelum ataupun sesudah mengalami penuaan jangka pendek dan jangka panjang. Berdasarkan analisis komposisi kimia aspal metode Rostler, senyawa basa nitrogen tidak dapat diekstrak dalam keadaan utuh, oleh sebab itu pengkajian terhadap pengaruh senyawa basa nitrogen dilakukan dengan cara menghitung perbedaan pengaruh antara pengaruh malten (bagian dari aspal yang berbentuk cair dan masih mengandung senyawa basa nitrogen) dengan pengaruh malten yang sudah dihilangkan senyawa basa nitrogennya (dengan cara direaksikan dengan asam sulfat 85%) terhadap sifat reologi aspal. Hasilnya menunjukkan bahwa basa nitrogen asbuton dan basa nitrogen aspal minyak memiliki pengaruh yang sama terhadap sifat reologi aspal. Makin tinggi kandungan basa nitrogen maka sifat reologi aspal sebelum dan sesudah mengalami penuaan jangka pendek akan makin lunak, namun sifat reologi aspal setelah mengalami penuaan jangka panjang menjadi makin keras.

Kata kunci: *basa nitrogen, aspal batu Buton, reologi aspal, penuaan jangka pendek, penuaan jangka panjang.*

ABSTRACT

Generally, asphalt consists of various types of hydrocarbon molecules including nitrogen base which a part of bitumen that soluble in n-pentane solvent (low molecular weight of normal paraffins solvent but insoluble after treated by 85% sulfuric acid). It is very important because it can act as an anti-stripping agent to increase the bitumen adhesion on aggregate. However, nitrogen bases has high reactivity so that it prones to ageing. To understand the phenomenon, this paper presents the investigation results of the effect of nitrogen bases from Buton natural rock asphalt on bitumen rheology before and after short-term and long-term ageing. Based on analysis of asphalt composition using Rostler method, nitrogen bases content cannot be extracted in a whole therefore a study on the effect of nitrogen bases was calculated from the difference of the effects between the effect of pure malthene (part of fluid asphalt which still containing nitrogen base) and the effect of extracted malthene (malthenes whith the nitrogen bases was removed by adding 85% sulfuric acid). The results showed that nitrogen bases from Buton natural rock asphalt and nitrogen bases from petroleum asphalt have the same rheological effects. The more nitrogen bases content, the softer the asphalt rheologies after short-term ageing, however, after long-term aging, the asphalt is harder.

Keywords: *nitrogen bases, Buton natural rock asphalt, asphalt rheology, short-term aging, long-term aging.*

PENDAHULUAN

Banyak faktor yang mempengaruhi baik-buruknya kinerja perkerasan jalan beraspal di lapangan. Salah satu diantaranya adalah kualitas bahan yang digunakan harus sesuai keperluan.

Menurut *Superior pavement (Superpave)*, kualitas aspal sebagai bahan pengikat pada perkerasan jalan dapat diidentifikasi melalui sifat reologi pada kondisi aspal *fresh*, penuaan jangka pendek (penuaan selama pelaksanaan) dan penuaan jangka panjang (penuaan selama masa pelayanan) dengan pendekatan mekanistik (TRB 2011). Sampai sejauh ini, sifat kimia aspal tidak dibutuhkan. Namun apabila ditemui aspal yang berdasarkan pengujian reologi diindikasikan memiliki kualitas yang tidak memenuhi persyaratan sebagai bahan pengikat pada perkerasan jalan, maka diperlukan modifikasi kimia. Dalam memodifikasi kimia aspal ini diperlukan pengetahuan mengenai hubungan yang signifikan antara sifat kimia dengan sifat reologi aspal.

Namun karena aspal terdiri dari ribuan jenis molekul hidrokarbon maka tidak mungkin untuk menganalisa kandungan tiap jenis molekul. Oleh sebab itu, analisa komposisi kimia pada aspal selalu dilakukan dengan cara fraksinasi, yaitu dengan menentukan kelompok molekul yang memiliki sifat kimia tertentu misalnya yang memiliki gugus fungsional tertentu, kereaktifan tertentu atau kepolaran tertentu.

Salah satu metoda analisa komposisi kimia aspal adalah metoda yang dikembangkan oleh Rostler dalam ASTM D2006 - 70 (ASTM 1972). Dengan metoda ini, molekul hidrokarbon dalam aspal dikelompokkan menjadi lima kelompok (fraksi) berdasarkan sifat kelarutan dalam pelarut n-pentane dan kereaktifan terhadap larutan asam sulfat dengan berbagai tingkat kepekatan. Berdasarkan metode ini maka aspal dapat dianalisa komposisinya yang terdiri dari lima fraksi yaitu aspalten (*asphaltenes*), basa nitrogen (*nitrogen bases*), acidafin pertama

(*first acidafins*), acidafin ke dua (*second acidafins*) dan parafin.

Berdasarkan kajian literatur, sampai saat ini belum diperoleh hubungan yang signifikan antara sifat kimia berdasarkan metoda Rostler tersebut dengan sifat reologi aspal. Oleh karena itu, tujuan dari tulisan ini adalah menyajikan hasil penelitian mengenai hubungan antara sifat kimia, yang dalam hal ini dibatasi hanya pada kandungan basa nitrogen saja, dengan sifat reologi aspal. Hubungan tersebut dianalisis dengan cara yang berbeda dengan yang telah dilakukan oleh Rostler maupun para peneliti lainnya selama ini sehingga diharapkan akan menghasilkan hubungan dan tingkat signifikan yang lebih baik. Hubungan yang dihasilkan adalah pengaruh kandungan basa nitrogen terhadap sifat reologi aspal yang meliputi modulus elastisitas (G'), faktor *rutting* ($G^*/\sin[\delta]$) dan modulus viskositas (G'') atau faktor retak lelah ($G^*\sin[\delta]$) dengan kondisi penuaan aspal meliputi kondisi sebelum penuaan, setelah penuaan jangka pendek dan setelah penuaan jangka panjang.

Basa nitrogen terdapat pada berbagai jenis aspal, namun pada kajian ini basa nitrogen yang digunakan berasal dari aspal alam asbuton ex-Lawele Indonesia dan dibandingkan dengan basa nitrogen dari aspal minyak ex-Kemaman Malaysia.

KAJIAN PUSTAKA

Pengertian dan sifat basa nitrogen

Basa nitrogen (*nitrogen bases, N*) adalah fraksi aspal yang terdiri dari senyawa hidrokarbon yang mengandung gugus fungsional amin (nitrogen). Senyawa ini relatif bersifat basa lemah sehingga akan bereaksi dengan asam kuat. Dengan merujuk pada analisa komposisi kimia metoda Rostler (ASTM 1972), Bullin et al. (1997) mendefinisikan senyawa basa nitrogen sebagai bagian dari aspal yang larut dalam n-pentane namun menjadi tidak larut (mengendap) setelah larutan ditambah asam sulfat 85% yang bersifat asam kuat. Sebagai konsekuensi dari definisi tersebut maka meskipun sebagian

besar bagian aspal tersebut merupakan senyawa hidrokarbon basa nitrogen namun tidak menutup kemungkinan adanya senyawa hidrokarbon lain yang termasuk dalam bagian tersebut karena turut mengendap setelah bereaksi dengan asam sulfat 85%, misalnya senyawa basa selain basa nitrogen atau senyawa yang memiliki gugus fungsional lain yang reaktif terhadap asam sulfat. Oleh sebab itu, menurut Kassir (2009) fraksi basa nitrogen tersebut juga didefinisikan sebagai senyawa polar berupa resin yang sangat reaktif yang dalam aspal berperan sebagai bahan *peptizer* aspalten atau yang memudahkan aspalten terlarut dalam aspal. Hal yang sama disampaikan pula oleh Boyer (2000) dan Petersen (2009).

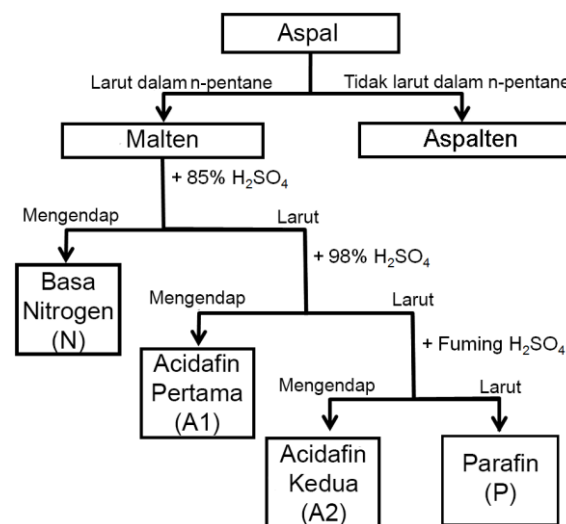
Sifat kimia aspal

Selama ini, hubungan antara fraksi aspal basa nitrogen dengan sifat reologi aspal selalu dalam bentuk bersama-sama dengan fraksi aspal lainnya. Berdasarkan metode uji Rostler (Gambar 1), selain fraksi basa nitrogen terdapat pula fraksi-fraksi aspal lainnya yang telah dijelaskan oleh Bullin et al. (1997), Boyer (2000) dan Petersen (2009) sebagai berikut:

- 1) Aspalten adalah bagian dari aspal yang tidak larut dalam pelarut n-pentana. Fungsi dari aspalten adalah sebagai *bodying agent* yang membuat aspal lebih keras dan kaku. Aspalten yang polar akan berinteraksi dengan senyawa polar lainnya yang terdapat dalam malten sehingga membentuk jaringan dan menjadi kekuatan utama pada aspal sebagai bahan pengikat pada perkerasan jalan.
- 2) Acidafin pertama adalah bagian dari aspal yang larut dalam n-pentana, tidak dapat diendapkan dengan menambahkan asam sulfat 85%, namun mengendap setelah ditambahkan asam sulfat 98%. Fungsi dari acidafin pertama ini adalah sebagai bahan pelarut bagi *peptizer* aspalten.
- 3) Acidafin kedua adalah bagian dari aspal yang larut dalam n-pentana dan tidak mengendap setelah ditambahkan asam sulfat 85% atau 98%, namun mengendap

setelah ditambah asam sulfat fuming ($H_2SO_4 + 30\% SO_3$ atau $H_2S_2O_7$). Fungsi dari acidafin kedua adalah juga sebagai bahan pelarut bagi *peptizer* aspalten bersama-sama dengan acidafin pertama.

- 4) Parafin adalah bagian dari aspal yang larut dalam n-pentana dan tidak dapat diendapkan dengan menambahkan asam sulfat 85%, asam sulfat 98% maupun asam sulfat fuming. Fungsi dari parafin adalah sebagai bahan pembentuk jel pada komponen-komponen aspal.



Sumber: ASTM (1972)

Gambar 1. Skema pengujian komposisi kimia aspal berdasarkan metode Rostler

Sebagaimana yang tampak pada Gambar 1, senyawa basa nitrogen merupakan senyawa yang paling reaktif terhadap asam sulfat. Oleh sebab itu Rostler menggolongkannya bersama acidafin pertama sebagai senyawa lebih reaktif, sedangkan acidafin kedua dan parafin digolongkan sebagai senyawa kurang reaktif. Penggolongan kereaktifan senyawa ini kemudian digunakan Rostler sebagai indikator durabilitas aspal yaitu berupa indeks durabilitas aspal yang dihitung sebagai perbandingan antara persen senyawa lebih reaktif dengan persen senyawa kurang reaktif dengan bentuk persamaan sebagaimana yang ditunjukkan pada persamaan (1) (Houston et al. 2005; Bell 1989) berikut.

$$RDR = (N+A_1)/(A_2+P) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

RDR= Rostler Durability Ratio

N = persen basa nitrogen

A₁ = persen acidafin pertama

A₂ = persen acidafin kedua

P = persen parafin

Selain Rostler, Gotolski dalam C.A. Bell (1989) juga membuat suatu perbandingan antara senyawa yang reaktif terhadap asam sulfat dengan yang kurang reaktif terhadap asam sulfat. Perbandingan ini disebut Gotolski Ratio (GR) dengan persamaan sebagaimana yang ditunjukkan pada persamaan (2) (Houston et al. 2005; Bell 1989) berikut.

$$GR = (N+A_1+A_2)/(A+P) \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

GR= Gotolski Ratio

N = persen basa nitrogen

A₁ = persen acidafin pertama

A₂ = persen acidafin kedua

P = persen parafin

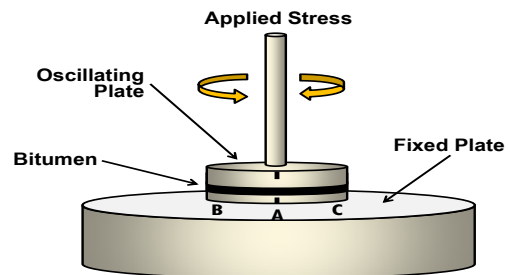
Terhadap indeks durabilitas aspal *RDR* dan *GR* tersebut, Anderson dan Dukatz (1980) berpendapat bahwa *RDR* lebih mengindikasikan sifat ketahanan aspal terhadap temperatur dan *GR* lebih menggambarkan sifat penuaan aspal. Namun, pendapat tersebut disanggah oleh Puzianuskas yang menyatakan bahwa tidak ada substansi dari pendapat Anderson dan Dukatz (1980) tersebut. Menurut Puzianuskas dalam Andersen dan Dukatz (1980), *RDR* dan *GR* hanya mengindikasikan sifat kereaktifan aspal terhadap asam sulfat saja. Peneliti lainnya, Lu dan Isacson (2002) berpendapat bahwa pada umumnya hubungan antara sifat kimia dengan sifat reologi aspal tidak konsisten. Menurut Hermadi dan Syahdanulirwan (2005), juga menurut Michalica, Daucik, dan Zanzotto (2008) hubungan antara *RDR* maupun *GR* dengan durabilitas dan kecepatan penuaan aspal meskipun ada namun tidak signifikan.

Tidak signifikannya hubungan antara *RDR* dan *GR* dengan durabilitas aspal kemungkinan disebabkan oleh hal-hal berikut:

- 1) Penuaan adalah kereaktifan aspal dengan lingkungannya terutama oksigen dan bukan kereaktifan dengan asam sulfat.
- 2) Masing-masing komponen memiliki kereaktifan yang berbeda, sedangkan persamaan *RDR* dan *GR* tidak mengakomodir perbedaan tingkat kereaktifan masing-masing komponen tersebut.
- 3) Menurut Michalica, Daucik dan Zanzotto (2008), aspalten adalah komponen yang reaktif selama penuaan. *RDR* tidak mengakomodir kandungan aspalten sedangkan *GR* mengakomodirnya namun sebagai kelompok komponen yang kurang reaktif

Sifat reologi aspal

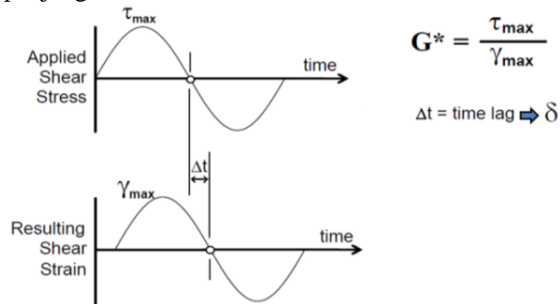
Aspal yang biasa digunakan sebagai bahan pengikat pada perkerasan lentur adalah bahan yang bersifat viskoelastis karena memiliki sifat viskos dan sekaligus elastis. Mutu aspal, yang dalam hal ini adalah ketahanan aspal terhadap *rutting* dan retak lelah, dapat diindikasikan dengan mengukur sifat-sifat reologinya. Menurut Roberts, *et al.* (1996) dan National Highway Institute (2009), ketahanan aspal tahan terhadap *rutting* dan retak lelah masing-masing secara berturut-turut dapat diindikasikan oleh nilai $G^*/\sin(\delta)$ dan $G^*\sin(\delta)$ dengan G^* adalah modulus kompleks dan δ adalah sudut fase pada pengukuran dengan menggunakan alat *Dinamyc Shear Rheometer (DSR)* sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3.



Sumber: ASTM (2011 b)

Gambar 2. Gerakan osilasi pada pengujian aspal dengan *DSR*

Pada spesifikasi aspal kelas kinerja (*Performance Grade*) yang dikembangkan oleh Superpave ASTM D6373 (ASTM 2015), sifat reologi aspal diukur pada tiga kondisi penuaan aspal yaitu sebelum mengalami penuaan, setelah penuaan jangka pendek dan setelah penuaan jangka panjang.

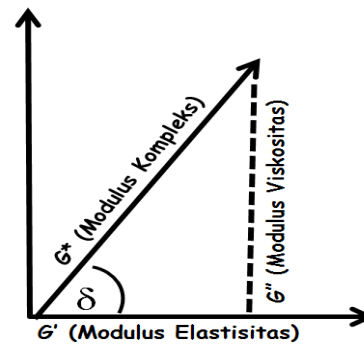


Sumber: ASTM (2011b)

Gambar 3: Tegangan (τ), regangan (γ) dan rentang waktu antara keduanya (Δt) ASTM D7175

Aspal dikategorikan tahan terhadap *rutting* jika pada temperatur maksimum perkerasan jalan dilapangan memiliki nilai $G^*/\sin(\delta)$ tidak kurang dari 1 kPa pada kondisi sebelum penuaan dan tidak kurang dari 2,2 kPa setelah penuaan jangka pendek. Sedangkan untuk dikategorikan tahan terhadap retak lelah, aspal pada temperatur medium harus memiliki nilai $G^*\sin(\delta)$ tidak lebih dari 5000 kPa.

Sifat reologi aspal lainnya yang dapat diketahui dari hasil pengujian *DSR* adalah modulus elastisitas dengan notasi G' dan modulus viskositas dengan notasi G'' sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4. Modulus elastisitas yang juga disebut *storage modulus* adalah $G^*\cos(\delta)$, sedangkan modulus viskositas yang juga disebut *loss modulus* adalah $G^*\sin(\delta)$.



Sumber: ASTM (2011b)

Gambar 4. Hubungan antara G^* , G' , G'' dan δ

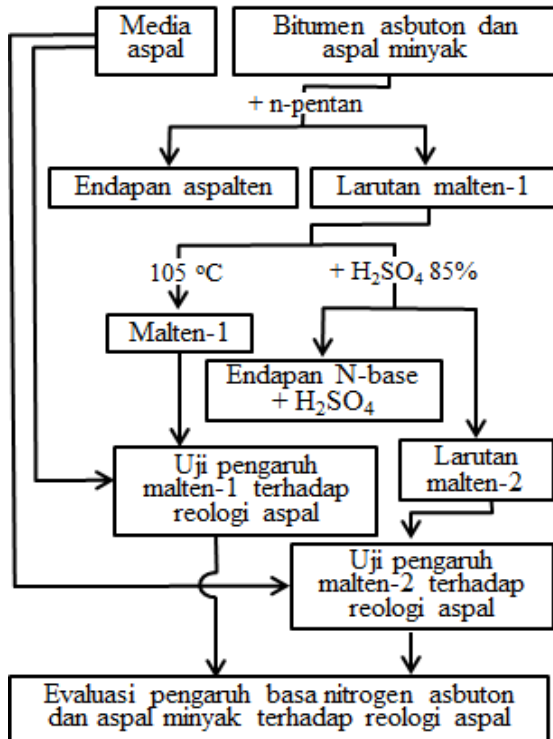
Mengenai penuaan aspal, ada dua jenis penuaan yang menjadi perhatian pada proses penuaan aspal dalam perkerasan jalan yaitu penuaan jangka pendek (*short term aging*) dan penuaan jangka panjang (*long term aging*). Penuaan jangka pendek adalah penuaan aspal selama pencampuran di Unit Pencampur Aspal (*Asphalt Mixing Plan*) hingga selesai penghaparan. Pada penelitian ini, penuaan aspal jangka pendek di laboratorium disimulasikan dengan pengujian *Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)* sesuai ASTM D2872 (ASTM 2011c). Sedangkan penuaan jangka panjang adalah penuaan aspal selama masa pelayanan di lapangan. Pada penelitian ini, penuaan aspal jangka panjang di laboratorium disimulasikan dengan pengujian menggunakan *Pressurized Aging Vessel (PAV)* sesuai ASTM D6521 (ASTM 2011a).

HIPOTESIS

Fraksi basa nitrogen dari bitumen asbuton maupun dari aspal minyak memiliki kontribusi tertentu (khas) terhadap sifat reologi aspal (G' , $G^*/\sin(\delta)$ dan G'' atau $G^*\sin(\delta)$) pada kondisi sebelum mengalami penuaan, setelah penuaan jangka pendek dan setelah penuaan jangka panjang. Selain itu dapat diduga bahwa basa nitrogen memiliki kontribusi tertentu terhadap penuaan aspal, baik penuaan jangka pendek maupun penuaan jangka panjang.

METODOLOGI

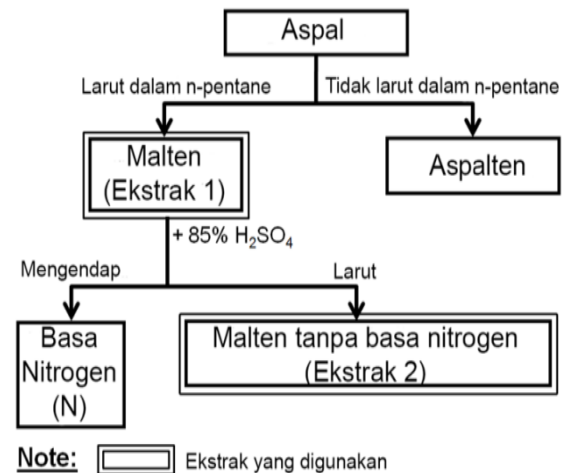
Tahapan yang dilakukan dalam mengkaji pengaruh kandungan basa nitrogen asbuton dan aspal minyak terhadap sifat reologi dan penuaan aspal adalah sebagaimana yang ditunjukkan bagan alir pada Gambar 5.



Gambar 5. Bagan alir tahapan pengkajian pengaruh basa nitrogen terhadap reologi dan penuaan aspal

Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 5, untuk mengetahui pengaruh kandungan basa nitrogen terhadap reologi dan penuaan aspal, malten-1 (yaitu bagian aspal yang larut dalam pelarut n-pentan) dan malten-2 (malten tanpa basa nitrogen karena sudah diendapkan dengan penambahan larutan H_2SO_4 85%) dari dua jenis aspal yang berbeda (bitumen asbuton dan aspal minyak) masing-masing diekstrak dan dimurnikan dari larutannya dengan cara diuapkan dalam oven $105\text{ }^\circ\text{C}$. Cara ekstraksi ini merupakan bagian dari analisa komposisi kimia aspal metode Rostler dengan skema sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 6. Selanjutnya, ekstrak malten-1 dan ekstrak malten-2 tersebut

masing-masing ditambahkan ke dalam media aspal dengan variasi persentase penambahan 0%, 5% dan 10% serta diaduk hingga homogen. Masing-masing media aspal tersebut kemudian diuji sifat reologinya dengan menggunakan alat *DSR* pada temperatur $46\text{ }^\circ\text{C}$, $52\text{ }^\circ\text{C}$, $58\text{ }^\circ\text{C}$, $64\text{ }^\circ\text{C}$, dan $70\text{ }^\circ\text{C}$, pada kondisi aspal sebelum penuaan, setelah penuaan jangka pendek, dan setelah penuaan jangka panjang. Penuaan aspal jangka pendek disimulasi dengan alat *Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)*, sedangkan penuaan aspal jangka panjang disimulasi dengan menggunakan alat *Pressure Aging Vessel (PAV)*.



Gambar 6. Ekstraksi dari malten sebelum dan sesudah ditambahkan larutan H_2SO_4 85%

Pengaruh basa nitrogen terhadap sifat reologi aspal diketahui dengan cara mengevaluasi secara statistik selisih antara pengaruh malten-1 dengan pengaruh malten-2 terhadap sifat reologi aspal pada berbagai tingkat penuaan. Dengan demikian maka faktor (variabel bebas) dan varian (variabel terikat) pada analisis ini adalah sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Faktor dan tingkat faktor pada penelitian ini

Faktor	Tingkat faktor
Jenis bitumen	Aspal minyak dan bitumen asbuton
Persen basa nitrogen	0%, 5% dan 10%
Temperatur pengujian sifat reologi (<i>DSR</i>)	46 ⁰ C, 52 ⁰ C, 58 ⁰ C, 64 ⁰ C, dan 70 ⁰ C
Kondisi penuaan aspal	Sebelum penuaan, setelah <i>RTFOT</i> , dan setelah <i>PAV</i>

Tabel 2. Varian pada penelitian ini

Varian	Keterangan
G*	Modulus kompleks
δ	Sudut fasa
G'	Modulus elastisitas
G'' atau G* $\sin(\delta)$	Modulus viskositas atau faktor retak <i>lelah</i>
G*/ $\sin(\delta)$	Faktor <i>rutting</i>

Metode yang dilakukan pada penelitian ini berbeda dengan metoda yang sudah dilakukan. Pada umumnya penelitian pengaruh basa nitrogen dilakukan dengan menganalisis kandungan fraksi basa nitrogen dari sejumlah contoh aspal kemudian dikorelasikan dengan sifat-sifat reologi aspal tersebut (Demirabs 2002; Kumar, Krisnan, and Veeragavan 2009; Michalica, Daucik, and Zanzotto 2008). Cara ini tidak akurat karena tinggi rendahnya kandungan fraksi basa nitrogen akan berpengaruh langsung terhadap tinggi rendahnya kandungan fraksi lainnya dalam aspal tersebut. Akibatnya, perubahan sifat reologi aspal menjadi bias, apakah karena perubahan kandungan fraksi basa nitrogen atau karena perubahan kandungan fraksi lainnya.

Untuk menghindari pengaruh bias tersebut maka metoda yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan cara mengekstraksi terlebih dahulu fraksi senyawa basa nitrogen, kemudian ditambahkan ke dalam suatu media aspal dengan berbagai kadar penambahan, selanjutnya beru diuji sifat reologi pada berbagai tingkat penuaan serta dianalisis hubungannya antara kandungan basa

nitrogen dengan sifat reologi dan penuaan aspal.

HASIL DAN ANALISIS

Sifat bahan yang digunakan

Sifat dari aspal minyak dan bitumen asbuton yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3: Sifat dari aspal minyak

Sifat aspal	Metoda uji	Hasil
Penetrasi pada 25 ⁰ C, 100 g, 5 sec; dmm	SNI 06-2456-2011	95
Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃ ; %	RSNI M-04-2004	99,5
Kandungan air; %	SNI 2490-2008	0.0
Penurunan berat setelah pemanasan (<i>RTFOT</i>); %	SNI 03-6835-2002	0,035
Penetrasi setelah <i>RTFOT</i> , % orisinal	SNI 06-2456-2011	76,9

Tabel 4: Sifat dari bitumen asbuton

Sifat aspal	Metoda uji	Hasil
Penetrasi pada 25 ⁰ C, 100 g, 5 sec; dmm	SNI 06-2456-2011	85
Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃ ; %	RSNI M-04-2004	99,2
Kandungan air; %	SNI 2490-2008	0.0
Penurunan berat setelah pemanasan (<i>RTFOT</i>); %	SNI 03-6835-2002	1,530
Penetrasi setelah <i>RTFOT</i> , % orisinal	SNI 06-2456-2011	65,2

Hasil analisis faktorial

Pengaruh dari faktor-faktor (jenis aspal sumber basa nitrogen, persen basa nitrogen, temperatur pengujian reologi, tingkat penuaan) terhadap varian (G* dan δ) dianalisis secara statistik dengan menggunakan analisis faktorial. Hasil analisis faktorial ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Berdasarkan Tabel 5 dan 6, pengaruh faktor jenis aspal sumber basa nitrogen terhadap G* dan δ tidak signifikan yang berarti juga tidak signifikan pengaruhnya terhadap semua besaran turunan dari G* dan δ seperti

G' yang sama dengan $G^* \cos(\delta)$, G'' yang sama dengan $G^* \sin(\delta)$ serta $G^*/\sin(\delta)$. Oleh sebab itu maka faktor jenis aspal ini pada analisis berikutnya tidak perlu disertakan.

Pengaruh basa nitrogen terhadap G^* tidak signifikan namun terhadap δ signifikan sehingga pada analisis berikutnya tetap disertakan karena pengaruhnya akan signifikan pada semua besaran turunan δ .

Faktor persen basa nitrogen, temperatur pengujian reologi dan tingkat penuaan aspal memiliki pengaruh yang signifikan terhadap G^* dan δ sehingga ketiga faktor tersebut disertakan pada analisis selanjutnya.

Tabel 5. Hasil analisis faktorial pengaruh basa nitrogen dan faktor lainnya terhadap modulus kompleks (G^*)

Faktor	df	Sum of squares	Mean square	Signifikan
Jenis aspal sumber basa nitrogen	1	3,688E10	3,688E10	0,478 *)
Persen basa nitrogen	4	2,423E11	6,057E10	0,397 *)
Temperatur pengujian reologi	7	3,292E14	4,703E13	0,000
Tingkat penuaan	2	6,433E11	3,216E11	0,005

*) Tidak signifikan karena nilai signifikannya lebih dari 0,05 dengan taraf kepercayaan 95%

Tabel 6. Hasil analisis faktorial pengaruh basa nitrogen dan faktor lainnya terhadap sudut fasa (δ)

Faktor	df	Sum of squares	Mean square	Signifikan
Jenis aspal sumber basa nitrogen	1	1,711	1,711	0,521 *)
Persen basa nitrogen	4	351,545	87,886	0,000
Temperatur pengujian reologi	7	225407	32201,0	0,000
Tingkat penuaan	2	53345	26672,7	0,000

*) Tidak signifikan karena nilai signifikannya lebih dari 0,05 dengan taraf kepercayaan 95%

Hasil analisis regresi

Berdasarkan analisis linearitas, hubungan faktor kandungan basa nitrogen (N) dan temperatur pengujian reologi (T) dengan varian G' , $G^*/\sin(\delta)$ dan $G^* \sin(\delta)$ adalah merupakan hubungan yang tidak linear karena memiliki nilai signifikansi dari deviasi linearitas lebih kecil dari nilai kritis 0,05. Hubungan tersebut merupakan hubungan eksponensial sehingga setelah nilai varian diubah ke dalam bentuk logaritma natural maka bentuk hubungan menjadi linear sebagaimana data hasil uji linearitas yang disajikan pada Tabel 7 yang menunjukkan nilai signifikansi dari deviasi linearitas lebih besar dari nilai kritis 0,05. Oleh sebab itu dalam analisis multi regresi, sifat reologi aspal diubah ke dalam bentuk logaritma natural (ln) sehingga bentuk persamaannya menjadi seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3). Adapun hasil dari analisis multi regresi tersebut untuk kondisi aspal sebelum penuaan, setelah penuaan jangka pendek dan setelah penuaan jangka panjang, masing-masing adalah sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 8, Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 7. Hasil uji linearitas

Faktor	Signifikansi dari deviasi linearitas		
	ln G'	ln G''	ln [$G^*/\sin(\delta)$]
Sebelum penuaan:			
Persen Basa nitrogen	0.922	0.993	0.993
Temperatur	0.561	0.788	0.744
Setelah penuaan jangka pendek (RTFOT):			
Persen Basa nitrogen	0.999	0.997	0.997
Temperatur	0.759	0.915	0.866
Setelah penuaan jangka panjang (PAV):			
Persen Basa nitrogen	0.999	0.982	0.997
Temperatur	0.866	0.111	0.447

Model persamaan regresi:

$$\ln Y = aN + bT + c \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- Y = reologi aspal (G' , G'' atau $G^*/\sin(\delta)$, dan $G^*\sin(\delta)$)
- N = persentase basa nitrogen
- T = temperatur pengujian
- a = koefisien N
- b = koefisien T
- c = Konstanta

Tabel 8. Koefisien regresi pada kondisi aspal sebelum penuaan

Koefisien	Reologi aspal (Y)		
	ln G'	ln G''	ln (G*/sin(δ))
Koefisien determinasi (R ²)	0,989	0,994	0,994
Koefisien basa nitrogen (a) ^{*)}	-0,054	-0,012	-0,014
Koefisien temperatur (b) ^{*)}	-0,198	-0,138	-0,139
Konstanta (c) ^{*)}	16,732	16,018	16,070

Catatan: ^{*)} a, b dan c adalah sebagaimana yang terdapat pada persamaan (3)

Tabel 9. Koefisien regresi pada kondisi penuaan aspal jangka pendek (RTFOT)

Koefisien	Reologi aspal (Y)		
	ln G'	ln G''	ln [G*/sin(δ)]
Koefisien determinasi (R ²)	0,990	0,994	0,994
Koefisien basa nitrogen (a) ^{*)}	-0,181	-0,068	-0,079
Koefisien temperatur (b) ^{*)}	-0,191	-0,133	-0,136
Konstanta (c) ^{*)}	17,765	16,397	16,602

Catatan: ^{*)} a, b dan c adalah sebagaimana yang terdapat pada persamaan (3)

Tabel 10. Koefisien regresi pada kondisi penuaan aspal jangka panjang (PAV)

Koefisien	Reologi aspal (Y)		
	ln G'	ln G''	ln (G*/sin(δ))
Koefisien determinasi (R ²)	0,988	0,979	0,990
Koefisien basa nitrogen (a) ^{*)}	-0,004	0,102	0,057
Koefisien temperatur (b) ^{*)}	-0,160	-0,114	-0,143
Konstanta (c) ^{*)}	17,759	16,300	18,058

Catatan: ^{*)} a, b dan c adalah sebagaimana yang terdapat pada persamaan (3)

PEMBAHASAN

Sifat bahan yang digunakan

Aspal minyak yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal minyak dari kilang Kemaman Malaysia. Aspal tersebut memiliki nilai penetrasi 95 dmm (Tabel 3) yang berarti kelas penetrasi 80-100. Di Indonesia, aspal dengan penetrasi 80-100 sejak tahun delapan-puluhan sudah tidak digunakan lagi. Namun di beberapa negara tetangga, seperti Malaysia yang juga memiliki iklim tropis seperti Indonesia, masih menggunakannya.

Selain aspal minyak, juga digunakan bitumen hasil ekstraksi dan pemulihan (*recovery*) dari *raw material* asbuton Lawele. Bitumen tersebut memiliki nilai penetrasi 85 dmm (Tabel 4) yang berarti juga memiliki kelas penetrasi 80-100, namun dengan nilai penurunan berat akibat pemanasan (RTFOT) 1,530% yang berarti kandungan minyak ringannya masih tinggi kalau digunakan sebagai bahan pengikat pada perkerasan jalan yaitu di atas syarat maksimum 0,8%.

Kedua jenis aspal tersebut, pada penelitian ini bukan untuk digunakan sebagai bahan pengikat pada perkerasan jalan tetapi untuk diambil faksi basa-nitrogennya dengan cara diekstraksi berdasarkan metoda Rostler. Karena sumber masing-masing aspal tersebut berbeda, yaitu yang satu dari *crude oil* timur tengah (yang diolah oleh Petronas di Kemaman) dan yang lainnya dari aspal alam

asbuton di Pulau Buton, maka dapat dianggap basa nitrogen yang diperoleh dari masing-masing aspal dapat lebih mewakili variasi aspal.

Hasil analisis faktorial

Berdasarkan hasil analisis faktorial (Tabel 5 dan Tabel 6), ternyata dapat diketahui bahwa faktor jenis aspal sebagai sumber basa nitrogen tidak signifikan mempengaruhi G^* maupun δ . Ini berarti fraksi basa nitrogen yang diekstrak dari aspal minyak maupun dari bitumen asbuton memiliki pengaruh yang relatif sama terhadap sifat reologi aspal. Dengan demikian, dapat diharapkan pula bahwa pengaruh basa nitrogen terhadap sifat reologi aspal yang diperoleh pada penelitian ini dapat berlaku umum untuk semua jenis basa nitrogen meskipun berasal dari jenis aspal yang berbeda.

Faktor lainnya (kandungan basa nitrogen, temperatur pengujian dan tingkat penuaan) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat reologi aspal. Oleh sebab itu perlu dianalisis lebih lanjut agar diperoleh besarnya pengaruh dari masing-masing faktor tersebut.

Hasil analisis regresi

Tabel 7 menunjukkan bahwa bentuk hubungan antara faktor dengan logaritma natural dari nilai varian adalah linear karena hasil uji linearitas menunjukkan nilai signifikan yang diperoleh lebih besar dari nilai kritis 0,05 yang artinya, pada taraf kepercayaan 95% deviasi atau penyimpangan yang terjadi pada hubungan linear tersebut tidak signifikan.

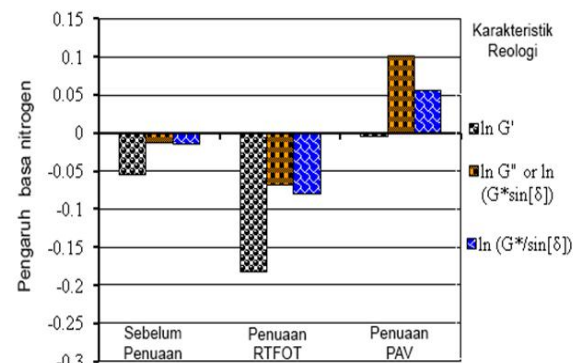
Tabel 8, Tabel 9 dan Tabel 10 menunjukkan bahwa koefisiensi determinasi (R^2) dari persamaan regresi antara faktor (persentase basa nitrogen dan temperatur) dengan varian (sifat reologi aspal) adalah minimum 0,979, maksimum 0,994, dan rata-rata 0,990. Ini artinya persamaan-persamaan regresi yang diperoleh dari hasil analisis ini dapat memprediksi sifat reologi aspal

minimum 97,9%, maksimum 99,4% dan rata-rata 99,0%. Selain itu, karena memiliki nilai signifikan lebih kecil dari 0,05 maka dapat diketahui bahwa terdapat hubungan fungsional yang signifikan antara persentase basa nitrogen dan temperatur pengujian dengan sifat reologi aspal.

Pengaruh basa nitrogen pada sifat reologi aspal

Berdasarkan hasil analisis koefisien basa nitrogen pada Tabel 8 hingga 10, pengaruh kandungan basa nitrogen pada sifat reologi aspal pada kondisi sebelum penuaan, setelah penuaan jangka pendek dengan *RTFOT*, dan setelah penuaan jangka panjang dengan *PAV* dapat dilihat pada Gambar 7.

Gambar 7 menunjukkan bahwa pada kondisi sebelum penuaan, penambahan basa nitrogen terhadap aspal menyebabkan berkurangnya sifat reologi aspal (G' , $G^*/\sin(\delta)$ dan $G^*\sin(\delta)$). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh sifat basa nitrogen yang lebih lunak dari aspal sehingga makin tingginya kandungan basa nitrogen menyebabkan aspal menjadi lebih non-elastis, viskositas lebih rendah, lebih tidak tahan terhadap alur namun lebih tahan terhadap retak.



Gambar 7. Pengaruh basa nitrogen terhadap sifat reologi aspal pada berbagai tingkat penuaan

Pada kondisi setelah mengalami penuaan jangka pendek dengan *RTFOT*, dibanding dengan pada kondisi sebelum mengalami penuaan, makin tinggi kandungan basa nitrogen

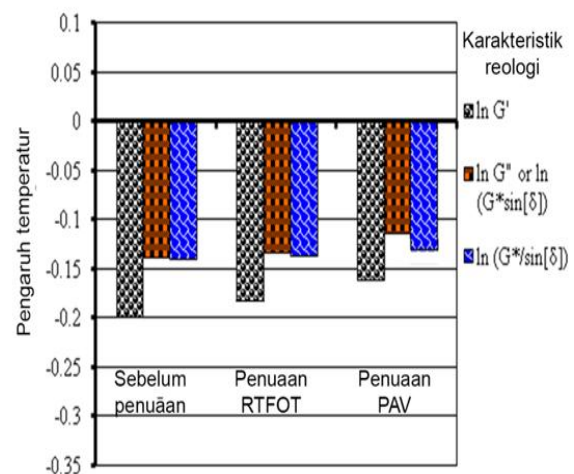
dalam aspal menyebabkan aspal setelah *RTFOT* memiliki sifat reologi (G' , $G''/\sin(\delta)$ dan $G''\sin(\delta)$) yang lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh terdegradasinya senyawa basa nitrogen akibat mengalami pemanasan yang tinggi (163°C) selama masa penuaan jangka pendek dengan *RTFOT*.

Dalam teori organik, molekul basa nitrogen dapat berperan sebagai bahan anti pengelupasan (*anti-stripping agent*) yang menyebabkan interaksi antar molekul menjadi kuat. Selama masa penuaan jangka pendek, molekul basa nitrogen dapat terpecah dan sifat anti pengelupasannya hilang. Interaksi antar molekul menjadi lebih lemah dan tidak elastis. Hal ini sejalan dengan yang dijelaskan oleh Castano *et al.* (2004). Mereka mengatakan bahwa bahan anti pengelupasan berbahan dasar senyawa organik nitrogen seperti *fatty amines*, *fatty amindo-amines* atau *fatty imidazoline* (basa nitrogen), kurang tahan terhadap suhu tinggi antara 150°C sampai dengan 180°C . Pada suhu tersebut, senyawa basa nitrogen akan mengalami degradasi menjadi molekul-molekul yang lebih kecil dan sehingga lunak.

Pengaruh kandungan basa nitrogen terhadap sifat reologi aspal setelah mengalami penuaan jangka panjang dengan *PAV* terlihat meningkat, baik dibanding dengan sifat reologi aspal sebelum mengalami penuaan maupun dengan sifat reologi aspal setelah mengalami penuaan jangka pendek dengan *RTFOT*. Hal ini mengindikasikan bahwa selama penuaan jangka panjang dengan *PAV*, terjadi proses oksidasi pada senyawa basa nitrogen sehingga menjadi lebih keras.

Pengaruh temperatur pada sifat reologi aspal

Tabel 8 hingga Tabel 10 juga mengindikasikan pengaruh temperatur pengujian pada sifat reologi aspal pada kondisi sebelum penuaan, setelah penuaan jangka pendek dengan *RTFOT*, dan setelah penuaan jangka panjang dengan *PAV*. Pengaruh temperatur pengujian pada sifat reologi aspal tersebut dapat dilihat pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Pengaruh temperatur terhadap sifat reologi aspal pada berbagai tingkat penuaan

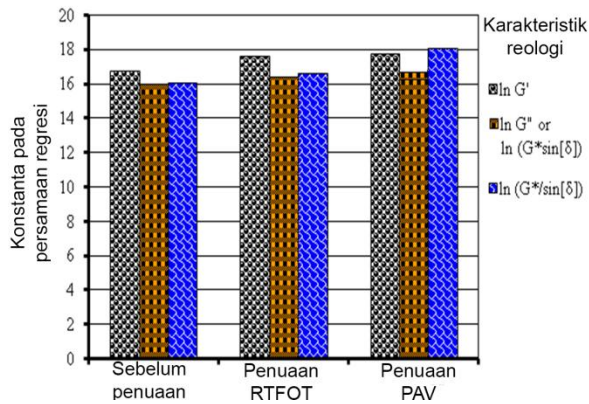
Pada Gambar 8, dapat dilihat pengaruh dari temperatur pengujian pada sifat reologi aspal pada semua kondisi penuaan adalah negatif. Artinya, pada temperatur yang lebih tinggi, sifat reologi aspal menjadi lebih rendah. Kemudian, pengaruh dari temperatur pengujian pada modulus elastisitas ($\ln G'$) lebih negatif dibandingkan dengan modulus viskositas ($\ln G''$), yang artinya peningkatan temperatur menyebabkan aspal menjadi kurang elastis dan penurunan temperatur menyebabkan aspal menjadi lebih elastis.

Gambar 8 juga menunjukkan bahwa pengaruh temperatur pengujian pada sifat reologi aspal berkurang pada kondisi setelah penuaan. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tua, aspal menjadi semakin tidak sensitif terhadap temperatur.

Pengaruh dari konstanta pada sifat reologi aspal

Tabel 8 hingga Tabel 10 juga menunjukkan nilai konstanta yang mengindikasikan pengaruh dari faktor *non-treatment* atau dalam hal ini media aspal yang digunakan pada penelitian ini terhadap sifat reologi aspal pada kondisi sebelum penuaan, setelah penuaan jangka pendek dengan *RTFOT*, dan setelah penuaan jangka panjang dengan *PAV*. Pengaruh media terhadap sifat

reologi aspal pada berbagai tingkat penuaan dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Pengaruh konstanta terhadap sifat reologi aspal pada berbagai tingkat penuaan

Gambar 9 menunjukkan bahwa penuaan juga terjadi pada media aspal yang menyebabkan aspal menjadi lebih elastis (G'), lebih viskos (G''), lebih tahan terhadap alur ($G^*/\sin(\delta)$) namun lebih tidak tahan terhadap retak ($G^*\sin(\delta)$).

Kontribusi persentase basa nitrogen terhadap indeks penuaan aspal

Sifat penuaan aspal dapat diidentifikasi dengan Indeks Penuaan (*Aging Index*). Pada umumnya Indeks Penuaan aspal didefinisikan sebagai perbandingan antara viskositas aspal sesudah penuaan dengan viskositas aspal sebelum penuaan (Kumar, Krishnan, and Veeraragavan 2009; Hunter 2000; Shell Bitumen 2013). Definisi ini mengindikasikan bahwa makin besar nilai Indeks Penuaan aspal maka makin besar perubahan sifat aspal menjadi lebih keras akibat penuaan. Definisi yang berbeda disampaikan oleh Hunter (2000) yang mendefinisikan Indeks Penuaan aspal sebagai perbandingan kompleks modulus aspal setelah penuaan dengan kompleks modulus aspal sebelum penuaan. Ali, Mashaan dan Karim (2013) mendefinisikan Indeks Penuaan aspal menjadi lebih umum yaitu sebagai perbandingan sifat aspal antara sesudah penuaan dengan sebelum penuaan.

Pada tulisan ini Indeks Penuaan aspal didefinisikan sebagai perbandingan sifat reologi aspal (dalam hal ini G' , $G^*/\sin(\delta)$ atau $G^*\sin(\delta)$) antara sesudah penuaan dengan sebelum penuaan. Definisi ini digunakan karena sifat reologi tersebut merupakan indikator mekanisitas dari mutu aspal untuk perkerasan jalan sebagaimana yang direkomendasikan *Superpave* (Roberts 1996). Dengan demikian maka Indeks Penuaan (*Aging Index* atau disingkat *AI*) dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$AI = (\text{Reologi}_{\text{setelah penuaan}}) / (\text{Reologi}_{\text{sebelum penuaan}}) \dots (4)$$

Kontribusi kandungan basa nitrogen terhadap Indeks Penuaan aspal dapat diubah dengan memasukkan persamaan (3) ke dalam persamaan (4) sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$AI = Y_{\text{setelah penuaan}} / Y_{\text{sebelum penuaan}} \dots (5)$$

$$AI = \text{Exp} \{ (aN + bT + c)_{\text{setelah penuaan}} - (aN + bT + c)_{\text{sebelum penuaan}} \} \dots (6)$$

$$AI = \text{Exp} \{ (a_{\text{setelah penuaan}} - a_{\text{sebelum penuaan}})N + (b_{\text{setelah penuaan}} - b_{\text{sebelum penuaan}})T + (c_{\text{setelah penuaan}} - c_{\text{sebelum penuaan}}) \} \dots (7)$$

Pada persamaan (7) dapat dijelaskan bahwa $(a_{\text{setelah penuaan}} - a_{\text{sebelum penuaan}})$ adalah kontribusi persen basa nitrogen (N) terhadap $\ln AI$, $(b_{\text{setelah penuaan}} - b_{\text{sebelum penuaan}})$ adalah kontribusi temperatur pengujian terhadap $\ln AI$ atau dapat pula disebut sebagai sensitifitas $\ln AI$ terhadap temperatur pengujian, dan $(c_{\text{setelah penuaan}} - c_{\text{sebelum penuaan}})$ adalah kontribusi konstanta yang mengindikasikan kontribusi dari media aspal yang digunakan terhadap AI .

Dengan memasukkan data persamaan regresi pada Tabel 8 dan Tabel 9 ke dalam persamaan (7) dapat diketahui kontribusi persen basa nitrogen, kontribusi temperatur pengujian dan kontribusi konstanta terhadap $\ln AI$ sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Kontribusi persen basa nitrogen, tempera-tur pengujian dan konstanta terhadap $\ln AI$

	Natural Logaritma dari		
	G'	G''	$G^*/\sin(\delta)$
Setelah Penuaan RTFOT:			
($a_{\text{setelah penuaan}} - a_{\text{sebelum penuaan}}$)	-0,127	-0,056	-0,065
($b_{\text{setelah penuaan}} - b_{\text{sebelum penuaan}}$)	0,007	0,005	0,003
($c_{\text{setelah penuaan}} - c_{\text{sebelum penuaan}}$)	1,033	0,379	0,532
Setelah Penuaan PAV:			
($a_{\text{setelah penuaan}} - a_{\text{sebelum penuaan}}$)	0,050	0,114	0,071
($b_{\text{setelah penuaan}} - b_{\text{sebelum penuaan}}$)	0,038	0,024	-0,004
($c_{\text{setelah penuaan}} - c_{\text{sebelum penuaan}}$)	1,027	0,282	1,988

Berdasarkan Tabel 10 dapat diformulasikan pengaruh persen basa nitrogen, temperatur pengujian dan media aspal terhadap indeks penuaan yaitu sebagai berikut:

Persamaan regresi AI pada penuaan $RTFOT$ berdasarkan modulus elastisitas (G'):
 $AI = \text{Exp} (-0,127N + 0,007T + 1,033) \dots\dots (8)$

Persamaan regresi AI pada penuaan $RTFOT$ berdasarkan modulus viskositas (G'') atau faktor lelah ($G^*\sin(\delta)$):
 $AI = \text{Exp} (-0,056N + 0,005T + 0,379) \dots (9)$

Persamaan regresi AI pada penuaan $RTFOT$ berdasarkan faktor alur ($G^*/\sin(\delta)$):
 $AI = \text{Exp} (-0,065N + 0,003T + 0,532) \dots (10)$

Persamaan regresi AI pada penuaan PAV berdasarkan modulus elastisitas (G'):
 $AI = \text{Exp} (0,050N + 0,038T + 1,027) \dots\dots (11)$

Persamaan regresi AI pada penuaan PAV berdasarkan modulus viskositas (G'') atau faktor lelah ($G^*\sin[\delta]$):
 $AI = \text{Exp} (0,114N + 0,024T + 0,282) \dots\dots\dots (12)$

Persamaan regresi AI pada penuaan PAV berdasarkan faktor alur ($G^*/\sin(\delta)$):
 $AI = \text{Exp} (0,071N - 0,004T + 1,988) \dots\dots\dots(13)$

Koefisien N (basa nitrogen) yang terdapat pada persamaan (8) sampai dengan

(13) menunjukkan kontribusi basa nitrogen terhadap Indeks Penuaan aspal (AI). Pada penuaan jangka pendek dengan $RTFOT$, koefisien N bernilai negatif. Hal ini menunjukkan kontribusi basa nitrogen pada aspal adalah melunakkan. Sedangkan pada penuaan jangka panjang dengan PAV , koefisien N bernilai positif yang berarti kontribusi basa nitrogen pada aspal adalah meningkatkan kekerasan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan data dan pembahasan yang telah disampaikan maka dapat diambil kesimpulan bahwa kandungan basa nitrogen dari aspal minyak maupun dari bitumen asbuton memiliki pengaruh yang sama terhadap sifat reologi dan penuaan aspal. Kandungan basa nitrogen yang lebih tinggi menyebabkan nilai reologi aspal menjadi lebih rendah (lebih lunak) pada kondisi aspal sebelum penuaan dan setelah penuaan jangka pendek. Sedangkan pada kondisi penuaan aspal jangka panjang, nilai reologi aspal menjadi lebih tinggi (lebih keras). Bila dibandingkan dengan kondisi aspal sebelum penuaan, pada kondisi aspal setelah penuaan jangka pendek kandungan basa nitrogen lebih menurunkan sifat reologi aspal. Hal ini mengindikasikan selama proses penuaan jangka pendek telah terjadi degradasi pada senyawa basa nitrogen menjadi senyawa yang lebih kecil dan lebih lunak. Sedangkan pada kondisi aspal setelah penuaan jangka panjang, pengaruh kandungan basa nitrogen meningkatkan sifat reologi aspal. Hal ini disebabkan oleh terjadinya reaksi oksidasi sebagaimana yang terjadi pada proses penuaan aspal pada umumnya.

Saran

Pengaruh kandungan basa nitrogen terhadap sifat reologi dan penuaan aspal ini sebaiknya ditindak lanjuti dengan melakukan kajian berikutnya yang menggunakan basa nitrogen dari berbagai jenis aspal lainnya. Selain itu, agar dapat dilakukan rekayasa komposisi kimia untuk mendapatkan sifat

reologi aspal yang diinginkan secara komprehensif maka perlu dilakukan kajian mengenai pengaruh senyawa komponen aspal lainnya terhadap sifat reologi dan penuaan aspal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya tidak lupa disampaikan kepada pihak-pihak yang telah membantu mewujudkan tulisan ini yaitu, Prof. Kemas Ahmad Zamhari, Ir. Nono, M.Eng. Sc., pihak Universitas Tun Hussein On Malaysia dan pihak Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan.

DAFTAR PUSTAKA

- American Standard Testing Materials. 1972. "Standard Method for Testing for Characteristic Groups in Rubber Extender and Processing Oils by the Precipitation Method". ASTM D2006-70. *1972 Annual Book of ASTM Standards*. Part 2B. Philadelphia: ASTM.
- _____. 2011a. "Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)". ASTM D6521-08. *2011 Annual Book of ASTM Standards. Section Four Construction*. West Conshohocken: ASTM.
- _____. 2011b. "Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer" ASTM D7175-08. *2011 Annual Book of ASTM Standards. Section Four Construction*. West Conshohocken: ASTM.
- _____. 2011c. "Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)". ASTM D2872-08. *2011 Annual Book of ASTM Standards. Section Four Construction*. West Conshohocken: ASTM.
- _____. 2015. "Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder". *2015 Annual Book of ASTM Standards*. ASTM D6373-15. West Conshohocken: ASTM.
- Ali, A. H., N. S., Mashaan, and M. R. Karim. 2013. "Investigations of Physical and Rheological Properties of Aged Rubberised Bitumen". *Advances in Materials Science and Engineering Journal*. pp 1-7.
- Badan Standardisasi Nasional. 2002: *Metode Pengujian kadar air dan fraksi ringan dalam campuran perkerasan beraspal*. SNI 03-6752-2002. Jakarta: BSN.
- _____. 2011. *Cara uji penetrasi bahan-bahan bitumen*. SNI 06-2456-2011. Jakarta: BSN.
- _____. 2008. *Cara uji kadar air dalam produk minyak dan bahan mengandung aspal dengan cara penyulingan*. SNI 2490-2008. Jakarta: BSN.
- _____. 2002. *Metode pengujian pengaruh panas dan udara terhadap lapis tipis aspal yang diputar*. SNI 03-6835-2002. Jakarta: BSN.
- Bell, C. A. 1989. *Summary Report on Aging of Asphalt-Aggregate Systems*. Oregon: Oregon State University.
- Boyer, R.E. 2000. *Asphalt Rejuvenators "Fact or Fable"*. Lexington: Asphalt Institute.
- Bullin, J. A., R.R. Davinson, C.J. Glover., J. Chaffin, M. Liu and R. Madrid . 1997. *Development of Superior Asphalt Recycling Agents*. Texas: Texas Transportation Institute .
- Castaño, N., P. Ferré, F.Fossas, and A. Puñet. 2004. "A Real Heat Bitumen Antistripping Agent" In *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*. Sun City:CAPSA.
- Demirabs, A. 2002. "Asphaltene yields from five types of fuels via different methods". *International Journal of Energy Conversion and Management*. Vol. 43, halaman 1091–1097.
- Hermadi, M. dan M. Syahdanulirwan. 2005.

- “Hubungan Antara Indeks Durabilitas dengan Durabilitas Aspal”, *Jurnal Jalan dan Jembatan*. 22 (3): 84-92.
- Houston, W. N., M.W. Mirza, C.E. Zapata and S. Raghavendra. 2005. *Environmental Effects in Pavement Mix and Structural Design Systems*. NCHRP Project 9-23 Part-1. Washington, D.C.: TRB.
- Hunter, R. N. 2000. *Asphalts in Road Construction*. London: Thomas Telford Publishing.
- Kassir, A. F. 2009. “Fractional Chemical Composition of Asphalt as a Function of Its Durability” *IBN AL-HAITHAM J. FOR PURE & APPL. SCI*. VOL. 22 (4). Bagdad: University of Bagdad.
- Kumar, S. A., J. M. Krishnan, and A. Veeraragavan. 2009. “Efficient Transportation and Pavement Systems” Chapter 41 In *Steady Shear Properties of a Class of Aged Bitumens*. London: Taylor & Francis Group.
- Lu, X. and U. Isacson. 2002. “Effect of Ageing on Bitumen Chemistry and Rheology”. *Construction and Building Materials Journal*. 16: 15-22.
- Michalica, Daucik, and Zanzotto. 2008. “Monitoring of Compositional Changes Occurring During The Oxidative Aging of Two Selected Asphalts from Different Sources”. *Petroleum & Coal*. 2(50): 1-10.
- National Highway Institute. 2009. *Superpave Fundamentals Reference Manual*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- Petersen, J. C. 2009. *A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation*. Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Roberts, F. L., P.S. Kandhal, E.R. Brown, D.Y. Lee, and T.W. Kennedy. 1996. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. Lanham: NAPA Education Foundation.
- Shell Bitumen. 2013. *The Shell Bitumen Hand Book*. Fifth Edition. London: Thomas Telford Publishing.
- Transportation Research Board, 2011. *A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. Report 673. Washington D.C.: Transportation Research Board.