

**KAJIAN PENGARUH MODULUS RESILIEN DAN KEPADATAN
MEMBAL, TERHADAP KEKUATAN DAN KEAWETAN
PERKERASAN BERASPAL PANAS
(A STUDY OF EFFECT THE RESILIENT MODULUS AND REFUSAL
DENSITY OF HOT MIX ASPHALT PAVEMENT ON THE STRENGTH
AND DURABILITY)**

A.Tatang Dachlan¹⁾, M.Sjahdanulirwan²⁾

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Jln. A.H. Nasution No. 264 Bandung 40294
E-mail: atatangd@yahoo.com¹⁾, msjahdanulirwan@yahoo.co.id²⁾
Diterima : 09 Januari 2012; Disetujui : 04 April 2012

ABSTRAK

Kinerja campuran beraspal panas biasanya diukur antara lain dengan parameter Marshall, namun belakangan ini perkembangan spesifikasi campuran beraspal dituntut harus memenuhi parameter lain seperti rongga dalam campuran berdasarkan kepadatan membal (refusal density), serta uji modulus elastisitas. Tuntutan tersebut yang disimulasikan dalam suatu kinerja struktur perkerasan jalan, harus kuat dan awet. Hasil percobaan lapangan dan kajian laboratorium terhadap campuran beraspal menunjukkan bahwa untuk memenuhi persyaratan kinerja tersebut, agregat yang digunakan harus memenuhi persyaratan gradasi tertentu dengan memperhatikan posisi kurva Fuller dan aspalnya harus lebih tahan terhadap beban berat yaitu memiliki titik lembek yang relatif tinggi atau penetrasi rendah. Hasil percobaan lapangan membuktikan bahwa campuran beraspal yang dirancang dengan kepadatan membal disertai dengan mutu bahan yang memenuhi persyaratan, dapat mencapai umur rencana. Hasil uji laboratorium terhadap campuran AC-WC dan AC-Base menunjukkan bahwa gradasi campuran yang memotong kurva Fuller mempunyai nilai stabilitas dan Modulus Elastisitas yang lebih tinggi. Nilai Modulus Elastisitas dapat diperkirakan berdasarkan parameter Marshall Quotient dengan suatu faktor kalibrasi. Makalah ini menguraikan lebih rinci aspek kekuatan dan keawetan perkerasan beraspal, ditinjau dari Modulus Elastisitas, kepadatan membal, temperatur serta komposisi campuran dan kinerjanya.

Kata Kunci: perkerasan beraspal, modulus elastis, Marshall, kepadatan membal, kekuatan, keawetan.

ABSTRACT

The performance structure of the hot mix asphalt are usually measured by parameters such as Marshall, but in the recent developments, the requirement of the hot mix asphalt specifications should meet the other parameters such as voids in mix based on refusal density test, and considering the result of modulus of elasticity test. The demands simulated in a performance of road pavement structure, should be strong and durable. The field trials and studies results show that, to meet the performance of hot mix asphalt requirements, and specified aggregate grading, by considering the position of Fuller curve, and the asphalt binder selected has more resistant to heavy loads, having a relatively high softening point, or low penetration. The study results show that the hot mix asphalt designed with refusal density, and that the quality materials meet the requirements, then the pavement

is relatively durable and can reach its design life. The results of laboratory tests on Asphalt Concrete –Wearing Course (AC-WC) and AC-Base showed that the grading of asphalt mixes, which crosses the Fuller curve, has a higher stability and modulus of elasticity. The value of modulus elasticity can be estimated based on the parameters of Marshall Quotient with a multiplier factor. This paper describes more detail the strength and durability aspects of asphalt pavements, from the point of view of elastic modulus, refusal density, temperature, and mix composition, and its performance parameters.

Key words: bituminous pavements, modulus elasticity, Marshall, refusal density, strength, durability

PENDAHULUAN

Perkerasan jalan dituntut agar bisa memberikan rasa aman dan juga nyaman bagi pengendara dan kelancaran lalu lintas kendaraan. Namun demikian biaya konstruksi perkerasan jalan yang dihasilkan juga harus ekonomis, baik biaya pelaksanaan, maupun biaya pemeliharannya. Dari sisi kepentingan pemakai jalan, tuntutan tersebut dituangkan dalam kinerja struktur jalan yang kuat dan awet, antara lain dengan parameter Marshall dan Modulus Elastisitas campuran beraspal.

Parameter Marshall meliputi: stabilitas, kepadatan, kelelahan (*flow*), rongga dalam campuran (VIM), rongga dalam mineral agregat (VMA), rongga terisi aspal (VFB), hasil bagi Marshall (Marshall Quotient). Untuk menjamin kepadatan akibat lalu lintas dalam mencapai kepadatan membal (*refusal*), digunakan parameter rongga dalam campuran dalam kondisi campuran tidak bertambah padat lagi (*refusal density*, RD) yang dinyatakan dengan VIM_{RD} . Karena rancangan campuran beraspal dianggap terpadatkan oleh lalu lintas selama umur rencana, maka nilai VIM_{RD} relatif lebih rendah dari pada VIM Marshall. Dengan persyaratan rongga tersebut diharapkan akan cukup untuk menahan perubahan bentuk (deformasi) akibat repetisi beban lalu lintas, termasuk akibat kondisi ekstrim atau temperatur perkerasan yang tinggi selama umur rencana. Bila kondisi tersebut dicapai maka kinerja struktur perkerasan beraspal akan lebih kuat dan awet.

Dari sisi keselamatan berkendara, maka tekstur permukaan perkerasan jalan dituntut mampu untuk menahan gelincir. Mutu agregat harus kuat dan tidak mudah lepas (*raveling*),

serta aspal tidak naik ke permukaan (*bleeding*). Dari sisi ekonomis, kebutuhannya berupa: keawetan (durabilitas, fleksibilitas, impermeabilitas) yang cukup, serta kemudahan pelaksanaan (*workability*). Secara ringkas, kekuatan dan keawetan perkerasan adalah unsur-unsur utama yang mewakili kepentingan pengendara dan pertimbangan ekonomis dalam perencanaan campuran beraspal.

Tujuan tulisan ini adalah melakukan uji Modulus Elastisitas campuran beraspal di laboratorium serta kajian terhadap perkerasan beraspal yang memenuhi ketentuan kepadatan membal dan mencapai umur rencana.

KAJIAN PUSTAKA

Rancangan Campuran Perkerasan Beraspal

Campuran beraspal harus dirancang sesuai dengan spesifikasi, sehingga dapat memenuhi persyaratan kekuatan dan keawetan sesuai dengan umur rencana. Komposisi bahan untuk campuran beraspal pada umumnya terdiri atas agregat kasar, agregat halus dan aspal. Bahan lain seperti bahan pengisi (*filler*) dapat ditambahkan bila diperlukan untuk memenuhi persyaratan gradasi. Kinerja campuran beraspal dapat diukur melalui beberapa parameter, antara lain stabilitas Marshall, kelelahan (*flow*), rongga (VIM, VFB, VMA), dan kadang-kadang kekakuan (*stiffness*) dan Modulus Resilien (E).

Perkerasan *Superpave* dapat dirancang dengan memanfaatkan aspal yang dimodifikasi serta gradasi yang sesuai untuk perkerasan *Superpave*, yang dikembangkan oleh (Cominski, 1994).

Bahan Campuran Beraspal

Agregat dalam campuran beraspal merupakan kerangka pembentuk kekuatan suatu campuran beraspal karena mengandung hampir 94 %. Mutu agregat kasar dan agregat halus ditentukan dengan uji keausan menggunakan mesin Los Angeles, sesuai dengan SNI 2417 (BSN, 2008)

Sebagai alternatif bisa pula digunakan mesin ACV (*aggregate crushing value*) atau AIV (*aggregate impact value*). Untuk memperoleh kepadatan yang tinggi, serta kekuatan saling mengunci (*interlocking*), maka agregat kasar harus memiliki bidang pecah tertentu. Demikian pula agregat halus dan/atau pasir harus memiliki nilai angularitas tertentu. Seluruh agregat yang dicampur harus membentuk suatu gradasi tertentu sesuai dengan jenis campuran perkerasan beraspal yang akan digunakan. Ukuran maksimum agregat kasar umumnya ditentukan oleh tebal lapisan perkerasan beraspal yang diperlukan. Ukuran butir minimum biasanya lolos saringan no.200, di mana butir-butir agregat yang lolos saringan tersebut sebanyak minimum 90% sudah dikategorikan sebagai bahan pengisi (*filler*).

Bentuk butiran yang memiliki bidang pecah serta tidak berbentuk pipih, akan sangat membantu kekuatan saling mengunci. Bentuk butiran yang bulat (dari sungai) memang lebih murah dan memudahkan pembuatan (*workability*) campuran beraspal, namun porsinya haruslah dibatasi. Untuk agregat yang akan digunakan pada lapis permukaan (*wearing course*), diperlukan syarat tambahan yaitu permukaannya haruslah kasar (*harsh*), sehingga memadai untuk menahan gelincir. Bila bentuk butiran serta bidang pecah yang ideal sulit diperoleh, maka jenis perkerasan beraspal yang bergradasi senjang (*gap-graded*) sangat sesuai untuk itu. Menurut Brien D (1993), tipe, ukuran dan gradasi agregat hanya memiliki sedikit pengaruh terhadap kinerja perkerasan beraspal bergradasi senjang. Hal ini disebabkan sumber utama kinerja perkerasan beraspal tipe tersebut adalah dari kekuatan mortar. Namun demikian, perkerasan beraspal bergradasi senjang ini hanya memadai untuk

lalu lintas ringan sampai sedang, atau untuk pelapisan (*overlay*) tipis.

Aspal dalam campuran berfungsi merekat agregat-agregat satu sama lain sehingga membentuk kesatuan yang kokoh. Aspal dengan penetrasi rendah sangat sesuai untuk menunjang stabilitas dan kekakuan, yang berarti lebih mampu menahan lalu lintas berat. Sedangkan aspal dengan penetrasi tinggi memudahkan pelaksanaan, serta cocok untuk daerah dengan temperatur tidak terlalu panas, serta lalu lintas ringan sampai sedang. Aspal dengan titik lembek tinggi sangat sesuai untuk daerah tropis, sedangkan aspal dengan titik lembek rendah masih bisa digunakan pada daerah-daerah dingin seperti di pegunungan, dsb. Klasifikasi penting lainnya dari aspal adalah nilai PI (*penetration index*). Aspal dengan PI tinggi (*low temperature susceptibility*) memiliki risiko kerusakan yang rendah terhadap perubahan temperatur. Sebaliknya aspal dengan PI rendah (*high temperature susceptibility*) memiliki risiko yang tinggi terhadap perubahan temperatur, seperti terjadinya retak pada temperatur rendah, dan deformasi pada temperatur tinggi. Keuntungan utama dari aspal dengan PI rendah adalah kebutuhan temperatur yang lebih rendah pada waktu pencampuran, penghamparan dan pemadatan untuk mencapai viskositas yang diperlukan, sehingga lebih ekonomis (Sjahdanulirwan, 2003). Untuk itu nilai PI aspal yang masih optimal adalah antara -2 hingga +2. Hal lain yang juga penting terhadap kekuatan dan keawetan perkerasan beraspal adalah daya lekat aspal terhadap agregat. Pada situs internet pernah muncul pertanyaan: kenapa di jalan nasional sepanjang pantai utara pulau Jawa (Pantura Jawa) yang sama-sama dilewati lalu lintas berat dan tergujur hujan, lubangnya lebih banyak dari pada di jalan tol ?. Terlepas dari spesifikasi jalan tol yang memang lebih baik, sebagian jalan nasional sering terendam air. Untuk itulah kelekatan aspal terhadap air perlu lebih diperhatikan, khususnya untuk kondisi rawan banjir.

Bahan pengisi digunakan untuk mengisi rongga pada agregat sehingga kinerja campuran menjadi optimal. Bahan pengisi dalam

campuran beraspal tidak boleh terlalu banyak atau terlalu sedikit, khususnya pada kadar aspal optimum. Ketentuan rongga dinyatakan dalam parameter VMA, VFB, VIM_M dan VIM_{RD} . Pada kadar aspal tinggi, bahan pengisi yang banyak akan mengurangi kekuatan saling mengunci agregat kasar, yang pada gilirannya akan mengurangi kemampuan terhadap deformasi. Namun pada kadar aspal rendah, bahan pengisi yang banyak akan mempengaruhi pemadatan dan porositas, yang kemudian juga kekakuan, viskositas dan ketebalan film aspal, yang pada akhirnya campuran lebih tahan terhadap deformasi. Pada kadar aspal optimum, situasi agak sedikit berbeda. Bahan pengisi yang terlalu banyak akan mengurangi kekuatan saling mengunci agregat halus, yang pada gilirannya akan mengurangi kemampuan terhadap deformasi. Sedangkan bahan pengisi yang terlalu sedikit akan meningkatkan penetrasi mastik, sehingga juga akan mengurangi kemampuan terhadap deformasi.

Beberapa jenis bahan pengisi dapat digunakan seperti semen Portland, kapur atau abu batu. Pertimbangan ekonomis pemilihan jenis bahan pengisi diperlukan untuk campuran beraspal. Bila komposisi campuran agregat kasar, agregat halus dan abu batu sudah memenuhi persyaratan gradasi campuran, maka tambahan bahan pengisi tersebut tidak diperlukan. Dalam spesifikasi umum (Ditjen Bina Marga, 2010), bahan pengisi disarankan menggunakan semen Portland, untuk menjamin mutu bahan pengisi yang diperlukan. Pertimbangan teknis umumnya menyangkut kemampuan jenis bahan pengisi terhadap penetrasi mastik. Sebagai contoh, bahan pengisi jenis kaolin lebih baik dari limestone karena menghasilkan penetrasi mastik yang lebih rendah untuk jumlah bahan pengisi yang sama.

Parameter Marshall

Parameter Marshall yang antara lain nilai Stabilitas (MS) merupakan salah satu tolok ukur dari kinerja campuran yang berkaitan dengan kekuatan, sesuai dengan SNI 06-2489 (BSN, 2008). Diperlukan suatu batas minimum stabilitas, sehingga perkerasan beraspal mampu menahan beban yang dipikulnya, tanpa terjadi

deformasi melampaui batas yang diijinkan. Umumnya stabilitas tertinggi tidak dibatasi, kecuali bila dikaitkan dengan besaran lain seperti kelelahan atau *Marshall Flow* (MF), atau membentuk tolok ukur baru, yaitu *Marshall Quotient* (MQ), yang merupakan nilai stabilitas dibagi kelelahan. Kelelahan merupakan salah satu tolok ukur dari kinerja campuran yang berkaitan dengan kerapuhan (*brittle*) atau retak (*crack*). Tentu diperlukan suatu batas minimum kelelahan, sehingga perkerasan beraspal tidak akan mengalami kerusakan kerapuhan/retak melampaui batas yang diijinkan. Umumnya kelelahan tertinggi juga perlu dibatasi, gunanya untuk mencegah perkerasan mengalami deformasi, kecuali bila sudah dikaitkan dengan besaran lain seperti perbandingan stabilitas terhadap kelelahan atau *Marshall Quotient* (MQ).

Perbandingan stabilitas terhadap kelelahan atau MQ, merupakan alternatif tolok ukur kinerja campuran yang berkaitan dengan ketahanan terhadap deformasi, atau pada perkerasan beraspal tipis (Lataston) berupa kelelahan (*fatigue*). Untuk itu diperlukan suatu batas minimum MQ, sehingga perkerasan beraspal mampu menahan beban yang dipikulnya, tanpa terjadi deformasi melampaui batas yang diijinkan. Umumnya MQ tertinggi tidak dibatasi, kecuali untuk perkerasan beraspal tipis yang bisa mengalami kerapuhan/retak bila MQ terlalu tinggi.

Rongga pada perkerasan beraspal umumnya dinyatakan dengan rongga dalam campuran agregat (VMA – *Voids in Mixed Aggregate*), dan rongga dalam campuran (VIM – *Voids in Mix*). VIM atau sering disebut juga VIM hasil uji Marshall (VIM_M) diperoleh dari selisih antara berat jenis maksimum campuran (*maximum specific gravity of mix*, GMM) dan kepadatan. GMM diuji sesuai dengan SNI 06-6893 (BSN, 2002). Besaran lain yang sering dimunculkan adalah rongga terisi aspal (VFB – *Voids Filled with Bitumen*), yang merupakan fungsi dari kedua rongga tersebut sebelumnya, yaitu selisih antara VMA dan VIM kemudian dibagi dengan VMA. VMA menunjukkan besaran rongga yang masih ada dalam gradasi aspal campuran agregat, sebagai hasil usaha

pemadatan pada kadar air tertentu. Umumnya besaran VMA berkisar antara 13% dan 16%. VMA inilah selanjutnya sebagian akan diisi oleh aspal. Bila VMA terlalu kecil, maka rongga yang bisa diisi oleh aspal menjadi terbatas, dan ini membuat perkerasan beraspal menjadi kurang awet. Bila VMA terlalu besar, rongga di campuran masih besar, menyebabkan deformasi oleh beban lalu lintas. VIM menunjukkan besaran rongga yang masih ada di campuran beraspal. Makin banyak jumlah aspal yang dicampurkan, maka makin kecil nilai VIM. Untuk mencapai perkerasan beraspal yang kuat dan awet maka besaran VIM haruslah berada pada koridor optimum, umumnya berkisar antara 2% dan 8%. Bila VIM lebih kecil dari 2% maka akibat pemadatan tambahan oleh lalu lintas, aspal bisa terdesak ke atas (*bleeding*). Bila VIM lebih besar dari 8%, maka selain deformasi oleh beban lalu lintas, perkerasan beraspal bisa menjadi *porous*, sehingga mempercepat proses penuaan aspal (*ageing*).

Uji Kepadatan Membal

Hasil penelitian terhadap salah satu perkerasan beraspal panas bergradasi semi senjang yang dilaksanakan TRL tahun 1993 dilaporkan oleh Dachlan AT (2006). Metoda uji sesuai dengan prosedur (*British Standard Institution*, 1989). Pengujian kepadatan membal pada campuran beraspal panas untuk perkerasan jalan yang dilakukan di laboratorium adalah sebagai simulasi pemadatan lanjutan oleh lalu lintas di lapangan selama umur rencana, untuk pencapaian rongga dalam campuran atau VIM yang sesuai untuk kondisi lalu lintas dan lingkungan setempat. Berdasarkan data laboratorium yang diambil dari sejumlah lokasi menunjukkan kinerja yang bervariasi dan terbukti secara statistik bahwa uji penerimaan mutu VIM berdasarkan uji kepadatan membal yang sesuai dengan formula campuran kerja (*job mix formula*, JMF) memberikan kinerja yang memuaskan. Nilai stabilitas antara 920 kg dan 1180 kg serta kelelahan antara 3 mm dan 6 mm menghasilkan MQ antara 306 kg/mm dan 393 kg/mm atau rata-rata 350 kg/mm relatif lebih besar dari pada ketentuan minimum 250

kg/mm. Berdasarkan hasil uji coba lapangan secara skala penuh telah terbukti bahwa campuran beraspal yang dirancang dengan kepadatan membal disertai dengan mutu bahan yang memenuhi persyaratan, dapat mencapai umur rencana. Dalam Tabel 1 dan Tabel 2 disajikan JMF dan gradasi campuran yang digunakan. Gambar 1 diambil pada tahun 2004 menunjukkan kondisi permukaan jalan setelah berumur lebih dari 10 tahun.

Tabel 1. Gradasi Lataston yang Diuji Coba (Dachlan AT, 2007)

Lolos Saringan		JMF	Lataston
mm	ASTM		
19,1	3/4"	100	100
12,7	1/2"	92,8	90 - 100
9,52	3/8"	75,8	75 - 85
2,38	# 8	51,0	50 - 72
1,19	# 16	45,0	43 - 66
0,59	# 30	39,4	35 - 60
0,07	#200	6,5	6 - 12
No.8 – No.30		11,6	8 - 15
Batas Gap Maks. (0,2 x No.8)		9,0	14,4

Tabel 2. Campuran Untuk JMF Lataston Uji Coba Skala Penuh di Cileunyi-Bandung (Dachlan AT, 2007)

Sifat-sifat campuran	Min.	Maks.	JMF
Kadar aspal, %	6,2	8	7,15
Absorb.asphalt	0	2	1,18 - 2,00
EBC, %	5,7	8,5	6,2 - 6,22
# 200 (FF), %	4,5	10	4,83 - 7,25
#8 - #30, %	7	13	7,1 - 10
CA, %	45	55	50 - 55
FA, %	30	45	37,5 - 41,4
F/B	0,7	1,4	0,78 - 1,05
BFT, mikron	6	-	6 - 8,8
VIM _{Marshall}	2	8	5
VIM-RD	2	5	2,8
VMA	14	-	14
Bulk SG of Agg	-	-	2,600
Eff SG of Agg	-	-	2,690
GMM	-	-	2,410
Density (JSD)	-	-	2,258



Gambar 1. Percobaan Lapangan Laston Tahun 1993 di Cileunyi, Bandung-Jawa Barat (Umur 10 tahun) (Dachlan AT, 2007)

Modifikasi Prosedur Marshall Untuk Ukuran Agregat Lebih Besar Dari Satu Inchi

Cara uji campuran beraspal panas untuk ukuran agregat maksimum dari 25,4 mm (1 inci) sampai dengan 38 mm (1,5 inci) menggunakan alat Marshall telah diadopsi oleh Ditjen Bina Marga sebagai pedoman dengan No. 025/T/BM/1999.

Prosedur pengujian campuran beraspal dengan metoda Marshall yang dimodifikasi ini, pada dasarnya sama dengan metode Marshall konvensional, menggunakan mold berdiameter 10,16 cm, namun karena campuran beraspal ini menggunakan ukuran butir maksimum yang lebih besar dari satu inci (*AC-Base*) maka harus digunakan ukuran diameter benda uji yang lebih besar pula (15,24 cm). Penting dicatat bahwa untuk keperluan menentukan rongga dalam campuran pada kondisi kepadatan membal ini dianjurkan menggunakan alat penumbuk getar atau dipadatkan menggunakan alat pemadat giratori (*gyratory compactor*), untuk menghindari kemungkinan terjadinya pemecahan agregat dalam campuran bila digunakan penumbuk Marshall.

HIPOTESIS

Modulus Resilien campuran beraspal, dan kepadatan membal sangat berperan dalam menjamin perkerasan beraspal yang kuat dan awet.

METODOLOGI

Metodologi untuk mengetahui kekuatan dan keawetan perkerasan beraspal dimulai melalui kajian pustaka beberapa literatur, dilanjutkan dengan analisis data hasil pengujian laboratorium. Kinerja campuran beraspal dan pengaruh aspal dalam campuran dilakukan terhadap jenis campuran ACWC dan *AC-Base* menggunakan aspal penetrasi 60. Karakteristik campuran diuji menggunakan metoda Marshall, sesuai dengan SNI 06-2489. Modulus resilien campuran beraspal diukur dengan cara tarik tak langsung menggunakan beban berulang, sesuai dengan SNI 03-6836 (BSN, 2002).

Variabel Yang Diukur dan Analisis Data

Contoh uji menggunakan jenis campuran Laston lapis aus atau AC-WC dan Laston lapis pondasi atau *AC-Base*. Dalam Tabel 4 dan Tabel 5 disajikan data sifat Marshall masing-masing untuk kurva gradasi di atas kurva *Fuller* (AF) dan yang memotong bawah kurva *Fuller* (PF). Kedua campuran beraspal tersebut menggunakan aspal pen 60. Kurva gradasi secara tipikal disajikan dalam Gambar 2 sampai dengan Gambar 5.

Modulus Resilien

Modulus Resilien (M_r) adalah ukuran kekakuan suatu bahan, yang merupakan perkiraan Modulus Elastisitas (E). Modulus Elastisitas adalah tegangan dibagi dengan regangan menggunakan beban yang dilakukan secara perlahan-lahan. Sedangkan Modulus Resilien adalah tegangan dibagi dengan regangan untuk beban yang dilakukan secara cepat sesuai dengan yang dialami oleh perkerasan jalan. Metode uji Modulus Resilien sesuai dengan SNI 03-6836 (BSN, 2002) di laboratorium dengan cara tarik tak langsung dan pembebanan berulang. Prosedur uji ini meliputi suatu rentang temperatur dan beban.

Uji Modulus Resilien campuran beraspal panas menggunakan suatu tegangan aksial siklis berulang, dimana beban, durasi dan siklusnya pada setiap benda uji silinder masing-masing adalah tetap. Sementara benda uji yang dikontrol mengalami tegangan siklik dinamis,

dan tegangan pengekangannya adalah statis. Pada dasarnya aplikasi beban siklis diperkirakan lebih akurat sebagai simulasi beban lalu lintas yang sebenarnya.

Nilai modulus elastis perkerasan beton semen pada umumnya sekitar (3.000 - 6.000) ksi atau (20.700 - 41.400) MPa, (1 ksi = 6.890 kPa), beton aspal (500 - 2.000) ksi atau (3.440 - 13.700) MPa, pondasi batu pecah (*crush stone*) (20 - 40) ksi atau (138 - 276) MPa, lempung kelanauan (*silty soil*) (5 - 30) ksi atau (35 - 210) MPa, lempung (*clayey soil*) (5 - 10) ksi atau (35 - 70) MPa. WSDOT (2012) memberikan catatan khusus, bahwa temperatur memiliki efek yang dominan pada kekakuan campuran beraspal. Dalam Tabel 3 ditunjukkan beberapa nilai tipikal Modulus Resilien pada berbagai temperatur campuran beraspal panas atau *hot mixed asphalt* (HMA). Rumus berikut merepresentasikan secara tipikal nilai modulus HMA yang dipadatkan:

$$E_{AC} = 10^{[6,4721-0,000147362 (T)^2]}$$

Keterangan:

T adalah temperatur dalam satuan °F.

E_{AC} adalah modulus resilien dalam satuan psi.

Bila uji modulus elastisitas dilakukan pada temperatur standar 25 °C, maka diperoleh $E_{AC} = 2750$ MPa.

Tabel 3. Tipikal Nilai Modulus Resilien (HMA)

Material	Modulus Resilien	
	MPa	psi
HMA at 32°F (0°C)	14,000	2,000,000
HMA at 70°F (21°C)	3,500	500,000
HMA at 120°F (49°C)	150	20,000

HASIL DAN ANALISIS

Hasil uji sifat-sifat campuran beraspal berdasarkan percobaan Marshall dan kepadatan membal di laboratorium dari campuran beraspal jenis AC-WC dan AC-Base disajikan dalam Tabel 4 dan Tabel 5. Gambar 2 sampai dengan Gambar 5 merefleksikan gradasi campuran

yang terletak di atas kurva *Fuller* (AF) dan yang memotong kurva *Fuller* (PF). Dalam gambar gradasi campuran tersebut ditunjukkan bahwa ternyata gradasi yang memotong dan di atas kurva *Fuller* berpengaruh signifikan terhadap kekuatan campuran, sebagaimana terlihat pada besaran Stabilitas dan *Marshall Quotient* (MQ). Gradasi campuran yang terletak di atas kurva *Fuller* (AF), pada contoh tersebut, memiliki nilai Stabilitas dan MQ yang lebih tinggi dari pada gradasi yang memotong kurva *Fuller* (PF).

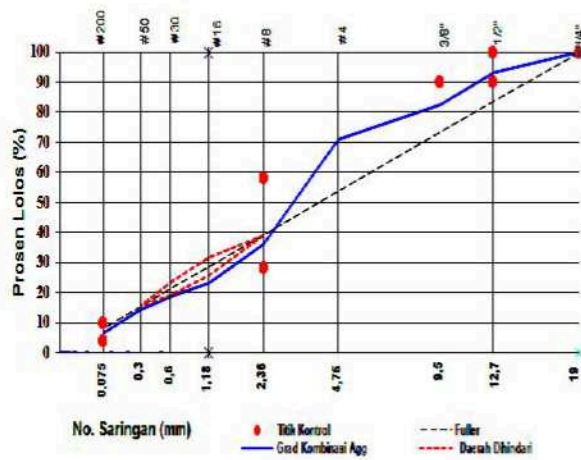
Bila Tabel 5 dibandingkan terhadap Tabel 4, terlihat bahwa kadar aspal yang lebih tinggi pada AC-WC memberikan keawetan campuran yang lebih besar, yang direfleksikan dengan VFB yang lebih tinggi (sekitar 10%). Di lain pihak stabilitas yang lebih tinggi sekitar dua kali pada AC-Base, menunjukkan ketahanannya terhadap deformasi.

Tabel 4. Karakteristik AC-WC

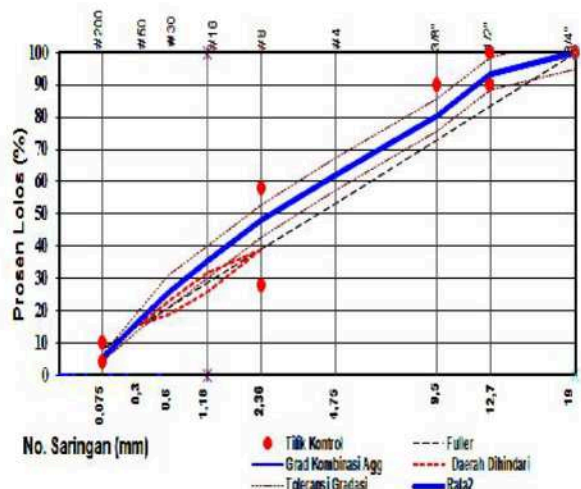
Parameter	AF	PF	Syarat
KAsp	5,65	5,50	-
Kpdt	2,382	2,353	-
VFB	74,00	72,14	> 65
VIM _M	4,17	4,60	3,5-5,5
VMA	15,82	16,32	> 15
VIM _{RD}	3,35	3,53	> 2,5
Stab, kg	1472	1159	> 800
Flow	3,21	3,42	> 3
MQ	482,2	342,3	> 250
Film T	7,13	8,70	-

Tabel 5. Karakteristik AC-Base

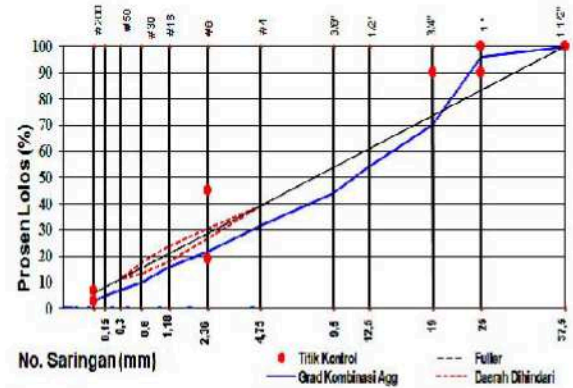
Parameter	AF	PF	Syarat
KAsp	5,20	5,10	-
Kpdt	2,378	2,361	-
VFB	67,36	63,50	> 60
VIM _M	4,64	5,26	3,5-5,5
VMA	14,16	14,37	> 13
VIM _{RD}	2,98	3,05	> 2,5
Stab, kg	2938	2745	> 1500
Flow	7,02	8,06	> 5
MQ	427,3	332,0	> 300
Film T	8,53	8,35	-



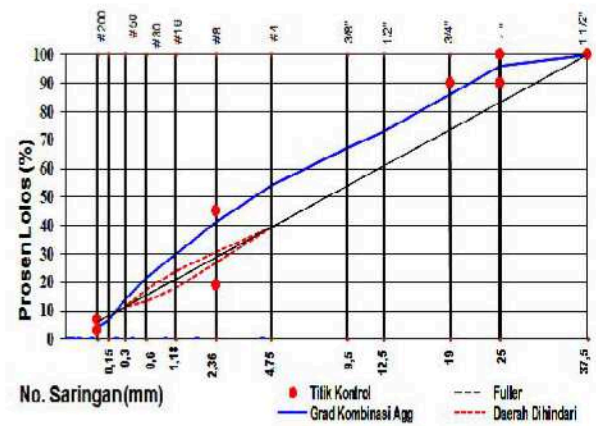
Gambar 2. Gradasi AC-WC Memotong Kurva Fuller



Gambar 3. Gradasi AC-WC di Atas Kurva Fuller



Gambar 4. Gradasi AC-Base Memotong Kurva Fuller



Gambar 5. Gradasi AC-Base Di Atas Kurva Fuller

Modulus campuran dipengaruhi oleh temperatur dan kecepatan pembebanan, seperti ditunjukkan masing-masing pada Tabel 6 dan Tabel 7 serta Gambar 6 sampai Gambar 9.

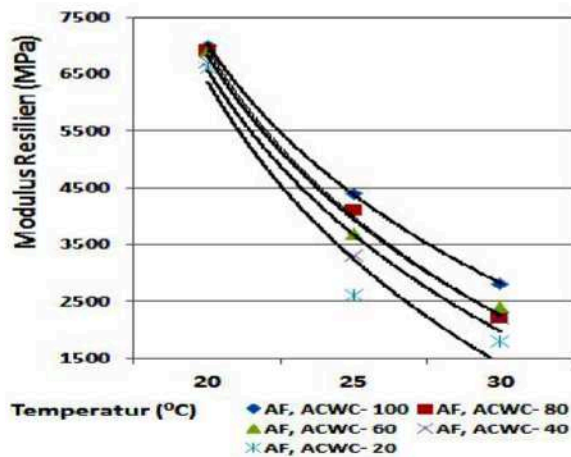
Tabel 6. Modulus Campuran AC-WC (MPa)

	Kecepatan km/jam	Temp 20°C	Temp 25°C	Temp 30°C
AF	100	7000	4400	2800
	80	6900	4100	2200
	60	6900	3700	2400
	40	6700	3300	2200
	20	6600	2600	1800
PF	100	6600	4100	2600
	80	6400	3800	2400
	60	6300	3500	2300
	40	6100	3100	2000
	20	5700	2500	1700

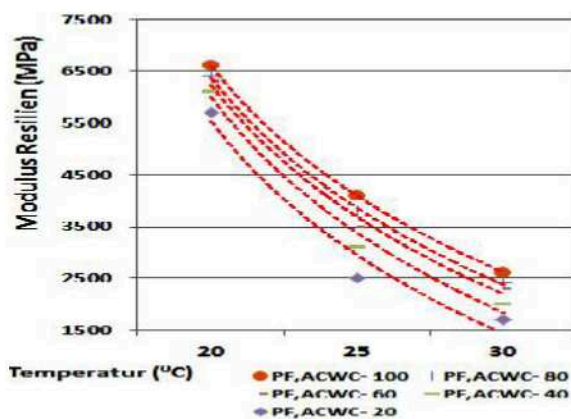
Tabel 7. Modulus Campuran AC-Base (MPa)

Kecepatan km/jam	Temp 20°C	Temp 25°C	Temp 30°C
AF 100	7900	5500	4100
80	7700	5200	3800
60	7500	4800	3400
40	7100	4400	3000
20	6600	3700	2100
PF 100	7300	4500	3200
80	7100	4300	2900
60	6800	4000	2600
40	6500	3600	2200
20	5900	3000	1600*

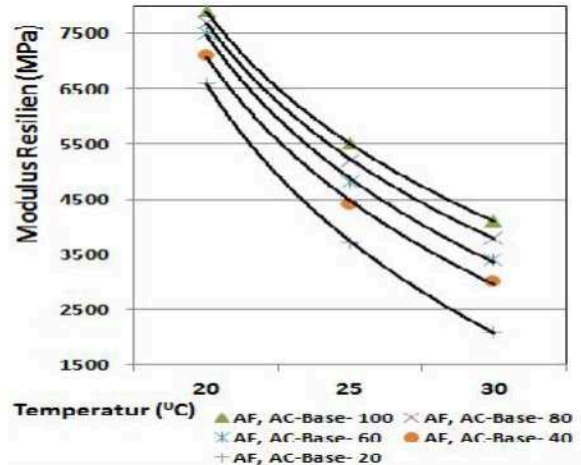
Keterangan: *) Angka ini agak rendah (*outlayer*), kemungkinan karena retaknya campuran sewaktu diuji



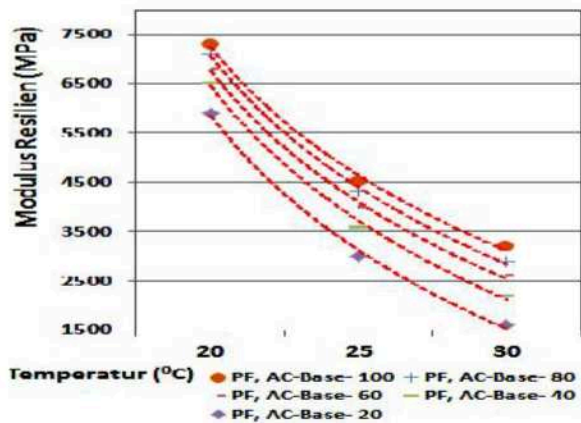
Gambar 6. Modulus Campuran AC-WC di Atas Kurva Fuller (AF) (Sjahdanulirwan dkk, 2011)



Gambar 7. Modulus Campuran AC-WC Memotong Kurva Fuller (PF) (Sjahdanulirwan dkk, 2011)



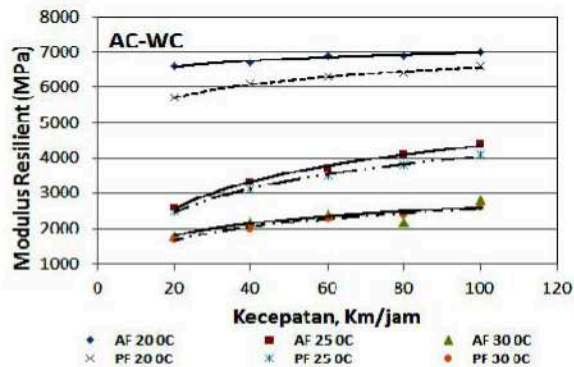
Gambar 8. Modulus Campuran AC-Base di Atas Kurva Fuller (AF) (Sjahdanulirwan dkk, 2011)



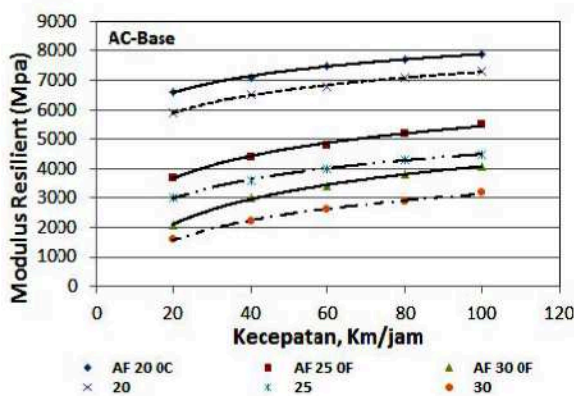
Gambar 9. Modulus Campuran AC-Base Memotong Kurva Fuller (AF) (Sjahdanulirwan dkk, 2011)

Pada Gambar 10 ditunjukkan bahwa Modulus Resilien campuran beraspal (baik gradasi di atas, maupun memotong kurva Fuller) menurun dengan naiknya temperatur dan turunnya kecepatan. Turunnya Modulus tersebut cukup besar pada kenaikan temperatur dari 20°C ke 30°C, sekitar 60 - 70 % pada kecepatan 100 ke 20 km/jam. Penurunan Modulus tidak begitu besar akibat menurunnya kecepatan, yaitu kurang dari (15 - 35) % (pada temperatur 25°C - 30 °C). Dalam Gambar 11 yang analog dengan Gambar 10, didapat bahwa Modulus campuran beraspal turun dengan meningkatnya temperatur dan penurunan kecepatan. Perbedaannya adalah bahwa

prosentase penurunan Modulus pada AC-Base sedikit lebih rendah dari pada AC-WC. Hal ini disebabkan karena kadar aspal pada Modulus AC-Base lebih rendah dari pada AC-WC, sehingga sifat *viscous elastic* berkurang dengan berkurangnya jumlah aspal dalam campuran.



Gambar 10. Modulus Campuran AC-WC (Sjahanulirwan dkk, 2011)

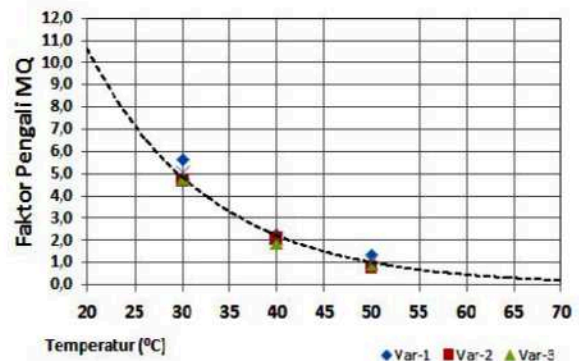


Gambar 11. Modulus Campuran AC-Base (Sjahanulirwan dkk, 2011)

Modulus Resilien dan Marshall Quotient

Dari hasil penelitian Subagio (2005) pada campuran beton aspal dengan variasi bahan tambah dan mengujinya menggunakan parameter *Marshall Quotient* (MQ) dan Modulus Resilien (E), MQ diuji pada kondisi standar, sedangkan tiga variasi campuran beraspal diuji Modulus Resilien dengan tiga variasi temperatur yaitu 30°C, 40°C, dan 50°C. Setiap besaran Modulus Resilien yang diperoleh dibagi dengan MQ menghasilkan faktor pengali dan dilustrasikan dalam Gambar 12. Dengan koefisien korelasi 0,9938 menunjukkan adanya korelasi yang signifikan

dari hubungan antara MQ dan modulus resilien. Faktor pengali (pada sumbu vertikal Y) digunakan pada MQ yang diukur dengan metoda Marshall. Contoh untuk MQ_{ACWC} dan $MQ_{AC-Base}$ yang masing-masing ditetapkan minimum 250 kg/mm dan 300 kg/mm, maka E_{ACWC} dan $E_{AC-Base}$ dengan faktor pengali 7 pada temperatur 25 °C (Gambar 12) masing-masing dihitung menjadi 1.750 MPa dan 2.100 MPa. Bila menggunakan rumus WSDOT (2012) (persamaan 1), maka nilai E_{AC} secara tipikal pada temperatur 25 °C diperoleh sebesar 2.776 MPa.



Gambar 12. Temperatur Beton Aspal dan Faktor Pengali MQ untuk Penentuan Modulus Elastisitas (after Subagio dkk., 2005)

PEMBAHASAN

Peranan Modulus Resilien

Ada korelasi yang cukup signifikan dengan koefisien korelasi sebesar 0,9938 antara MQ dan Modulus Resilien. Faktor pengali (pada sumbu vertikal Y) digunakan pada MQ yang diukur dengan metoda Marshall. Campuran beraspal panas yang diujicoba di Cileunyi dengan besar MQ = 350 kg/mm, maka nilai E_{ACWC} pada temperatur 25 °C (pada sumbu mendatar X), dapat dihitung menjadi $350 \times 7 = 2450 \text{ MPa} > 1.750 \text{ MPa}$. Besar Modulus Resilien campuran beton aspal ini relatif cukup tinggi sehingga terbukti pada lalu lintas rencana 27×10^6 ESA telah menunjukkan kinerjanya yang baik, tidak mengalami deformasi atau retak dan mampu bertahan lebih dari 10 tahun tanpa memerlukan pemeliharaan.

Peranan Parameter Marshall

Tidak bisa dipungkiri, bahwa perencana akan menghadapi situasi, di mana tuntutan kekuatan dan keawetan yang dinyatakan dalam besaran rencana, misalnya jumlah aspal, bila nilainya terlalu rendah atau terlalu tinggi, sering tidak memberikan hasil optimal. Jumlah aspal yang dibutuhkan merupakan kompromi dari pertimbangan-pertimbangan keawetan dan kemudahan pelaksanaan, yang semuanya cenderung menuntut kadar aspal tinggi, dan kekuatan, yang cenderung berada pada koridor kadar aspal tertentu. Kadar aspal yang tinggi juga dibutuhkan untuk campuran dengan gradasi senjang, seperti *hot rolled asphalt*, demikian pula untuk jenis agregat yang *porous*. Kadar aspal yang rendah masih sesuai untuk lapisan-lapisan di bawah lapis permukaan. Karena respons aspal terhadap beban bersifat *viscous* elastis (Brown, 1993), maka sifat ini juga mempengaruhi perkerasan beraspal, terlebih bila kadar aspalnya tinggi. Secara umum diartikan perkerasan beraspal bersifat elastis, cepat kembali – seperti karet pada kecepatan pembebanan tinggi sampai sedang, dan bersifat *viscous* lambat kembali seperti cairan kental pada kecepatan pembebanan rendah. Karena itu kinerja perkerasan beraspal pada kecepatan lalu lintas rendah atau statis tidak sebaik bila dilewati lalu lintas pada kecepatan tinggi atau sedang.

Pengaruh temperatur terhadap sifat elastis perkerasan beraspal tidaklah sebesar terhadap sifat *viscous*. Artinya bila terjadi kenaikan temperatur, kekuatan perkerasan beraspal akan turun pada kecepatan tinggi sampai sedang, dan sangat turun pada kecepatan rendah sampai statis. Contoh pada Tabel 8 menunjukkan akibat kenaikan temperatur dari 20 ke 30 °C, maka Modulus berkurang 60% pada kecepatan 100 km/jam, dan berkurang 70% pada kecepatan 20 km/jam. Karena itu pada kecepatan rendah sampai statis, kinerja perkerasan beraspal sangat sensitif akibat perubahan temperatur.

Dibalik lemahnya kekuatan perkerasan beraspal terhadap beban, sifat ini bisa dimanfaatkan untuk konstruksi jalan yang masih labil, dibandingkan menggunakan

perkerasan dengan kekakuan tinggi (*rigid*). Sifat perkerasan beraspal yang lebih adaptif mengikuti penurunan badan jalan yang belum mantap, sangat membantu konstruksi jalan sambil menunggu penanganan yang lebih permanen.

Peranan Kepadatan Membal

Pengujian kepadatan membal pada campuran beraspal panas untuk perkerasan jalan yang dilakukan di laboratorium adalah sebagai simulasi pemadatan oleh lalu lintas di lapangan yaitu untuk pencapaian rongga dalam campuran atau *voids in mix* (VIM) yang sesuai untuk kondisi lalu lintas dan lingkungan setempat.

Dari data laboratorium yang diambil dari sejumlah lokasi menunjukkan kinerja yang bervariasi telah terbukti bahwa rongga dalam campuran (VIM_{RD}) berdasarkan uji kepadatan membal sudah sesuai untuk rancangan campuran beton aspal di Indonesia. Batas minimum nilai stabilitas, kelelahan dan MQ dalam Tabel 4 dan Tabel 5 untuk ACWC dan AC-Base relatif dapat tahan untuk lalu lintas berat. Besar VIM_{RD} pada uji coba tersebut dibatasi dalam rentang antara 2% dan 5%, sedangkan batas-batas gradasi campuran menggunakan suatu titik kontrol untuk setiap jenis campuran (Dachlan AT, 2007). Perkembangan penelitian terhadap campuran beraspal panas seperti AC-WC dan AC-Base pada percobaan ini diberlakukan nilai minimum sebesar 2,5%, dan batas-batas gradasi campuran menggunakan suatu amplop tertutup (Ditjen Bina Marga, 2010).

Pendekatan nilai Modulus Elastisitas yang relatif memenuhi spesifikasi berdasarkan perumusan dari WSDOT (2012) dan grafik dalam Gambar 12 (Subagio, dkk, 2005) serta percobaan lapangan menggunakan nilai MQ, diperoleh bahwa nilai E_{ACWC} dan $E_{AC-Base}$ dari masing-masing dapat diambil sebesar 2.000 MPa dan 2.500 MPa.

Hasil Pemantauan dan Percobaan

Berdasarkan hasil uji coba lapangan skala penuh yang dilaksanakan tahun 1993 sampai tahun 2004, telah terbukti bahwa campuran

beraspal yang dirancang dengan kepadatan membal disertai mutu bahan yang memenuhi persyaratan dan pengawasan yang ketat, dapat mencapai umur rencana lebih dari sepuluh tahun.

Perkerasan beraspal bisa bertahan sesuai dengan umur rencana, bila cara pelaksanaan, pengawasan mutu dan pemeliharaan pasca pelaksanaan dilakukan dengan baik. Karena aspal sebagai bahan pengikat bersifat viskoelastis, maka perkerasan beraspal relatif lebih awet bila melayani lalu lintas dengan kecepatan sedang sampai tinggi. Pada kecepatan rendah atau statis seperti pemberhentian bus, jalan pendekat ke jalan rel atau gerbang tol, dan persimpangan jalan sebidang yang dilengkapi dengan lampu lalu lintas, perkerasan beraspal harus dirancang khusus dengan metode perkerasan *Superpave* agar lebih tahan terhadap deformasi permanen.

Agregat yang digunakan harus bergradasi tertentu dengan memperhatikan posisinya pada kurva *Fuller* dan aspalnya dipilih yang lebih tahan terhadap beban berat yaitu yang memiliki titik lembek yang relatif tinggi atau nilai penetrasi rendah.

Kekuatan perkerasan beraspal akan turun pada siang hari saat temperatur meningkat tinggi. Karena itu bila lalu lintas kendaraan berat beroperasi pada malam hari, Modulus Elastisitas perkerasan relatif lebih tinggi sehingga akan membantu kekuatan dan keawetan perkerasan beraspal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Modulus resilien yang menentukan kekuatan campuran beraspal, dipengaruhi oleh kecepatan pembebanan dan temperatur.
2. Ada korelasi cukup signifikan antara parameter *Marshall Quotient* (MQ) dan *resilient modulus* (E) dengan koefisien korelasi sebesar 0,9938. Faktor pengali sebagai angka untuk menentukan modulus resilient (E) campuran beton aspal dapat

digunakan tanpa harus menggunakan peralatan untuk uji modulus resilien.

3. Pendekatan nilai modulus elastisitas untuk spesifikasi campuran AC-WC dan AC-Base berdasarkan perumusan dari WSDOT (2012), serta grafik korelasi MQ, E dan faktor pengali, maka nilai E_{ACWC} dan $E_{AC-Base}$ dapat ditetapkan masing-masing minimum 2.000 MPa dan 2.500 MPa.
4. Komposisi campuran bahan perkerasan beton aspal, yang direfleksikan dengan gradasi yang terletak di atas kurva *Fuller* dan yang memotong kurva *Fuller*, berpengaruh signifikan terhadap kekuatan campuran. Pada percobaan ini, gradasi campuran yang terletak di atas kurva *Fuller* (AF), memiliki Stabilitas dan MQ yang relatif lebih tinggi masing-masing 28% dan 41% dari pada gradasi yang memotong kurva *Fuller* (PF).
5. Penerapan uji kepadatan membal yang direpresentasikan dengan rongga dalam campuran (VIM_{RD}) minimum 2,5% dapat menambah keandalan kinerja perkerasan jalan yang lebih mendekati perencanaan untuk kegiatan pekerjaan pembangunan dan pemeliharaan, terutama untuk lalu lintas berat dan temperatur tinggi di Indonesia.
6. Tolok ukur yang umum dalam menilai kinerja campuran (terhadap retak dan deformasi) adalah stabilitas Marshall dan kelelahan, atau modulus elastis yang diperoleh dari *Marshall Quotient* dengan suatu faktor pengali, serta pemenuhan rongga dalam campuran pada kondisi kepadatan membal (*refusal density*).
7. Walaupun perkerasan beraspal cukup adaptif mengikuti penurunan badan jalan, namun pada lalu lintas rendah sampai statis, kinerja perkerasan ini sangat sensitif terhadap perubahan temperatur.

Saran

1. Tuntutan kekuatan dan keawetan perkerasan beraspal pada pelaksanaan kontrak pekerjaan perkerasan beraspal panas perlu dipadukan dengan pemenuhan

ketentuan parameter sifat campuran seperti modulus resilien dan kepadatan membal, serta mempertimbangkan dalam koridor besaran rencana, sehingga bisa memberikan hasil optimal.

2. Perlu manajemen lalu lintas yang mengatur lalu lintas kendaraan berat untuk beroperasi hanya pada malam hari pada saat temperatur relatif lebih rendah atau pada saat modulus resilien perkerasan beton aspal relatif tinggi.
3. Aspal yang digunakan perlu mempertimbangkan kepadatan lalu lintas, temperatur udara, resiko kerusakan, serta penggunaannya (letak lapisan, dan gradasi campuran, persimpangan jalan, jalan pendekat ke gerbang tol atau jalan kereta api, tempat pemberhentian bus, dan persimpangan sebidang yang menggunakan lampu lalu lintas).

DAFTAR PUSTAKA

- Asphalt Institute, 1995. *Mix Design for Asphalt Concrete and other Hot Mix Types*. MS 2, Sixth Edition. Maryland: The Asphalt Institute.
- Badan Standardisasi Nasional. 2008. *Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles*. SNI 2417:2008 . Jakarta: BSN.
- _____. 2002. *Metode penentuan modulus resilien campuran beraspal dengan cara tarik tak Langsung*. SNI 03-6836-2002. Jakarta: BSN.
- _____. *Metode pengujian berat jenis maksimum campuran beraspal*. SNI 06-6893-2002. Jakarta: BSN
- Brien, D. 1993." Asphalt Mix Design". *Development in Highway Pavement Engineering-1*. New York: Elsevier Science & Technology.
- British Standard Institution. 1989. *Methods of Test for the Determination of Density and Compaction. Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas*. BS 598: Part 104:1989. London: BSI.
- Brown, S.F. 1993. "Material Characteristics for Analytical Pavement Design". *Developments in Highway Pavement Engineering*. New York: Elsevier Science & Technology.
- Cominski, Ronald J. *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*. SHRP-A-407. Washington, DC.: TRB
- Dachlan, A.T. 2007. "Uji Kepadatan membal (refusal Density) Untuk Meningkatkan Kesesuaian Mutu Perkerasan Jalan Beraspal". *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Standarisasi*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga. 1999a. *Pedoman Perencanaan Campuran Beraspal dengan Pendekatan Kepadatan Mutlak*. No.025/T/BM/1999. Jakarta: Ditjen Bina Marga.
- _____. 1999b. *Tatacara Penentuan Kepadatan Mutlak*. No.BM.025/T/BM/1999. Jakarta: Ditjen Bina Marga.
- _____. 2010. *Spesifikasi Umum. Dokumen Kontrak untuk Pekerjaan Jalan dan Jembatan*. Jakarta: Ditjen Bina Marga.
- Sjahdanulirwan, M. 2003. "Karakteristik aspal yang Diperlukan Sebagai Bahan Jalan". *Jurnal Jalan - Jembatan* 20(4):1-4.
- Sjahdanulirwan, M. dan Nono. 2011. "Pengaruh Waktu Pembebanan terhadap kekakuan beton aspal Lapis Permukaan". *Jurnal - Jalan Jembatan* 28(2): 86-96.
- Subagio, Bambang S. dkk. 2005. Development of stiffness modulus and plastic deformation characteristics of porous asphalt mixture using tafpact superTM. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Vol.5: 803-812.
- Washington State Department Of Transportation. 2012. *Stiffness test. HMA Mix Design*. Accessed January 21st. http://training.ce.washington.edu/wsdot/modules/05_mix_design/05-6_body.htm.