

PENGAMATAN RESPON STRAIN LAPIS PERKERASAN MATERIAL CAMPURAN DINGIN BUSA ASPAL DAN SEMEN

Sri Sunarjono

Magister Teknik Sipil, Program Pascasarjana, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Tromol Pos I – Pabelan Kartasura Telp.0271-717417 Ext.415 Surakarta 57102

E-mail: ssunarjono@gmail.com

ABSTRAK

Lapis perkerasan jalan dapat dibangun dengan sistim konstruksi campuran panas (*hot mix*) atau campuran dingin (*cold mix*). Pada umumnya, material campuran dingin mempunyai *stiffness modulus* lebih rendah dibanding material campuran panas yang disebabkan oleh faktor rendahnya kepadatan dan kekuatan ikatan antara aspal dan agregat. Hal ini memberi dorongan untuk melakukan pengamatan terhadap respon strain material campuran dingin untuk memahami kekuatan strukturalnya.

Paper ini melaporkan hasil pengamatan respon strain terhadap material campuran dingin busa aspal yang dibangun di areal PTF seluas 2,4x4,8 meter persegi. Material pondasi menggunakan tanah (*sub-grade*) dan agregat limestone (*sub-base*). Material yang diamati menggunakan agregat RAP dan crushed limestone dengan bahan ikat busa aspal (*foamed bitumen*) dan semen. Strain gauge dipasang pada bagian bawah lapisan campuran busa aspal. Di atas perkerasan ini beban roda disimulasikan dengan berat dan jumlah lintasan yang dapat dikontrol. Beban roda dengan tekanan ban sebesar 600 kPa diaplikasikan dengan model pembebanan berjenjang yaitu sebesar 3 kN (5000 lintasan pertama), kemudian ditingkatkan menjadi 6 kN (10000 lintasan kedua) dan 12 kN (sampai lintasan ke-45000).

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa respon strain arah transversal adalah tarik sedangkan arah longitudinal merupakan kombinasi tarik dan tekan. Hal ini menyebabkan total strain arah longitudinal cenderung lebih besar daripada arah transversal. Penambahan beban roda mengakibatkan lompatan pertambahan nilai strain. Respon strain konstan selama pembebanan 3 dan 6 kN dan cenderung turun pada pembebanan 12 kN yang mengindikasikan adanya peningkatan nilai struktural campuran busa aspal akibat efek curing. Nilai modulus campuran busa aspal jauh lebih baik daripada material granular dan mendekati nilai modulus campuran aspal base course konvensional. Ditemukan adanya indikasi *microcracking* pada campuran busa aspal yang ditambah semen.

Kata-kata kunci: *strain, perkerasan jalan, campuran dingin, busa aspal, semen.*

PENDAHULUAN

Campuran aspal dingin semakin menarik perhatian para insinyur karena konstruksinya yang sederhana yaitu tanpa perlu memanaskan agregat. Teknologi ini banyak dipakai pada proyek daur ulang perkerasan jalan baik dengan metode *in-situ recycling* maupun *in-plant recycling*. Lapis perkerasan yang telah rusak digali sampai pada kedalaman tertentu kemudian digiling dan langsung dicampur dengan bahan ikat busa aspal atau aspal emulsi dengan atau tanpa bahan stabilisasi lainnya (*in situ method*) atau dibawa ke *asphalt mixing plant* (AMP) untuk diolah secara *in plan method*. Setelah dipadatkan, campuran material ini menjadi lapisan perkerasan baru dengan kekuatan yang jauh lebih baik. Pada umumnya lapisan baru ini diproteksi dengan lapis tipis permukaan di atasnya untuk menahan infiltrasi air atau kekuatan fungsional lainnya.

Teknologi ini semakin populer karena adanya penghematan sumber alam (menggunakan material

daur ulang), penghematan energi dan reduksi polusi (tidak perlu mengeringkan dan memanaskan agregat) serta mengurangi resiko keamanan dan kesehatan.

Namun demikian, teknologi ini juga mempunyai kelemahan. Penggunaan air saat proses pencampuran dan pemadatan menjadi sebab utama kekuatan material di awal umurnya sangat rentan. Kekuatannya berangsur meningkat seiring dengan lepasnya air dari ikatan campuran.

Paper ini melaporkan hasil pengamatan respon strain material perkerasan campuran dingin pada pilot scale pavement testing facility (PTF) dengan trafficking beban roda. Hasil pengamatan diharapkan dapat memberi informasi penting bagi para praktisi dan akademisi di bidang rekayasa jalan raya. Tujuan pengamatan adalah (1) mempelajari respon strain material konstruksi campuran dingin busa aspal dan semen dan (2) membandingkan respon strain antara material berbahan ikat busa aspal, busa aspal plus semen dan semen.

CAMPURAN BUSA ASPAL

Campuran busa aspal adalah campuran antara agregat dan busa aspal yang dicampur secara dingin tanpa memanaskan agregat sehingga campuran ini dikategorikan sebagai *cold mix asphalt* (CMA).

Busa aspal atau dikenal dengan *foamed bitumen* (*expanded bitumen*) adalah campuran antara gas dan cairan aspal panas. Saat volume busa aspal tinggi (kondisi *dry foam*) maka gelembung gas cenderung berbentuk polyhedral namun saat volumenya rendah (kondisi *wet foam*) gelembung gas cenderung berbentuk spherical.

Karakter busa aspal yang mengandung gelembung gas dengan film aspal yang tipis ini menyebabkan kemampuannya untuk dapat mengikat agregat pada suhu dingin. Ini adalah keunggulan busa aspal bila dibanding *hot mix asphalt* (HMA) dimana campuran busa aspal lebih menghemat energi dan mengurangi efek polusi udara dalam implementasinya di lapangan. Hanya saja, karena umur busa aspal hanya dalam hitungan detik maka saat busa diproduksi harus langsung dicampur dengan agregat dengan menggunakan alat pencampur berkecepatan tinggi.

Untuk keperluan investigasi di laboratorium, busa aspal dapat diproduksi dengan menggunakan *laboratory foaming plant* jenis Wirtgen WLB-10 (Gambar 1). Pada mesin ini air dan gas diinjeksikan bersama-sama ke dalam fase cairan aspal panas di dalam expansion chamber (Gambar 2).

Karakteristik busa aspal menggunakan 2 parameter yaitu *expansion ratio* maksimum (ERm) dan *half-life* (HL). ERm adalah perbandingan antara



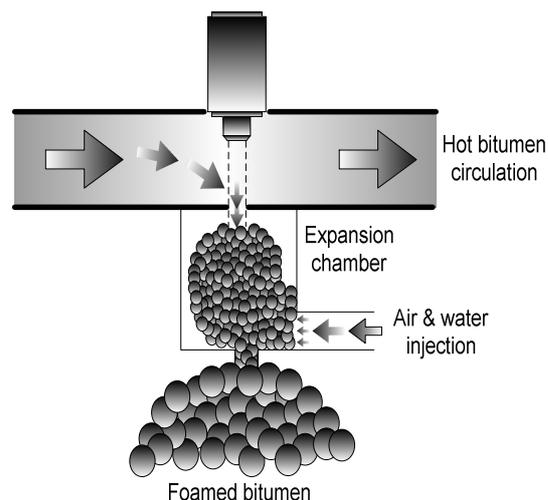
Gambar 1 Mesin produksi busa aspal Wirtgen WLB-10

volume maksimum busa aspal dan volume awal cairan aspal panas sebelum dijadikan busa, sedangkan HL adalah waktu yang dihitung saat

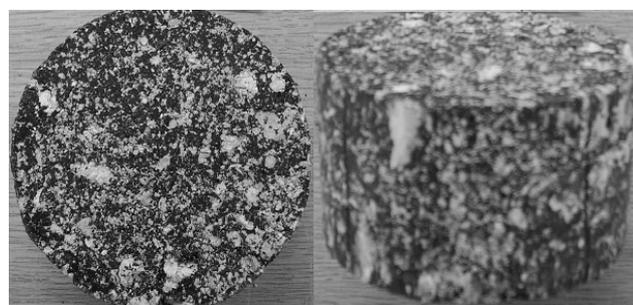
volume busa mencapai maksimum sampai volumenya tinggal separonya.

Pengukuran ERm dan HL sangat mudah dan sederhana, yaitu dengan memproduksi busa sebanyak 500 gram aspal panas (sebagai volume awal) yang ditampung dalam sebuah kontainer. Volume busa akan mengembang dan kemudian kolep dengan cepat. Ketinggian maksimum busa diukur (ERm) dan waktu antara busa mencapai volume maksimum hingga kolep tinggal separonya dicatat (HL). Biasanya pengukuran ERm dan HL dilakukan pada berbagai nilai *foaming water* dan suhu aspal panas untuk memilih kualitas busa terbaik. Dua faktor ini sangat menentukan nilai ERm dan HL. *Foaming water* adalah prosentasi air yang diinjeksikan ke dalam fase cairan aspal panas (dihitung berdasarkan berat aspal).

Gambar 3 adalah contoh material campuran busa aspal dimana hanya agregat halus saja yang dilapisi secara penuh oleh busa aspal sehingga warnanya tampak kecoklatan tidak hitam seperti lazimnya material campuran aspal.



Gambar 2 Busa aspal yang diproduksi dalam expansion chamber



Gambar 3 Contoh specimen campuran busa aspal

PROPERTIES MATERIAL

Studi ini menggunakan 2 jenis agregat yaitu RAP (*Reclaimed asphalt pavement*) dan limestone serta 2 jenis bahan ikat yaitu busa aspal dan semen.

RAP yang digunakan adalah material hasil daur ulang berbagai jenis perkerasan jalan dari berbagai lokasi yang disimpan di stockpile. Kandungan aspal rata-rata sekitar 4,1%. Gradasi RAP dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1 Gradasi RAP

Ukuran	Kumulatif lolos (%)	
	RAP	Ekstrak Agregate
20 mm	93.7	99.1
14 mm	80.6	87.9
10 mm	64.8	74.4
6.3 mm	44.8	60.5
2.36 mm	24.6	44.3
1.18 mm	14.3	35.2
0.600 mm	8.4	28.7
0.300 mm	3.5	20.0
0.150 mm	1.1	13.2
0.075 mm	0.4	9.7

Agregat limestone terdiri atas 5 ukuran nominal yaitu 20 mm, 14 mm, 10 mm, 6 mm dan dust. Komposisi gabungan agregat limestone dari beberapa ukuran nominal direkayasa berdasarkan pendekatan persamaan Fuller (lihat Tabel 2).

Tabel 2 Komposisi agregat limestone

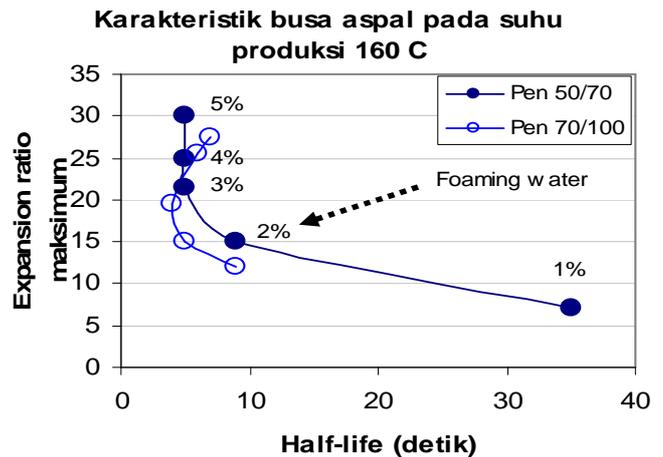
Ukuran agregat (mm)	Komposisi (% berat)
20 mm	25
14 mm	12
10 mm	13
6 mm	8
Dust	42

Properties aspal Pen 50/70 dan 70/100 yang digunakan seperti terlihat pada Tabel 3. Busa aspal diproduksi pada suhu aspal panas 160 °C dan foaming water 2%. Gambar 4 adalah karakteristik busa aspal untuk kedua jenis penetrasi tersebut. Tampak pada gambar bahwa semakin tinggi nilai foaming water menyebabkan nilai ERm naik namun disisi lain nilai HL cenderung turun. Juga terlihat bahwa karakter busa aspal Pen 50/70 dan 70/100 mempunyai perbedaan yang mencolok. Foaming water dipilih sebesar 2% yang diharapkan merupakan nilai optimumnya sesuai dengan standar metode Wirtgen (2001) yang menyarankan nilai minimum ERm adalah 8 dan HL adalah 6 detik.

Semen yang digunakan adalah jenis Portland cement tipe I.

Tabel 3 Properties aspal Pen 50/70 dan 70/100

Properties aspal	Pen	
	50/70	70/100
Penetrasi (25 C, 100 g, 5 s) (0.01 mm)	56	76
Softening point (ring & ball) (°C)	53.1	49.6
Viskositas @ 140 °C (mPa s)	401	262
Viskositas @ 160 °C (mPa s)	162	114
Viskositas @ 180 °C (mPa s)	83	57



Gambar 4 Karakteristik busa aspal pada suhu produksi 160 °C untuk aspal Pen 50/70 dan 70/100

REKAYASA PENCAMPURAN

Proporsi campuran agregat

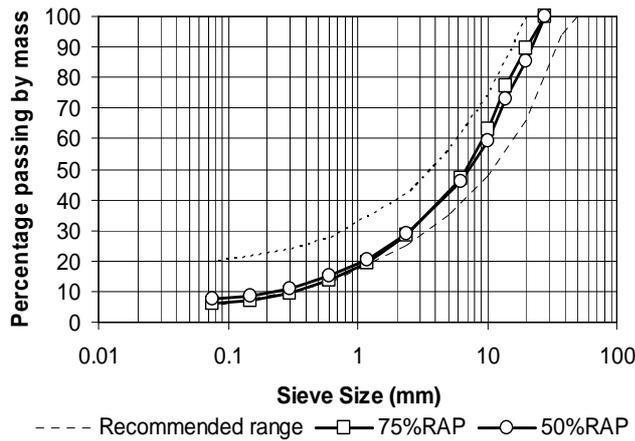
Digunakan 2 proporsi berdasarkan berat yaitu:

- Proporsi 1 – (RAP : limestone) = (75 % : 25 %)
- Proporsi 2 – (RAP : limestone) = (50 % : 50 %)

Kemudian dibuat 6 variasi mix sebagai berikut :

- Mix 1: RAP 75% + busa aspal Pen 50/70
- Mix 2: RAP 75% + busa aspal Pen 70/100
- Mix 3: RAP 50% + busa aspal Pen 70/100
- Mix 4: RAP 50% + busa aspal Pen 70/100 + semen 1,5 %
- Mix 5: RAP 75% + semen 6%
- Mix 6: RAP 50% + semen 6%

Gradasi campuran RAP dan limestone direkayasa dengan menambahkan filler 5% (dari berat RAP+ limestone) agar masuk dalam envelope sesuai rekomendasi Akeroyd dan Hicks (1988) (lihat Gambar 5).



Gambar 5 Gradasi agregat RAP + limestone +filler

Rekayasa pencampuran

Setelah dilakukan tes Proctor untuk menentukan kepadatan maksimum dan kadar air optimum dari kombinasi agregat RAP+limestone+filler, kadar busa optimum untuk campuran busa aspal dipilih berdasarkan hasil tes *Indirect Tensile Stiffness Modulus* (Sunarjono, 2006a) dan atau tes *Indirect Tensile Strength* (Wirtgen, 2001). Kedua tes dilakukan pada kondisi *dry* maupun *wet*. Hasil rekayasa dapat dilihat pada Tabel 4. Sedangkan untuk campuran semen digunakan kadar semen 6%.

Tabel 4 Hasil rekayasa pencampuran busa aspal

Parameter	RAP proporsi	
	75%	50%
Kepadatan maksimum (Mg/m ³)	2,02	2,20
Kadar air optimum (%)	4,2	4,5
Kadar busa optimum	2,5	2,7

PILOT-SCALE

Pavement Testing Facility (PTF)

Pilot-scale pengamatan strain ini dilakukan di laboratorium NCPE (Nottingham Centre for Pavement Engineering) dengan menggunakan alat PTF (Pavement Test Facility). Alat ini dikembangkan oleh Brown dan Bodrick (1981) dan kemudian dilakukan rekondisi hidrauliknya pada tahun 2001.

PTF terdiri atas sebuah mesin beban untuk mengaplikasikan beban roda di atas areal perkerasan seluas 2,4x4,8 m² dan seperangkat alat kontrol yang berfungsi untuk mengatur besar beban roda dan jumlah lintasannya (lihat Gambar 6).



Gambar 6 Pavement Testing Facility (PTF)

Lay out konstruksi perkerasan

Konstruksi perkerasan campuran busa aspal dibangun diatas pondasi sub-base dan sub-grade yang telah terpasang di areal PTF. Areal trial perkerasan dibagi menjadi 6 blok untuk masing-masing jenis mix dengan lay out pada Gambar 8.

Pondasi perkerasan terdiri dari sub-base crushed limestone setebal 450 mm dan tanah sub-grade. Berdasarkan pengujian dynamic cone penetration (DCP) didapatkan bahwa kondisi tanah sub-grade sangat lemah dengan CBR kurang dari 1%. Sedangkan berdasarkan pengujian Light falling weight deflectometer (PRIMA plate) diatas sub-base didapatkan nilai modulus antara 37- 81 MPa dengan nilai rata-rata sekitar 60 MPa.

Tebal lapisan campuran busa aspal dan semen direkayasa setipis mungkin (untuk tujuan pengamatan kerusakan retak dan atau rutting selama pembebanan). Tebal lapisan ditetapkan 80 mm yang kurang lebih sekitar 4 kali ukuran maksimum agregat yang digunakan (20 mm).

Proses pencampuran dan pemadatan

Pencampuran dan pemadatan material untuk setiap blok dilakukan berdasarkan hasil rekayasa pencampuran yang telah dijelaskan pada seksi 4.

Untuk campuran busa aspal (Mix 1,2 dan 3), setelah material ditimbang kemudian dicampur pada kadar air optimum dan kadar busa optimum dengan menggunakan *Hobart mixer*. Pencampuran dilakukan secara bertahap karena kapasitas mixer hanya 6 kg Material yang sudah dicampur dengan busa aspal kemudian disimpan dalam kontainer tertutup pada suhu kamar (20 ± 5 °C) sambil menunggu selesainya proses pencampuran seluruh material dalam satu blok. Untuk campuran busa aspal+semen (Mix 4), material busa aspal dicampur dengan semen dan sedikit air dengan menggunakan concrete mixer pada hari pelaksanaan pemadatan.

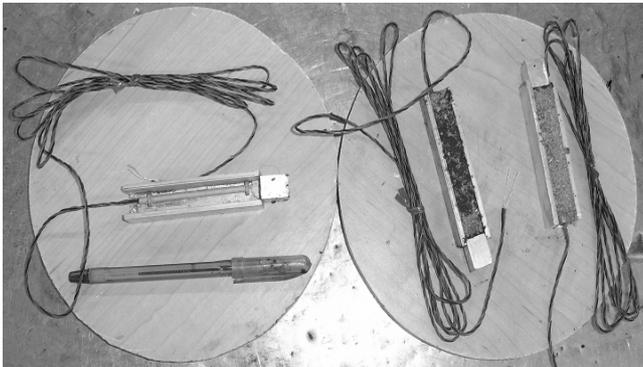
Untuk campuran semen (Mix 5 dan 6), semua bahan yaitu RAP, limestone, semen dan air ditimbang dan dicampur dengan menggunakan *concrete mixer*. Campuran kemudian langsung ditebarkan dan dipadatkan pada areal PTF.

Proses penebaran material di areal PTF dilakukan secara manual dan sedikit diaduk untuk menghindari segregasi. Permukaan diupayakan rata supaya energi compactor terbagi merata dan fluktuasi tebal lapisan tereduksi. Material kemudian dipadatkan dengan menggunakan alat pemadat jenis *Wacker VP1340A plate compactor*. Sebelum proses pemadatan dilakukan, kadar air material dikontrol supaya material dapat mencapai tebal dan kepadatan minimum 95% dari kepadatan saat rekayasa pencampuran. Setelah pemadatan selesai, perkerasan dibiarkan untuk proses curing selama 14 hari kecuali Mix 4 yang hanya 7 hari.

Pemasangan strain gauge

Strain gauge dipasang pada setiap blok, 2 buah arah transversal dan sebuah arah longitudinal, tepat di dasar lapisan di bawah lintasan roda. Lay out pemasangan dapat dilihat pada Gambar 8.

Pemasangan harus dilakukan secara hati-hati untuk menghindari kerusakan gauge saat proses pemadatan. Disarankan, sebelum dipasang di lapis perkerasan, gauge dibalut dengan material perkerasan yang sama dengan menggunakan box seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Persiapan pemasangan strain gauge

Trafficking

Trafficking dilakukan dengan cara pembebanan lintasan roda single wheel diatas perkerasan seperti terlihat pada Gambar 6.

Areal PTF dengan 6 buah blok mempunyai 2 buah lane (track lintasan roda). Setiap lane diaplikasikan jumlah lintasan beban roda yang sama untuk setiap harinya. Hal ini untuk tujuan supaya

antar blok dapat dilakukan perbandingan tanpa khawatir adanya perbedaan waktu curing. Trafficking dilakukan dengan kecepatan kurang lebih 3 km/jam. Beban roda sebesar 3 kN diaplikasikan pada 5000 lintasan pertama, kemudian ditingkatkan menjadi 6 kN sampai lintasan ke-15000 dan ditingkatkan lagi menjadi 12 kN yang diaplikasikan sampai akhir pengamatan (45000 lintasan). Besar tekanan ban adalah 600 kPa yang merupakan tipikal tekanan ban untuk kendaraan berat.

Proses pengamatan

Pencatatan respon strain gauge dilakukan setiap interval 1000 lintasan beban roda. Selain itu juga dilakukan pengamatan rutting yang terjadi setiap 3000 lintasan (tidak didiskusikan pada paper ini). Inspeksi juga dilakukan pada permukaan perkerasan untuk mengetahui segala kejadian. Setelah trafficking selesai, dilakukan coring terhadap perkerasan untuk melihat kondisi riil material.

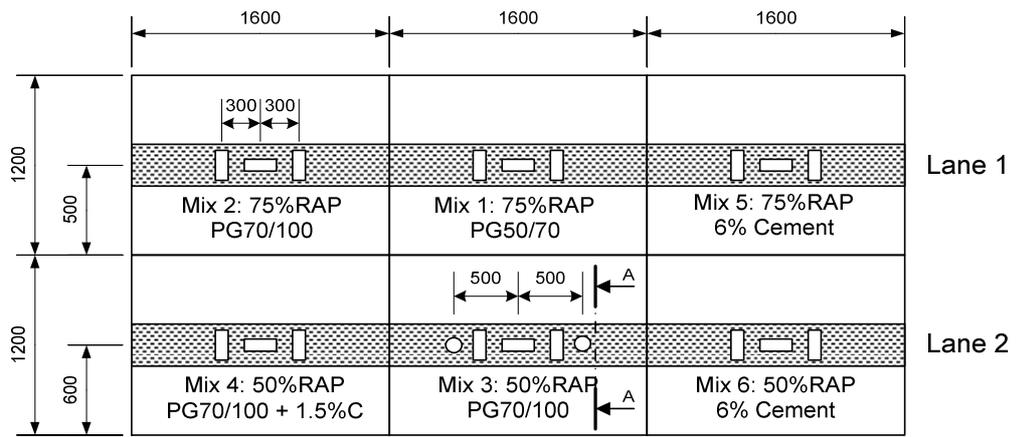
HASIL PENGAMATAN

Inspeksi secara visual

Inspeksi dilakukan secara kontinyu terhadap permukaan perkerasan baik kemungkinan adanya retak maupun rutting yang terjadi. Pada material campuran semen tidak ditemukan distress apapun. Sedangkan pada material campuran busa aspal terjadi rutting begitu beban 3 kN diaplikasikan. Rutting hanya terjadi pada lintasan roda dan terjadi lompatan kedalaman deformasi saat beban roda ditingkatkan. Pada setiap level beban, percepatan kedalaman rutting diketahui berkurang.

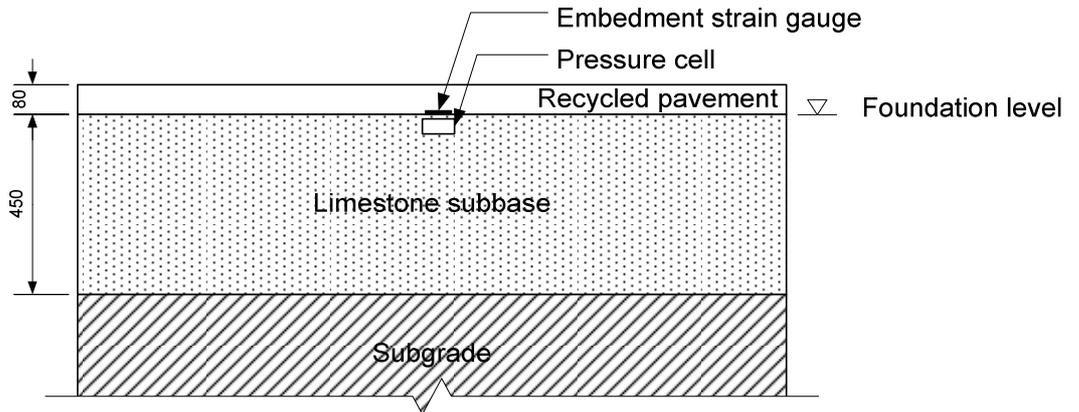
Saat trafficking mencapai kurang lebih 15000 lintasan yaitu setelah diaplikasikan beban 12 kN, pada material campuran busa aspal terjadi retak disepanjang lintasan roda di bagian pinggir. Retak ini diperkirakan bukanlah akibat fatigue, namun semata-mata akibat kedalaman rutting yang berlebih (Gambar 9).

Secara umum, penggunaan RAP 50% memberikan performance lebih baik dari pada RAP 75%. Demikian juga penggunaan aspal Pen 50/70 dapat mereduksi distress yang terjadi. Penggunaan semen pada campuran busa aspal sangat signifikan mengurangi tingkat distress dimana hanya terlihat sedikit rutting serta tidak muncul retak sepanjang lintasan roda.



Plan

- Transverse embedment strain gauge
 Pressure cell
- Longitudinal embedment strain gauge
 Wheel path



Section A - A

Dimension : Millimeter

NOT TO SCALE

Gambar 8 Lay out areal PTF dan pemasangan strain gauge



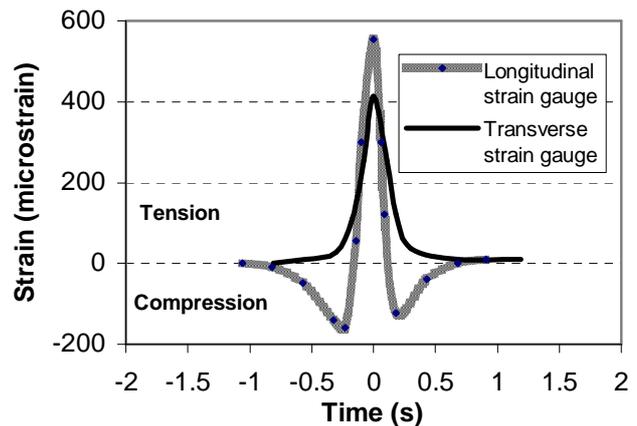
Gambar 9 Rutting sepanjang lintasan roda dan retak di sepanjang sisi pinggir lintasan roda

Bentuk respon strain

Gambar 10 menunjukkan bentuk tipikal respon strain yang dipasang secara transversal dan longitudinal. Respon strain ada 2 jenis yaitu tensile strain (positif) dan compressive strain (negatif) yang mana hal ini tergantung posisi beban roda terhadap lokasi strain gauge. Strain gauge arah transversal dan longitudinal mempunyai bentuk berbeda yang mana respon transversal selalu positif (tensile) sedangkan respon longitudinal merupakan kombinasi tensile dan compression.

Respon strain transversal dapat dijelaskan berikut ini. Beban roda menyebabkan cekungan defleksi dengan nilai maksimum persis di bawah roda. Saat strain gauge berada pada radius cekungan ini maka akan bereaksi melengkung dan menghasilkan respon tensile. Besar kecilnya respon tensile tergantung dari posisi roda. Saat roda mendekati strain gauge maka respon tensile akan meningkat dan mencapai nilai maksimum saat roda berada persis di atasnya, sedangkan saat roda menjauhi strain gauge maka respon tensile akan mengecil dan akhirnya nol.

Skenario strain gauge arah longitudinal sedikit berbeda. Sebagaimana sebuah batang simple beam diatas pondasi yang bersifat elastik, saat sebuah beban diaplikasikan maka batang akan melengkung ke bawah sehingga bagian bawah batang akan terjadi tarik (tensile). Sementara itu di bagian lain, batang akan sedikit bereaksi melengkung ke atas sehingga menyebabkan tekan (compression). Sehingga bila roda beban bergerak menuju strain gauge, maka strain gauge akan bereaksi tekan yang kemudian diikuti tarik saat beban roda berada diatas gauge. Pada saat beban roda menjauhi gauge maka akan terjadi kebalikannya. Besar reaksi tekan maksimum kurang lebih sepertiga reaksi tarik maksimum.



Gambar 10 Bentuk respon strain

Karakteristik respon strain

Gambar 11 menunjukkan hasil respon strain selama pengujian trafficking. Ada 18 buah gauge dipasang yang mana 2 buah rusak saat proses pemadatan. Setiap blok dipasang 2 buah transversal gauge dan sebuah longitudinal gauge. Beberapa gauge yang memberikan respon tidak konsisten dan tidak reliabel selama trafficking tidak ditampilkan dalam Gambar 11.

Sebagaimana prediksi semula, kecuali respon strain pada Mix 2, nilai strain bertambah saat diaplikasikan beban roda yang lebih berat. Seperti terlihat pada Gambar 11 tersebut, ada lompatan respon strain saat beban roda ditingkatkan menjadi 6 kN dan atau 12 kN. Respon strain yang terjadi pada Mix 2 mungkin disebabkan oleh rapuhnya kohesi antara permukaan gauge dengan material campuran disekitarnya.

Nilai tensile strain terlihat relatif konstan selama beban roda sebesar 3 dan 6 kN diaplikasikan. Hal ini dimungkinkan adanya perimbangan antara peningkatan kekuatan struktural material yang mendorong penurunan nilai strain dan berulangnya pembebanan roda yang mendorong nilai strain naik.

Saat diaplikasikan beban roda 12 kN, nilai strain tampak turun secara gradual. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kekuatan struktural material karena efek curing lebih dominan daripada pengaruh beban. Namun trend ini tidak terlihat pada Mix 2 sehingga menguatkan dugaan bahwa gauge pada blok ini ada sesuatu yang salah. Kemungkinan terbesar kesalahan terjadi saat pemasangan gauge yang mana material yang dilapiskannya terlampaui kering sehingga menurunkan rekatkan kohesi antara gauge dan material.

Respon yang diberikan strain gauge arah longitudinal dapat dikatakan selalu lebih besar bila dibandingkan dengan strain gauge arah transversal. Hal ini diperkirakan akibat beban roda memberi efek

tekan dan tarik pada arah longitudinal, sedangkan pada arah transversal hanya ada efek tekan. Namun pola ini tidak berlaku pada Mix 6 dimana respon strain transversal lebih besar. Kemungkinan campuran semen dengan proporsi RAP 50% menjadi lebih kaku dan memberikan respon yang berbeda.

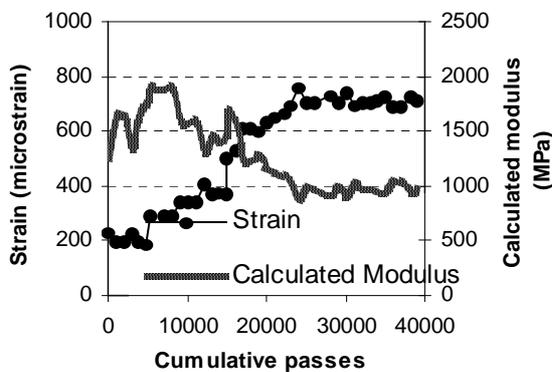
Nilai modulus material

Pada studi ini, nilai modulus material dicoba untuk diprediksi berdasarkan respon strain yang terjadi dengan sistim *back calculated* (perhitungan balik). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan software BISAR yang merupakan perangkat lunak analisis struktur perkerasan berbasis linear elastik. Software ini biasanya digunakan untuk *forward calculation* dimana tegangan dan strain di titik tertentu pada struktur perkerasan *mully layer* dapat dihitung secara akurat. Perhitungan menggunakan asumsi bahwa setiap lapis bersifat tak terbatas pada dimensi horisontal. Input nilai pada perhitungan ini adalah tebal perkerasan, nilai modulus dan Poisson ratio untuk setiap lapis serta besar, arah dan letak beban.

Prosedur perhitungan modulus berdasarkan respon strain dengan menggunakan program BISAR adalah sebagai berikut:

Step 1: Penyederhanaan struktur perkerasan dari aktual 3 lapis menjadi 2 lapis. Penyederhanaan ini dilakukan karena nilai modulus lapis sub-base granular dan pondasi sub-grade tidak diketahui. Maka digunakan modulus kombinasi kedua lapis ini sebesar 60 MPa berdasarkan hasil pengujian *insitu* dynamic plate (PRIMA). Maka perhitungan didasarkan pada sistim 2 lapis yang mana lapis busa aspal sebagai lapis atas dengan tebal 80 mm dan lapis bawah tebal infinite dengan modulus 60 MPa.

Step 2: Pengembangan model hubungan antara nilai tensile strain dengan nilai modulus untuk setiap beban roda yang diaplikasikan. Model ini berdasarkan data base yang didapat dengan cara *forward calculation*.



Gambar 13 menunjukkan model hubungan antara tensile strain dan modulus yang dihasilkan.

Step 3: Perhitungan nilai modulus berdasarkan model yang telah dikembangkan untuk setiap beban roda yang mana nilai respon strain yang didapat digunakan sebagai input data.

Tabel 5 memuat hasil-hasil perhitungan modulus step 3. Nilai-nilai pada Mix 2 tidak ditampilkan karena kurang reliabel. Nilai-nilai modulus mempunyai rentang yang cukup lebar dikarenakan oleh adanya variasi respon gauge. Variasi respon gauge dapat disebabkan oleh 3 faktor yaitu (1) fluktuasi besar load selama trafficking, (2) variasi tebal lapisan dan (3) variasi kondisi struktural lapisan pondasi.

Secara garis besar, modulus lapis perkerasan campuran busa aspal diatas pondasi dengan modulus 60 MPa pada awal umurnya berkisar antara 300 MPa pada nilai terendah dan 2500 MPa pada nilai tertinggi. Nilai modulus ini merupakan fungsi dari komposisi agregat dan waktu curing. Sedangkan untuk material campuran semen mempunyai rentang nilai antara 1000 sampai 3000 MPa.

Tabel 5 Nilai-nilai modulus terhitung

Mix	modulus terhitung selama trafficking (MPa)
1	300 - 800 (awal trafficking) 350 -1000 (akhir trafficking)
3	1000-1300 (awal trafficking) 1500-2500 (akhir trafficking)
4	500 -1500 (awal trafficking) 600 -2500 (akhir trafficking)
5	1000-1500 (awal trafficking) 1500-2500 (akhir trafficking)
6	1500-2000 (awal trafficking) 2000-3000 (akhir trafficking)

Sebagai perbandingan, sebuah lapis base course dengan material granular batu pecah setebal 80 mm diatas pondasi tanah dengan modulus 60 MPa mempunyai nilai modulus sekitar 90 MPa bila diestimasi dengan perhitungan perencanaan metode Shell (Claessen et al., 1977). Sedangkan untuk lapisan hot rolled asphalt (HRA) setebal 80 mm yang didesain dengan kecepatan kendaraan 3 km/jam dan menggunakan aspal dengan stiffness 20.5 MPa pada suhu 20°C, nilai modulusnya sekitar 2900 MPa (Brown&Brunton, 1988).

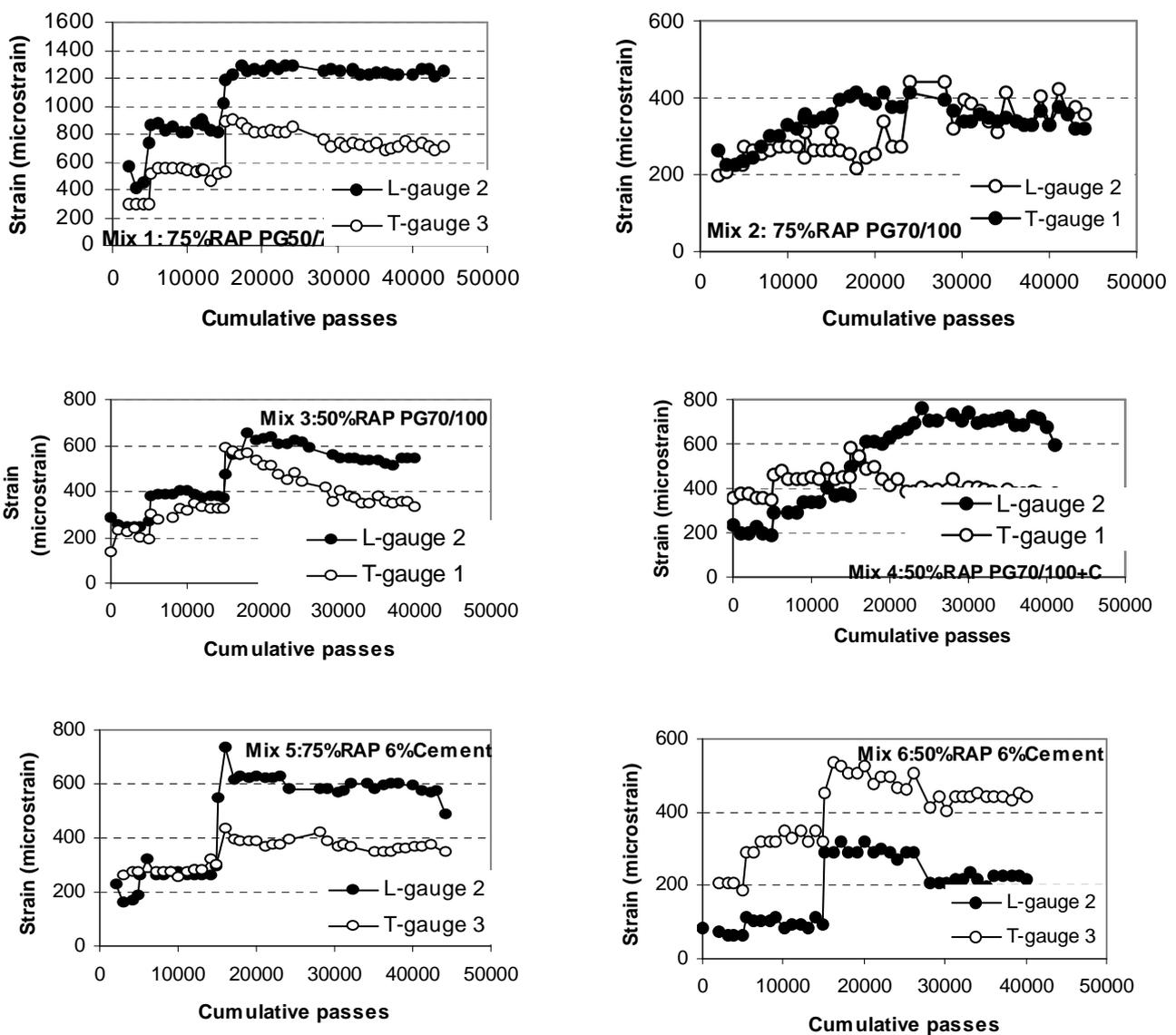
Berdasarkan perbandingan diatas, maka dapat dikatakan bahwa material campuran busa aspal mempunyai nilai modulus jauh lebih baik dari pada material granular dan setingkat dibawah material HRA. Bila waktu curing bertambah lama dan kepadatan akibat trafficking juga meningkat maka

kekuatan struktur material campuran busa aspal dapat sebaik atau mendekati material hot mix.

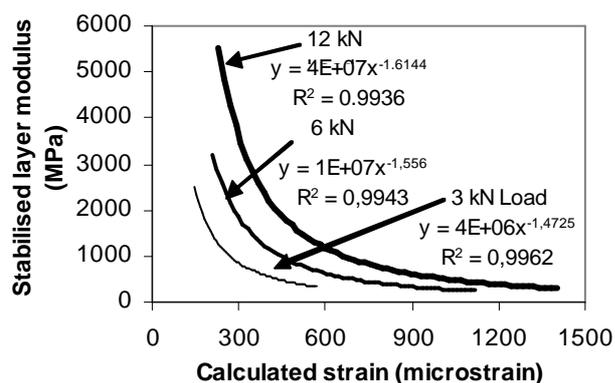
Nilai modulus material campuran semen terlihat lebih baik bila dibanding material aspal hot mix namun tentu saja kekakuannya membawa resiko retak akibat tegangan yang berlebih.

Gambar 12 menyajikan kasus yang menarik dari respon strain gauge pada blok Mix 4. Tidak seperti gauge lainnya, nilai respon strain gauge bertambah secara gradual selama trafficking dengan beban roda 6 dan 12 kN sehingga mengakibatkan nilai modulus tereduksi secara gradual. Dengan asumsi bahwa strain gauge berfungsi secara baik maka fakta menurunnya nilai modulus dimungkinkan oleh terjadinya retak rambut (microcracking) disekitar gauge selama pembebanan. Fakta ini didukung oleh hasil studi fatigue pada material campuran RAP dan

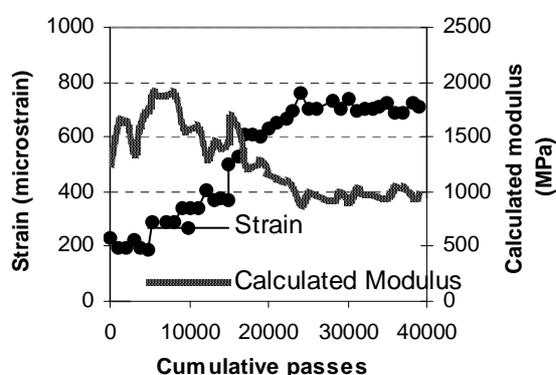
busa aspal dengan menggunakan alat Indirect Tensile Fatigue Testing (ITFT) (Sunarjono, 2006-b). Pada studi fatigue tersebut ditemukan bahwa retak dapat terjadi pada awal umur fatigue namun kemudian diikuti oleh crack propagation dalam periode waktu cukup lama (sekitar 60% dari total umur fatigue). Sebagai catatan, umur crack propagation untuk material DBM (Dense Bitumen Macadam) 20 mm (maksimum ukuran agregat) adalah sekitar 10% dari total umur fatigue (Read 1996). Karakter ini dapat dijelaskan oleh kenyataan bahwa (1) busa aspal tidak bersifat menerus (*continuous phase*) seperti layaknya bahan pengikat pada material konvensional campuran aspal dan juga (2) nilai modulusnya tidak terlampau tinggi; kedua faktor ini memperlambat proses cracking propagation setelah terjadi cracking initiation.



Gambar 11 Respon strain selama trafficking untuk semua blok (Mix)



Gambar 12 Observasi terhadap penurunan modulus selama trafficking pada Mix 4



Gambar 13 Hubungan strain-modulus lapis campuran busa aspal berdasarkan model BISAR untuk setiap beban roda.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- 1 Berdasarkan pengamatan visual, kinerja material campuran busa aspal dan semen sangat dipengaruhi oleh proporsi penggunaan RAP, jenis penetrasi aspal dan penambahan semen pada campuran. Campuran busa aspal cenderung mengalami distress rutting dari pada retak. Penambahan semen pada campuran busa aspal

- 2 Bentuk respon strain gauge yang dipasang arah transversal berbeda dengan arah longitudinal. Respon strain gauge arah transversal selalu positif (tensile) sedangkan arah longitudinal merupakan kombinasi tensile dan compression.
- 3 Strain gauge sangat sensitif terhadap perubahan beban roda. Nilai strain akan bertambah secara mendadak saat beban roda ditingkatkan.
- 4 Nilai strain yang konstan pada beban 3 dan 6 kN serta nilai menurun pada pembebanan 12 kN memberikan indikasi bahwa kekuatan struktural material meningkat akibat efek curing.
- 5 Respon strain arah longitudinal untuk material campuran busa aspal lebih besar daripada arah transversal karena efek beban roda menyebabkan tegangan tarik dan tekan pada arah longitudinal. Namun pola ini tidak berlaku pada campuran semen yang kaku.
- 6 Nilai modulus campuran busa aspal jauh lebih baik daripada material granular dan mendekati nilai modulus campuran aspal base course.
- 7 Kasus microcracking pada campuran busa aspal+semen dimungkinkan terjadi pada awal umur. Namun diperkirakan umur total fatiguenya cukup panjang dikarenakan sifat busa aspal yang tidak menerus (*continue phase*) dalam campuran dan nilai modulusnya yang rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Mr Barry Brodrick dan Mr Chris Fox (PTF specialist), Mr Poranic Jetareekul (PhD student), Dr. N.H. Thom dan Dr. S.E. Zoorob (supervisor), Mansfield Asphalt dan Tarmac Dene Quarry (Suplier agregat) serta TPSDP UMS (funding).

REFERENSI

Akeroyd, F.M.I & Hicks, B.J., 1988. *Foamed bitumen road recycling*. Highway, Volume 56, Number 1933, pp 42-45.
 Brown, S.F. & Brodrick, B.V. 1981. *Nottingham Pavement Test Facility*, Transportation Research Record, No. 810, pp. 67-72.
 Brown, S.F. & Brunton, J.M. 1988. *An Introduction to the Analytical Design of Bituminous Pavements*, 3rd edition, Department of Civil Engineering, University of Nottingham.

- Claessen, A.I.M., Edwards, J.M., Sommers, P., & Uge, P. 1977. *Asphalt pavement design – The Shell method*, Proceeding of the 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, The University of Michigan, pp. 39-74.
- Csanyi, L.H. 1957. *Foamed asphalt in bituminous paving mix*. Highway Research Board, Bulletin Vol. 10, No. 160, pp. 108-122.
- Merrill, D., Nunn, M. & Carswell, I. 2004. *A guide to the use and specification of cold recycled materials for the maintenance of road pavements*, TRL Report TRL611, Transportation Research Laboratory, Crowthorne.
- Montepara, A. & Giuliani, F. 2002. *A study on design and performance of recycled pavements cold stabilised with cement and bituminous emulsion*, 4th European Symposium, Performance of Bituminous and Cement Treated Materials in Pavements, 11th & 12th April 2002, Nottingham, UK. S.Zoorob *et al.* Editors, A.A.BALKEMA Publishers, ISBN 90-5809-375-1, pp. 213-217.
- Read, J.M. 1996. *Fatigue Cracking of Bituminous Paving Mixtures*, PhD thesis, School of Civil Engineering, University of Nottingham.
- Sunarjono, S. 2006-a. *Pavement Stabilisation using Foamed Bitumen*, First year report, Report No. NCPE 3, School of Civil Engineering, University of Nottingham.
- Sunarjono, S. 2006-b. *A Study on Fatigue Performance of Reclaimed Asphalt Pavement Stabilised with Foamed Bitumen*. Seminar Nasional Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Malang, Malang.