

ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN FIBRE ARAMID-POLYOLEFIN TERHADAP PERFORMA CAMPURAN ASPAL HANGAT

Christian Gerald Daniel¹

¹Alumni Program Studi Master of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, Delft University of Technology, Email: christian.gerالدaniel@gmail.com

ABSTRAK

Teknologi aspal hangat telah menjadi salah satu metode alternatif untuk produksi struktur perkerasan jalan. Akan tetapi, teknologi tersebut mempunyai kelemahan dari segi performa mekanis dibandingkan dengan campuran aspal panas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh positif dari penggunaan fibre aramid dan polyolefin pada campuran aspal hangat dalam beberapa tahap. Pada fase pertama, uji 4-point bending dan triaxial dilakukan pada sampel campuran aspal padat DAC-16 yang dibandingkan dengan sampel yang dicampur dengan fibre dengan proporsi 0.05% berat total, menghasilkan peningkatan fatigue life sebesar 100% dengan kekakuan yang setara, serta penurunan creep coefficient sebesar 20%. Pada tahap kedua, pengujian tarik dilakukan pada sampel aspal mortar untuk mengecek pengaruh perbedaan dosis fibre: 0.05%, 0.1% dan 0.5% terhadap performa benda uji, juga pengaruh dari dua panjang fibre yang berbeda: 19-mm dan 38-mm. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa kekakuan sampel meningkat hingga mencapai 189% serta creep coefficient yang menurun hingga 45% dibanding benda uji kontrol. Selain itu, ditemukan bahwa hasil pengujian sampel dengan penambahan fibre 38-mm sebanyak 0.1% dari total berat spesimen setara dengan dosis 0.5%. Hasil pengujian tahap ketiga, *semi-circular bending test*, menunjukkan trend yang sama dengan peningkatan nilai kuat tarik sampel sebesar 12.5% dan total energi sebesar 17%. Dapat disimpulkan bahwa penambahan fibre aramid-polyolefin panjang 38-mm dengan dosis sebesar 0.1% memberikan hasil yang optimum. Adapun hasil CT-Scan pada sampel mortar menjelaskan mekanisme perkuatan akibat penambahan fibre, yakni (i) transfer beban antar fibre dan (ii) *interface bonding* antara fibre dan mortar matrix.

Kata kunci: aspal hangat, aramid + polyolefin, kuat tarik, *semi-circular bending test*, *standard test*

PENDAHULUAN

Aspal merupakan suatu komponen yang vital dalam proses pembangunan suatu konstruksi jalan raya, dimana secara umum volume aspal adalah sekitar lima persen dari volume total satu lapis perkerasan (wearing course). Adapun dewasa ini, teknologi rekayasa aspal sudah berkembang dengan sangat pesat, dimana salah satunya dengan pembuatan aspal campuran hangat (warm mix asphalt – WMA). Keuntungan dari WMA dibandingkan dengan tipe campuran pada umumnya (hot mix asphalt – HMA) terdiri dari beberapa aspek, seperti penghematan energi dan bahan bakar sekitar 20-35% (1) juga emisi panas ke lingkungan yang lebih rendah, dikarenakan selisih suhu pencampuran yang berada pada kisaran 10-40°C lebih rendah. Selain itu, dengan teknologi ini juga memungkinkan untuk menggunakan agregat hasil daur ulang (recycled aggregate) dengan porsi yang lebih banyak dari biasanya. Akan tetapi, suhu pencampuran yang lebih rendah ini pun dapat menimbulkan kerugian pada aplikasinya, terutama pada bagian performa dari perkerasan yang dihasilkan, sehingga berdampak langsung pada masa pakainya. Untuk mengatasi problem tersebut, fibre digunakan sebagai material tambahan untuk memperbaiki sifat mekanis dari campuran aspal hangat sehingga dapat menghasilkan suatu material dengan kualitas yang baik. Penelitian ini menggunakan kombinasi antara fibre aramid dan polyolefin sebagai bahan tambah untuk campuran aspal hangat bergradasi rapat (*dense asphalt concrete* – DAC), dengan tujuan untuk mencari kadar

optimum penambahan fibre serta efek dari penambahan fibre ke performa material WMA melalui beberapa pengujian, yakni *4-point bending test* untuk menentukan umur sampel terhadap beban siklik, pengujian kuat tarik pada level mortar (bitumen + pasir + mineral filler), serta *semi-circular bending test* pada campuran DAC. Adapun CT-Scan dilakukan pada sampel mortar agar dapat menganalisis interaksi fibre dalam benda uji, sehingga mekanisme perkuatan dapat diidentifikasi.

DASAR TEORI

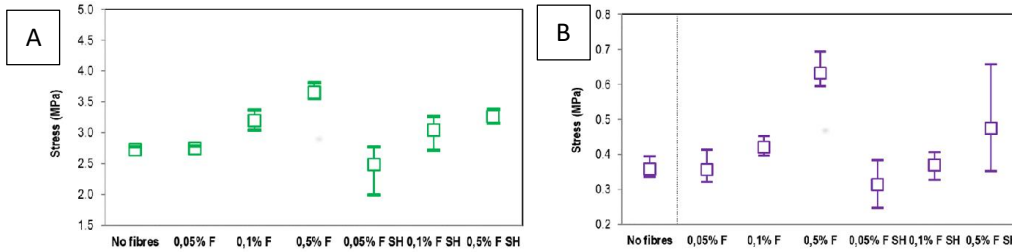
Penggunaan teknologi aspal hangat diketahui memiliki beberapa keuntungan, antara lain untuk mengurangi emisi gas, efisiensi konsumsi bahan bakar pada level 20-35% (Zaumanis 2011) (D'Angelo and al. 2008), serta peluang untuk melakukan pemadatan dalam periode yang lebih lama dibandingkan campuran aspal panas, sehingga mengurangi durasi pengerjaan (Prowell, Hurley and Frank 2012). Akan tetapi, campuran aspal hangat juga dilaporkan memiliki beberapa kerugian dari segi performa, yang paling utama adalah terkait performa struktur dalam jangka panjang, terutama potensi kerusakan akibat pengaruh air/kelembaban, karena salah satu teknologi utama untuk produksi campuran aspal hangat yakni menggunakan *foam* yang dapat berubah menjadi air dalam proses pencampuran sehingga dapat menurunkan kualitas campuran tersebut.

Salah satu metode untuk memperbaiki kualitas campuran aspal hangat yaitu dengan menggunakan fibre sebagai bahan tambah. Penggunaan fibre telah menjadi hal umum dalam teknik sipil, secara khusus di konsentrasi struktur jalan, dimana penggunaan pertama dalam peradaban modern tercatat pada periode 1920-an di Amerika Serikat dengan menggunakan bahan asbestos (Mcdaniel 2015). Penggunaan asbestos sebagai material tambah menjadi hal yang wajar hingga periode 1970-an, dimana penggunaan asbestos dilarang karena bahayanya bagi kesehatan. Oleh karena itu, penggunaan material lain sebagai fibre mulai diminati, hingga saat ini tipe-tipe fibre yang umumnya digunakan terbagi atas beberapa kategori sesuai material pembentuknya, yakni mineral, glass, selulosa dan polimer sintesis. Secara umum, penggunaan fibre sebagai bahan tambah pada campuran aspal dilaporkan dapat meningkatkan kuat tarik, umur layan terhadap beban siklik (*fatigue life*) serta ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*) sehingga akan meningkatkan durabilitas campuran aspal (Mcdaniel 2015). Fibre aramid dan polyolefin termasuk dalam kategori polimer sintesis. Aramid, bernama kimia para-phenyleneterephthalamide, dibentuk melalui proses sintesis oleh dua monomer yakni 1,4-phenylenediamine dan terephthaloyl dichloride dengan menggunakan methyl pyrrolidone dan kalsium klorida sebagai bahan pelarut (Van Der Zwaag 2009). Aramid dikenal memiliki rasio kuat tarik terhadap berat jenis yang tinggi (>5 kali fibre baja dan glass), *fatigue resistance* yang tinggi (>10 juta *cycles*) serta daya tahan yang baik terhadap panas (kehilangan hanya <20% kuat tarik pada suhu 200°C), sehingga sering digunakan untuk struktur untuk mencapai berat yang ringan dengan mutu tinggi atau struktur pada lokasi yang ekstrim (Jassal and Ghosh 2002). Sedangkan polyolefin terbagi atas beberapa sub-klaster, seperti High-Density Polyethylene (HDPE), Low-Density Polyethylene (LDPE), dan Polypropylene (PP). Pembuatan fibre polyolefin diawali dari penemuan polyethylene sebagai sisa dari pengujian kimia pada tekanan tinggi, yang mana mengawali metode produksi LDPE. Polyolefin memiliki beberapa keunggulan seperti berat jenis yang ringan (~0.9 gr/cm³) dengan kekuatan tarik yang bervariasi antara 17-80 MPa serta modulus elastisitas yang relative tinggi antara 200-1000 MPa, dimana PP memiliki sifat yang lebih unggul dibandingkan PE (Hutley and Ouederni 2016), (Grigoriu and Blascu 2000).

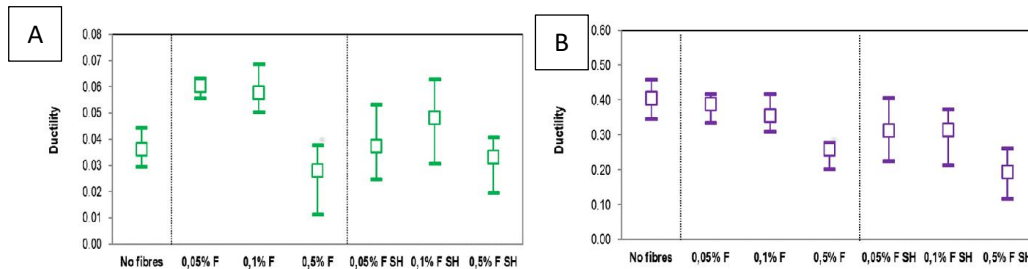
Efek dari penggunaan kombinasi fibre aramid dan polyolefin pada campuran aspal telah diteliti pada campuran aspal panas (Kaloush, et al. 2008), dimana penambahan material fibre dapat meningkatkan kuat geser serta ketahanan terhadap beban siklik, dan juga kekuatan tarik campuran aspal. Penelitian lain juga membuktikan efek dari penambahan fibre aramid dan polyolefin terhadap kualitas campuran aspal untuk lapangan terbang, dimana fibre yang ditambahkan dapat meningkatkan kekakuan serta ketahanan terhadap *ravelling* (Stempihar, Souliman and Kaloush 2012).

Penelitian terkait kegunaan fibre aramid dan polyolefin sebelumnya juga telah dilakukan penulis untuk meninjau pengaruh temperatur terhadap kekuatan tarik campuran aspal hangat. Penelitian

tersebut menunjukkan bahwa penggunaan fibre sebagai material perkuatan akan berfungsi dengan lebih maksimal pada temperatur pengujian yang tinggi (20°C). (Apostolidis, et al. 2019)



Gambar 1. (A) Kuat Tarik Spesimen pada Temperatur 5°C dan (B) 20°C



Gambar 2. (A) Daktilitas Spesimen pada Temperatur 5°C dan (B) 20°C

Gambar menunjukkan bahwa efek dari penggunaan fibre pada campuran aspal memberikan hasil kuat tarik yang lebih signifikan saat diuji pada temperatur yang lebih tinggi (20°C). Hal ini disebabkan oleh sifat bitumen yang menjadi lebih viscous pada suhu tersebut, sehingga parameter kritis yang menentukan keruntuhan sampel tersebut adalah *interfacial bonding* antara fibre dan mortar matrix, sehingga nilai kuat tarik serta modulus elastisitas fibre yang tinggi memberikan dampak yang lebih signifikan dibandingkan pada suhu yang rendah. Dapat disimpulkan bahwa penggunaan fibre pada struktur perkerasan sendiri menjadi lebih optimum jika digunakan pada temperatur layan yang relative tinggi. Hanya saja, peningkatan kapasitas tarik ini menyebabkan daktilitas sampel berkurang (Gambar), dengan kata lain material dengan dosis fibre yang besar kehilangan kemampuan untuk meregang. Oleh karena itu, penelitian tersebut menyimpulkan bahwa campuran aspal dengan proporsi fibre aramid-polyolefin sebesar 0.1% memberikan hasil yang optimum dibandingkan dengan opsi lainnya.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan

Penelitian ini menggunakan kombinasi fibre aramid dan polyolefin dengan proporsi 10% dan 90%. Adapun spesifikasi fibre sesuai dengan standar manufaktur dapat dilihat pada Tabel 1.

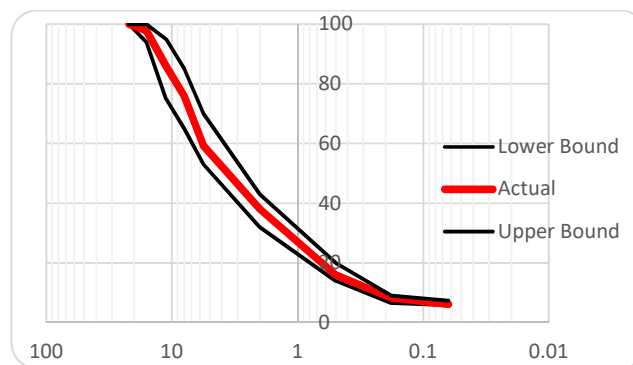
Tabel 1. Spesifikasi teknis fibre aramid-polyolefin yang digunakan

<u>Physical Properties</u>		
<i>Aramid Fibres</i>		
Length	19	mm
Form	Monofilament	
Tensile Strength ⁺	2758	Mpa
Specific Gravity	1,44	
Operating Temperaturs	-73 - 427	°C
<i>Polyolefin Fibres</i>		

Length	19	mm
Form	Serrated	
Tensile Strength	N/A	*
Specific Gravity	0,91	
Operating Temperaturs	N/A	*

* *Fibres will become plastically deformed during asphalt mix production*

Untuk campuran yang digunakan pada pengujian ini adalah campuran aspal hangat dengan gradasi tipe DAC-16, sesuai dengan standard mix design Belanda (*DAB – dense asphalt beton*), seperti yang terlihat pada Gambar . Adapun untuk keperluan pembuatan sampel aspal mortar, pasir yang diambil didefinisikan dari yang tertahan pada saringan ukuran 0.5 mm yang dapat dilihat pada Tabel . Bitumen yang digunakan adalah bitumen penetration grade 50/70, serta *chemical additive* ANOVA 1501 yang dapat menurunkan temperatur bitumen hingga 40°C dan mempermudah proses kompaksi tanpa memodifikasi sifat reologinya (Cargill, Inc. n.d.).



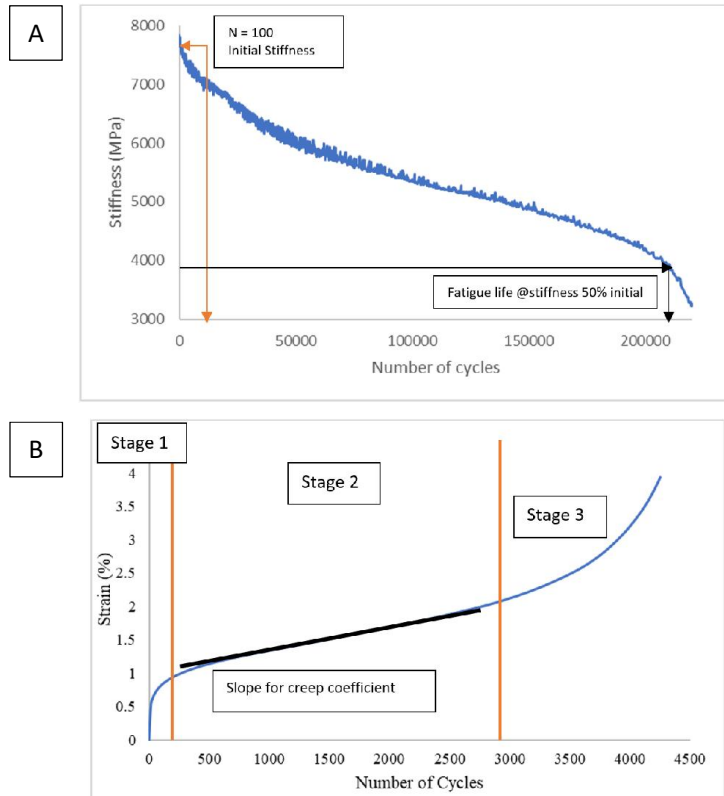
Gambar 3. Hasil Analisa Saringan untuk Campuran Aspal Hangat DAC-16

Tabel 2. Komposisi Aspal Mortar berdasarkan Gradasi DAC-16

Komponen	Proporsi
Sand	47.10%
Bitumen 50/70	23.80%
Filler (Wigras)	29.00%
ANOVA 1501	0.7% of bitumen weight

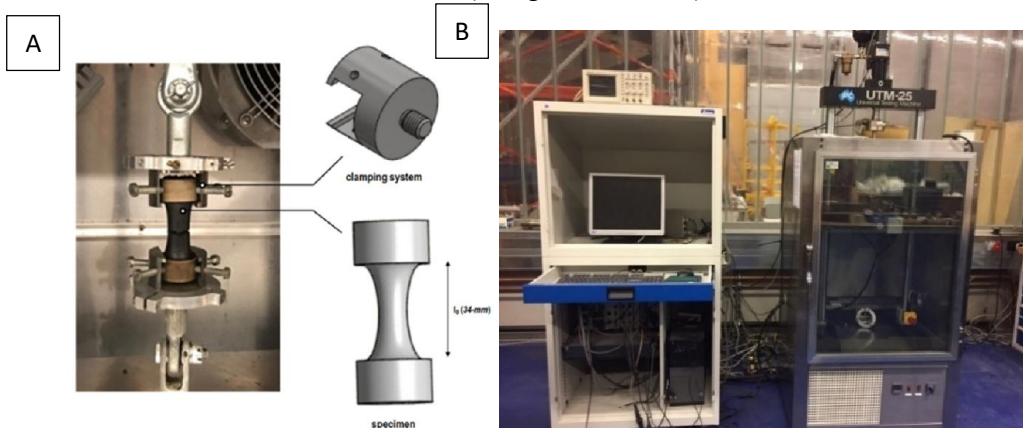
Sampel dan Pengujian

Untuk pengujian standard sebagai tahap awal penelitian ini, campuran aspal hangat dibuat dengan bentuk spesimen balok untuk pengujian 4-point bending, dan silinder untuk pengujian triaxial. Nilai kekakuan dari pengujian 4-point bending didapatkan dari hasil kekakuan setelah 100 cycles (initial stiffness), dimana pengujian dilakukan dalam beberapa variasi frekuensi untuk mengetahui pengaruh frekuensi beban terhadap kekakuan spesimen. Sedangkan nilai fatigue life diambil dari jumlah cycles yang ditempuh dimana kekakuan sampel telah mencapai 50% dari nilai kekakuan awal. Pengujian 4-point bending dilakukan sesuai dengan standard Eurocode NEN 12697-24 dan 12697-26. Sedangkan pengujian triaxial menghasilkan kurva deformasi terhadap waktu yang dibagi dalam tiga fase: fase 1 (elastis), fase 2 (viscoelastic) dan fase 3 (menjelang keruntuhan). Nilai creep coefficient sendiri ditetapkan sesuai standard Eurocode NEN 12697-25 sebagai eksponen dari slope fungsi matematis yang terdapat pada fase kedua, dimana deformasi permanen mulai terjadi. Skema hasil pengujian 4-point bending metode interpretasi data dapat dilihat pada Gambar .



Gambar 4. (A) Hasil uji dan interpretasi data 4-point bending dan (B) Triaxial

Pada tahap selanjutnya, sampel aspal mortar untuk pengujian tarik dibuat dengan bentuk parabolic seperti pada Gambar . Pemilihan geometri tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa bidang keruntuhan terjadi pada bagian tengah dari sampel tersebut, atau untuk menghindari keruntuhan terjadi pada bagian atas/bawah spesimen, yang mana berpotensi menimbulkan kerusakan pada mesin test seperti yang terjadi pada penelitian menggunakan sampel silinder sempurna (Bolzan and Huber 1993). Bentuk geometri tersebut pertama kali dikemukakan pada awal periode 2000-an (Erkens and Poot 2001), kemudian dilakukan pemodelan lebih lanjut menggunakan finite element untuk membuktikan failure mode tersebut (Kringos, et al. 2011).



Gambar 5. (A) Setup uji tarik dan (B) Mesin UTM

CT-Scan juga dilakukan untuk sampel mortar sebelum dan setelah pengujian tarik, yang bertujuan untuk menganalisis mekanisme relasi antara fibre dengan komponen lain dalam spesimen tersebut, sehingga mekanisme perkuatan yang diberikan oleh fibre dapat diidentifikasi.

Hasil pengujian tarik adalah data force-displacement yang direkam oleh system untuk kemudian dikonversikan menjadi tegangan dan regangan menggunakan rumus (1) dan (2)

$$\sigma = \frac{F}{0.25\pi d^2} \quad (1)$$

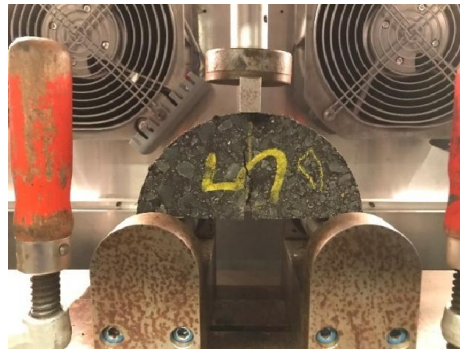
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Untuk tahap akhir, pengujian semi-circular bending dilakukan menggunakan mesin UTM berdasarkan standard Eurocode NEN 12697-44. Metode ini dipilih karena dapat merepresentasikan nilai kekuatan tarik campuran aspal dengan lebih jelas ketimbang pengujian standard ITT, dimana failure mode yang terjadi pada uji ITT adalah kombinasi antara tekan dan Tarik, sedangkan pada uji SCB keruntuhan akibat tarik menjadi failure mode yang dominan terjadi (Molenaar, et al. 2002), (Molenaar, Liu and Molenaar 2003). Pengujian tersebut dilakukan pada suhu 0°C, dimana hasil pengujian akan diolah menggunakan rumus berikut:

$$\sigma_{max,i} = \frac{4.263 \cdot F_{max,i}}{D_i \cdot t_i} \quad (3)$$

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (4)$$

Sampel untuk pengujian SCB beserta test setup dapat dilihat pada Gambar

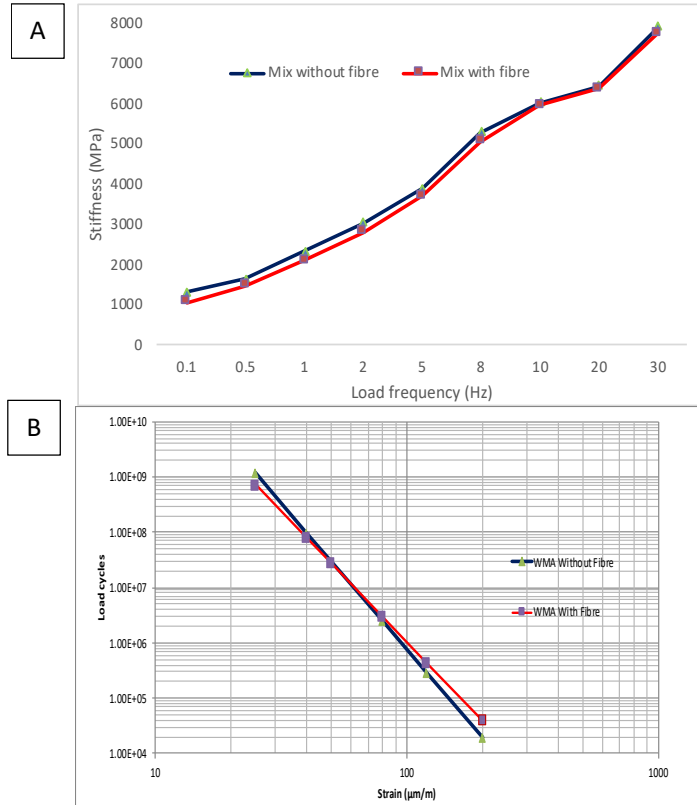


Gambar 6. Test Setup Semi Circular Bending

HASIL DAN PEMBAHASAN

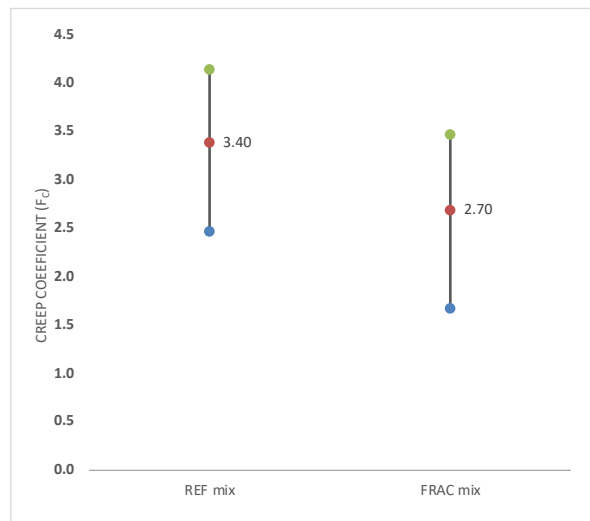
Uji Awal – Standard Test

Bagian pertama penelitian ini adalah dengan menggunakan serangkaian uji standard untuk menentukan kualitas campuran aspal hangat hasil penambahan fibre aramid-polyolefin dengan dosis 0.05% dari berat spesimen, sesuai dengan saran distributor. Pengujian pertama, yakni 4-point bending test, menghasilkan data berupa kekakuan serta umur hidup sampel terhadap beban siklik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar .



Gambar 7. (A) Nilai kekakuan dan (B) fatigue hasil pengujian 4-point bending beam

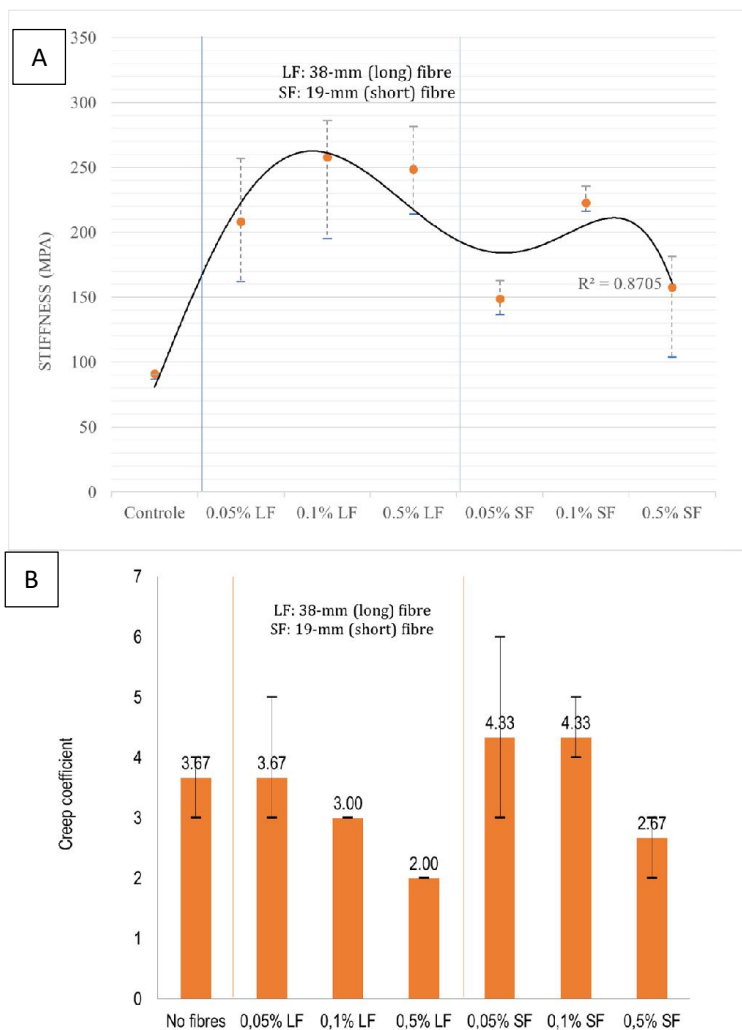
Dari data diatas dapat dilihat bahwa dengan penambahan fibre, walaupun tidak berpengaruh secara signifikan terhadap kekakuan material (pada range 1 – 8 GPa), ternyata dapat meningkatkan umur layan spesimen dalam uji fatigue, khususnya pada frekuensi beban yang tinggi sebesar hampir 2 kali lipat. Dapat dilihat dari kedua grafik bahwa peningkatan performa yang lebih signifikan pada saat dibebani dengan strain level yang tinggi, baik kurva evolusi kekakuan maupun fatigue life dari spesimen yang diuji. Strain level yang tinggi dapat diasosiasikan dengan kelajuan beban yang rendah, menandakan bahwa penggunaan fibre akan lebih optimum pada struktur perkerasan dengan tingkat kecepatan rencana yang rendah.



Gambar 8. Koefisien deformasi permanen hasil pengujian triaxial

Koefisien creep adalah gradien dari kurva hasil pengujian triaxial menggunakan beban siklik yang batasnya diambil mulai dari titik dimana deformasi viscoelastic mulai terjadi. Berdasarkan Gambar , terlihat jelas bahwa koefisien creep sampel dengan penambahan fibre berada di bawah sampel uji control dengan perbedaan sekitar 20%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan fibre pada campuran aspal dapat meningkatkan resistensi campuran tersebut terhadap deformasi permanen akibat pembebanan dalam jangka waktu tertentu.

Pengujian Aspal Mortar – Uji Tarik



Gambar 9. (A) Nilai Kekakuan dan (B) creep coefficient Hasil Uji Tarik Sampel Aspal Mortar

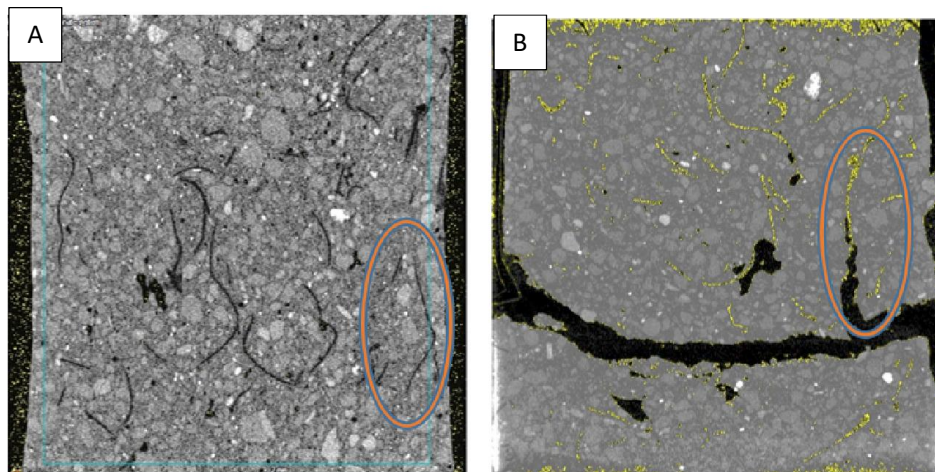
Pengujian tarik dengan menggunakan spesimen aspal mortar menunjukkan hasil berupa kekakuan, yang dapat dilihat pada Gambar . Nilai ini hanya dapat dihasilkan pada temperatur yang cukup rendah, dimana bitumen bertindak sebagai material yang elastis. Pada suhu yang lebih tinggi, bitumen akan bersifat viscoelastic, sehingga penentuan kekakuan elastic tidak dapat menggambarkan perilaku struktur secara akurat.

Hasil pengujian pada suhu -5°C menunjukkan adanya peningkatan pada nilai kekakuan melalui penambahan fibre dibandingkan dengan sampel uji control, dimana kekakuan sampel uji dengan fibre meningkat sebesar 190% dari sampel uji tanpa fibre. Hal ini menunjukkan adanya peran fibre sebagai material pengikat dalam sampel tersebut, yang juga mengindikasikan adanya peningkatan

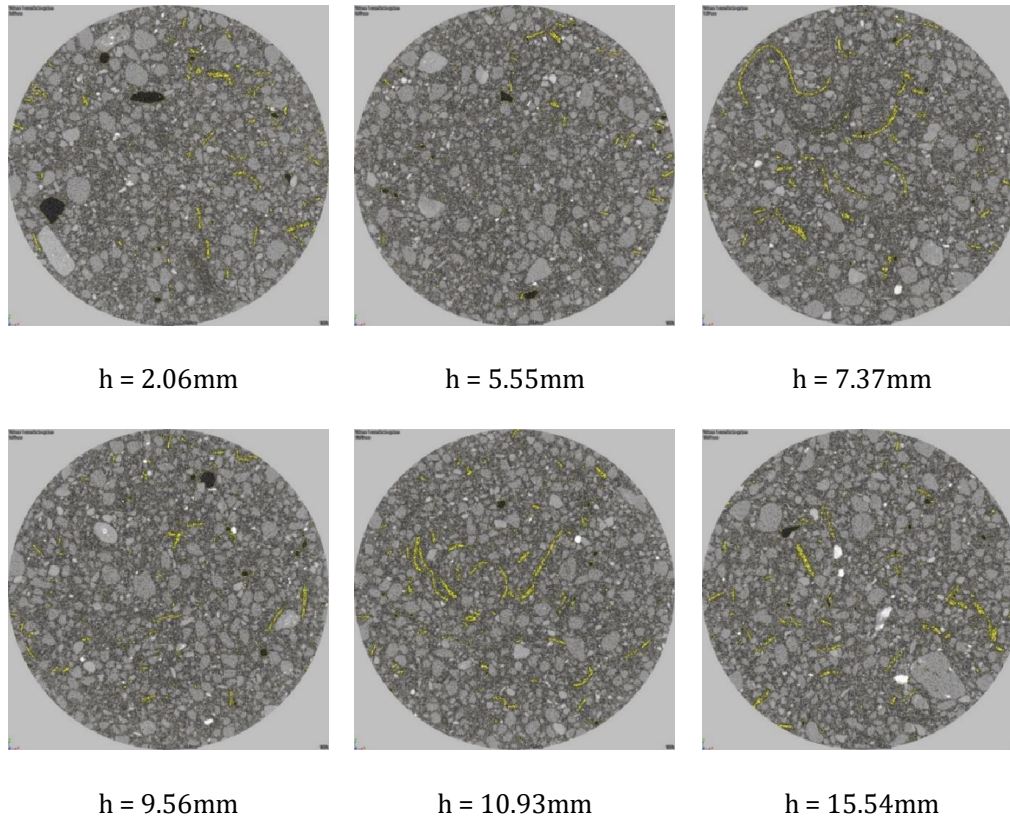
kekuatan dari spesimen. Selain itu, parameter kekakuan spesimen dengan dosis fibre berukuran 38-mm sebesar 0.1% memiliki nilai yang relative sebanding dengan campuran yang memiliki dosis fibre sebesar 0.5%. Hal ini terjadi karena pada dosis 0.5%, dapat terjadi fenomena *clumping*, dimana fibre terkumpul dan terpusat dalam satu titik yang menyebabkan mekanisme kerja fibre dalam aspal relative kurang optimum. Walau terlihat pula bahwa dosis fibre yang cukup besar dapat menurunkan resiko terhadap deformasi permanen yang cukup signifikan, tetapi nilai koefisien dari campuran dengan fibre ukuran 38-mm proporsi 0.1% w/t tidak berbeda jauh dengan campuran dengan fibre ukuran 19-mm proporsi 0.5% w/t.

Lebih jauh lagi, hasil pengujian tarik menggunakan beban siklik menunjukkan bahwa penambahan fibre pada campuran aspal mortar memberikan nilai resistensi terhadap deformasi permanen (*rutting*) yang lebih tinggi, seperti terlihat pada *creep coefficient* pada Gambar . Berdasarkan grafik tersebut, peningkatan dosis fibre yang digunakan akan meningkatkan nilai ketahanan campuran aspal hingga mencapai 45%. Akan tetapi, penggunaan dosis yang kurang tepat dan/atau penggunaan fibre berukuran 19-mm ternyata menimbulkan dampak yang negative terhadap hasil pengujian. Hal ini disebabkan oleh mekanisme ikatan yang terjadi pada interface fibre-matrix itu sendiri (Park, El-Tawil and Naaman 2017). Dalam pengujian campuran dengan dosis dan penggunaan fibre dengan panjang yang tepat, kapasitas fibre untuk menyalurkan beban secara merata menjadi lebih optimum, sehingga beban dapat ditransfer dari 1 fibre ke fibre lainnya tanpa menimbulkan kerusakan pada matriks. Selain itu, fungsi fibre sebagai material pengikat juga menjadi lebih maksimal karena adanya kontribusi dari beberapa fibre pada satu lokasi. Dengan penggunaan yang kurang tepat, fibre tersebut malah akan berpotensi menjadi material lubrikasi yang menurunkan gaya gesek di dalam mortar matrix, sehingga menyebabkan keruntuhan dapat terjadi lebih cepat dari yang seharusnya.

Adapun mekanisme perkuatan yang diberikan oleh fibre yang dicampur dalam spesimen diilustrasikan pada Gambar . Pada gambar hasil CT-Scan sampel uji tarik tersebut terlihat jelas bahwa fibre tersebut menjadi material pengikat, dimana pada mode keruntuhan, fibre tersebut mengalami perpindahan dari lokasi semula. Hal tersebut mengindikasikan bahwa selama pembebanan berlangsung, fibre tersebut memikul beban yang ditransfer dari mortar matrix. Selain itu, fibre berfungsi untuk menahan agar keretakan pada spesimen tidak serta merta menimbulkan failure pada sampel, yakni dengan melalui mekanisme gaya interface (*interface bonding*) antara fibre dan mortar matrix. Hal tersebut sesuai dengan hasil pengujian , dimana adanya *bonding length* antara fibre dan matrix menimbulkan adanya resistance terhadap pembebanan yang diberikan.



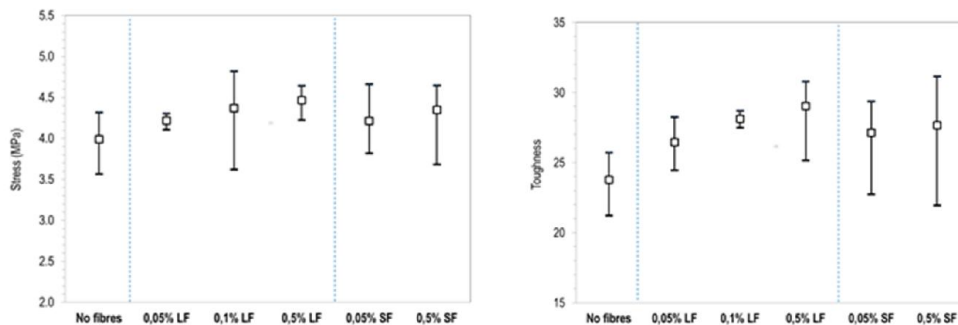
Gambar 10. (A) Mekanisme perkuatan fibre dalam campuran dilihat melalui CT-Scan sebelum pengujian dan (B) setelah pengujian



Gambar 11. CT-Scan Penampang Melintang Sampel uji Tarik Mortar

Gambar merupakan hasil CT-Scan yang menunjukkan distribusi fibre di seluruh bagian spesimen uji. Adanya distribusi yang tidak merata disebabkan oleh metode fabrikasi sampel yang sifatnya manual, dimana metode pencampuran serta pemadatan menggunakan metode manual. Selain itu, dalam perhitungan rencana pun dibuat dalam bentuk *batch*, dimana 1 *batch* campuran dapat dibuat menjadi 6 sampel. Hal-hal tersebut berpengaruh terhadap variasi nilai hasil pengujian serta lokasi keruntuhan sampel. Sekaligus, gambar ini dapat menunjukkan potensi fibre untuk terkonsentrasi pada lokasi tertentu, membentuk fenomena *clumping*.

Penelitian Pendukung – Semi Circular Bending



Gambar 8. Hasil Pengujian Semi-Circular Bending

Dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa penambahan fibre pada benda uji akan meningkatkan kekuatan sampel hingga 12.5% serta nilai energi yang dibutuhkan untuk mencapai keruntuhan hingga sebesar 17%. Hasil tersebut pun mendukung hasil pengujian sebelumnya, bahwa dosis 0.1% fibre dengan

panjang 38-mm memberikan hasil yang relative setara dengan campuran dengan dosis 0.5%. Seperti dijelaskan sebelumnya, ini terjadi karena pada dosis 0.5%, dapat terjadi fenomena *clumping*, dimana fibre terkumpul dan terpusat dalam satu titik yang menyebabkan mekanisme kerja fibre dalam aspal relative kurang optimum.

KESIMPULAN

Dari hasil tersebut dapat dilihat beberapa hal sebagai berikut. Pengujian standar yang dilakukan (ITT, triaxial dan 4-point bending test) berhasil memperlihatkan adanya peningkatan performa spesimen campuran aspal hangat dengan tambahan konten fibre aramid-polyolefin sebesar 0.05% dari berat campuran. Hanya saja, peningkatan yang dihasilkan tidak terlalu signifikan, kecuali dari segi ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting*). Kemudian dari hasil pengujian kuat tarik pada suhu -5°C dapat disimpulkan bahwa penambahan fibre dengan kadar 0.1% dari berat spesimen menghasilkan kekakuan yang optimum. CT-Scan pada sampel mortar dapat menjelaskan hasil tersebut, bahwa adanya transfer beban antar fibre serta *interfacial bonding* antara fibre dan komponen lain pembentuk mortar akan meningkatkan kekuatan benda uji, tetapi dengan proporsi yang tidak tepat akan mengurangi kekuatan sampel karena sifatnya yang menjadi bahan pelumasan. Hal tersebut juga dapat dilihat dari hasil pengujian *Semi-Circular Bending*, dimana penambahan fibre dengan dosis 0.1% memberikan hasil yang optimum dibandingkan dosis yang lain. Selain itu, terlihat juga bahwa efek perbedaan panjang fibre (38 dan 19 mm) berdampak pada hasil pengujian, dimana fibre dengan ukuran lebih panjang memberikan hasil yang lebih tinggi. Dapat disimpulkan bahwa untuk dosis penggunaan fibre aramid dan polyolefin disarankan pada level 0.1% dari total berat campuran, serta dengan menggunakan fibre yang berukuran lebih panjang untuk memperoleh kapasitas perekatan yang optimum sehingga menghasilkan campuran aspal hangat dengan performa yang maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Apostolidis, P., X. Liu, C.G. Daniel, S.M.J.G. Erkens, och A. Scarpas. "Effect of Synthetic Fibres on Fracture Performance of Asphalt Mortar." *Road Materials and Pavement Design*, 2019.
- Bolzan, P.E., och G. Huber. *Direct Tension Test Experiments*. Austin: Strategic Highway Research Program, 1993.
- Cargill, Inc. "Cargill - Asphalt Warm Mix Additives." <https://www.cargill.com/bioindustrialanova/asphalt-warm-mix-additives>. u.d. <https://www.cargill.com/bioindustrialanova/asphalt-warm-mix-additives> (använd 8 2019).
- Chang, K. "Aramid Fibers." (Materials Park, OH: ASM International) 2001: 41-45.
- Chowdhury, Arif, och J.W. Button. *A review of warm mix asphalt*. Texas Transportation Institute. Texas A&M University System., 2008, 75.
- D'Angelo, John, och et al. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. Alexandria: US Federal Highway Administration, 2008.
- Erkens, S.M.J.G., och M.R. Poot. *The Uniaxial Tension Test - Asphalt Concrete Response (ACRe)*. Delft: Delft University of Technology, 2001.
- Grigoriu, A., och V. Blascu. "Polyolefin Fibers." i *Handbook of Polyolefins*, av Cornelia Vasile, 773-824. Marcel Dekker, Inc, 2000.
- Hutley, T.J., och M. Ouederni. "Polyolefins—The History and Economic Impact." i *Polyolefin Compounds and Materials - Fundamentals and Industrial Applications*, av M.A. AlMa'adeed, & I. Krupa, 13-50. Springer, Cham, 2016.
- Jassal, M, och S Ghosh. "Aramid fibres-An overview." *Indian Journal of Fibre and Textile Research* 27, nr 3 (2002): 290-306.
- Kaloush, K.E., W.A. Zeiada, K.P. Biligiri, M.C. Rodezno, och J. Reed. "Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests." *The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition*. Cancun, 2008.

- Kringos, N., R. Khedoe, A. Scarpas, och A. de Bondt. "A New Asphalt Concrete Moisture Susceptibility Test Methodology." *Transportation Research Board 90th Annual Meeting*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2011.
- Mcdaniel, R.S. "Fiber Additives in Asphalt Mixtures." *NCHRP SYNTHESIS 475*, 2015.
- Molenaar, A.A.A., A. Scarpas, X. Liu, och S.M.J.G. Erkens. "Semi-Circular Bending Test: Simple But Useful?" *Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*. 2002.
- Molenaar, J.M.M., X. Liu, och A.A.A. Molenaar. "RESISTANCE TO CRACK-GROWTH AND FRACTURE OF ASPHALT MIXTURE." *6th RILEM Symposium PTEBM'03*. Zurich, 2003.
- Park, P., S. El-Tawil, och A.E. Naaman. "Pull-out behavior of straight steel fibers from asphalt binder." *Construction and Building Materials* 144 (2017): 125 - 137.
- Prowell, B.D., G.C. Hurley, och B. Frank. "Warm-Mix Asphalt: Best Practices." *Quality Improvement Publication 125, 3rd Edition*, 2012.
- Stempihar, J.J., M.I. Souliman, och K.E. Kaloush. "Fiber-Reinforced Asphalt Concrete as Sustainable Paving Material for Airfields." *Journal of the Transportation Research Board* (Transportation Research Board of the National Academies), nr 2266 (2012): 60-68.
- Van Der Zwaag, S. *Structure and properties of aramid fibres*. Vol. 1, i *Handbook of Textile Fibre Structure - Fundamentals and Manufactured Polymer Fibres*, av S.J. Eichhorn, J.W.S. Hearle, M. Jaffe, & T. Kikutani, 394-412. Woodhead Publishing Limited, 2009.
- Zaumanis, Martins. *Asphalt is Going Green: Overview of Warm Mix Asphalt technologies and research results from all over the world*. Berlin: Lambert Academic Publishing, 2011.