



Perilaku *Rutting* dan Modulus Kekakuan dengan Penguatan Serat Ijuk pada Campuran Beton Aspal

Andi Alifuddin*, Muhammad Ridha Kasim, Lambang Basri Said

Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar

^{*}andi.alifuddin@umi.ac.id

Received: 21 Maret 2023 Revised: 5 Desember 2023 Accepted: 8 Januari 2024

Abstract

Reinforcement of sugar palm fibers in asphalt concrete mixtures to increase strength and flow index due to increased traffic loads and temperature effects in order to reduce the potential for permanent deformation. The purpose of this research is to assess the extent of the influence of jute fiber as a reinforcing material in enhancing the cohesive and tensile strength of asphalt concrete mixtures, particularly in response to temperature changes. This research was conducted using an experimental method in the laboratory, employing jute fiber based on an optimum percentage of 0.6%, with a length of 8 mm, and tested under various temperature conditions. The test results indicate that asphalt concrete mixture reinforced with jute fiber (DP) has a total deformation of 1.09 mm at a testing temperature of 40°C. Its deformation rate is 0.0033 mm/minute, which is smaller compared to the asphalt concrete mixture without jute fiber (TS) with a total deformation of 1.19 mm and a deformation rate of 0.0040 mm/minute at the same temperature. At 60°C, the asphalt concrete mixture with jute fiber (DP) shows a total deformation of 1.83 mm with a deformation rate of 0.0107 mm/minute, while without jute fiber, the total deformation is 2.00 mm with a deformation rate of 0.0113 mm/minute. In the results, the indirect tensile strength of the asphalt concrete mixture without using palm fiber was lower, the stiffness of the mixture was lower than that of using palm fiber and decreased linearly with increasing temperature.

Keywords: *Deformation, deformation rate, flow index, palm fiber, stiffness modulus*

Abstrak

Penguatan serat ijuk pada campuran beton aspal digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan indeks kelelahan akibat peningkatan beban lalu lintas dan pengaruh temperatur guna mengurangi potensi terjadinya deformasi permanen. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai sejauh mana pengaruh serat ijuk sebagai bahan penguat dalam meningkatkan kekuatan kohesif dan tarik dari campuran beton aspal, terutama dalam merespons perubahan temperatur. Penelitian ini dilaksanakan menggunakan metode eksperimental di laboratorium dengan menggunakan serat ijuk berdasarkan persentase optimum sebesar 0,6%, memiliki panjang 8 mm, dan diuji dengan variasi temperatur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran beton aspal yang diperkuat dengan serat ijuk (DP) memiliki total deformasi sebesar 1,09 mm pada suhu pengujian 40°C. Laju deformasinya sebesar 0,0033 mm/menit, yang lebih kecil dibandingkan dengan campuran beton aspal tanpa serat ijuk (TS) yang memiliki total deformasi 1,19 mm dan laju deformasi 0,0040 mm/menit pada suhu yang sama. Pada suhu 60°C, campuran beton aspal dengan serat ijuk (DP) menunjukkan total deformasi sebesar 1,83 mm dengan laju deformasi 0,0107 mm/menit, sementara tanpa serat ijuk memiliki total deformasi sebesar 2,00 mm dengan laju deformasi 0,0113 mm/menit. Pada hasil pengujian kuat tarik tidak langsung campuran beton aspal tanpa menggunakan serat ijuk modulus kekakuan campuran lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan serat ijuk dan mengalami penurunan secara linier seiring dengan meningkatnya temperatur.

Kata kunci: *Deformasi, indeks kelelahan, laju deformasi, modulus kekakuan, serat ijuk*

Pendahuluan

Faktor beban lalu lintas dan kondisi alam sekitarnya mempengaruhi perkerasan jalan raya. Tegangan tekan arah vertikal serta tarik arah radial merupakan beban yang ditimbulkan akibat lalu lintas dalam hal ini akibat beban roda kendaraan yang melintas di atas lapis perkerasan. Tekanan pada struktur perkerasan jalan dapat diakibatkan oleh adanya beban yang berulang-ulang dan terus-menerus dalam waktu tertentu. Beban ini akan memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan besar beban bekerja dan intensitas waktunya. (Serin *et al.*, 2012) Peningkatan tekanan pada struktur lapis perkerasan dapat mengakibatkan kerusakan deformasi permanen atau terbentuknya alur permukaan (*rutting*) pada suhu tinggi sebagai hasil dari kejadian geseran. (Suaryana *et al.*, 2016).

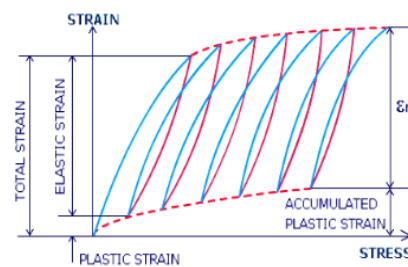
Gaya geser kemudian dapat diartikan sebagai pergeseran campuran aspal ke arah horizontal. Terdapat dua faktor utama penyebab terjadinya gaya geser. Pertama, berkaitan dengan campuran aspal yang tidak stabil, indeks plastis atau kelelahan yang terbentuk memiliki nilai yang rendah sehingga menyebabkan adanya pergeseran. Kedua yaitu berkaitan dengan kelelahan atau deformasi permanen pada lapisan perkerasan. Mekanisme ini terjadi saat campuran aspal mengalami deformasi plastis yang berkelanjutan akibat beban berulang, seperti lalu lintas kendaraan.

Ketidakstabilan dan gaya geser karena tekanan beban sering terjadi akibat penggunaan aspal pengikat yang berlebihan (rongga udara rendah). Hal ini dapat menyebabkan lendutan, *bleeding*, serta *rutting*. *Rutting* dapat secara signifikan mengurangi struktur dan kinerja fungsional struktur lapisan perkerasan jalan (Tapkin & Keskin, 2013). *Rutting*, kelelahan, dan retak pada temperatur rendah dikenal sebagai kerusakan aspal yang paling sering terjadi yang biasanya terjadi karena cuaca buruk dan lalu lintas berat dengan berfrekuensi tinggi (Sabouri *et al.*, 2018).

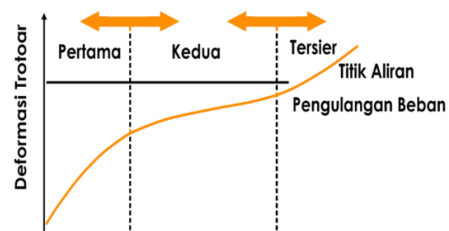
Deformasi permanen, berupa *rutting*, sering terjadi pada jalur dan area yang sering dilalui oleh roda kendaraan. *Rutting* dapat disebabkan oleh dua faktor utama. Pembebanan atau tekanan yang terlalu besar dan berulang secara terus-menerus dapat merusak lapisan bawah karena kondisi subgrade yang buruk. Kedua, *rutting* juga dapat disebabkan oleh tekanan atau pembebanan yang kemudian akan berdampak dan merusak lapisan dan struktur atas. (Aditya *et al.*, 2016).

Gambar 1 menunjukkan distribusi tegangan sampai terjadinya *rutting* dan geser pada perkerasan jalan lentur biasanya disebut dengan deformasi

permanen. Deformasi kecil akibat dari peningkatan beban yang terakumulasi biasanya akan membentuk alur. Alur ini biasanya merupakan lendutan yang memanjang akibat dari roda kendaraan (biasanya berbentuk jalur roda). (Asphalt Institute, 1996). Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, tahap awal atau indikasi awal terjadinya potensi *rutting* dapat dilihat dan ditandai dengan adanya perubahan volumetrik. Tahap kedua menunjukkan tingkat *rutting* yang kecil namun konstan juga akan terkait dengan perubahan volume campuran aspal. Namun dalam kondisi ini deformasi geser akan meningkat. Pada tahap ketiga atau tersier, tingkat *rutting* yang tinggi yang terkait dengan deformasi plastis (geser) juga akan menunjukkan perubahan volume. Perubahan Volume antara ketiga tahapan tersebut dapat dilihat pada rujukan sesuai dengan desain AASHTO. (AASHTO, 2002).



Gambar 1. Tegangan plastis yang terakumulasi pada perkerasan jalan (After asphalt institute, 1996 dalam Mahan, 2013)



Gambar 2. Deformasi permanen terhadap model beban berulang pada lapisan perkerasan: Analisis perilaku (AASHTO Design Guide., 2002, dalam (Mahan, 2013)

Untuk meningkatkan kinerja campuran terhadap terjadinya deformasi permanen, maka diperlukan suatu desain campuran dengan memberi perkuatan dengan penambahan material dengan perkuatan serat sebagai material komposit. Serat dalam campuran beton aspal dapat berfungsi sebagai material yang dapat meningkatkan sifat-sifat campuran. Sifat tersebut antara lain adalah elastisitas, tingkat kelelahan dan kekuatan material (García *et al.*, 2013); (Jamal Khattak *et al.*, 2013). Serat dapat pula berkontribusi dalam peningkatan ketahanan (Xue *et al.*, 2013). Penambahan serat secara langsung akan memberikan perubahan fisik terhadap campuran aspal, serta dapat meningkatkan nilai kohesif dan nilai tarik (Abtahi *et al.*, 2010).

Penambahan serat jenis tertentu dapat pula meningkatkan nilai penyerapan dan luas permukaan (Abiola *et al.*, 2014).

Serat juga dapat meningkatkan modulus dinamis, tahan air, ketahanan retak, dan ketahanan *rutting* pada campuran beton aspal, serta mencegah penyebaran atau perluasan retakan (García *et al.*, 2013; Aliha *et al.*, 2017), dapat pula memperbaiki alur, memperlambat kelelahan dan perilaku campuran pada temperatur rendah (Ziari & Moniri, 2019). Beberapa konsep atau teori terhadap karakteristik fungsi serat tersebut tidak hanya mengoptimalkan sifat serat, diameter, panjang, dan tekstur permukaan, tetapi juga mempertimbangkan mekanisme serat sebagai bahan penguat pada campuran beton aspal. (Abtahi *et al.*, 2010).

Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan untuk meningkatkan tegangan tarik adalah dengan penguatan serat atau penambahan serat pada campuran beton aspal untuk menguatkan campuran tersebut. Serat secara alami memiliki sifat lentur dan kemamuan tarik yang cukup tinggi, antara lain serat yang telah diidentifikasi memiliki sifat tersebut adalah serat ijuk. Jika dibandingkan dengan serat lain, khususnya serat yang berasal dari bahan mineral, serat ijuk memiliki keunggulan tiga keunggulan yaitu mudah didapatkan, harga yang lebih terjangkau dan memiliki massa jenis yang lebih rendah.

Serat ijuk dapat diperoleh dari batang aren, dan juga memiliki sifat ramah lingkungan dibandingkan dengan penggunaan serat mineral dalam hubungannya dengan limbah. Secara kimiawi memiliki kandungan selulosa yang dominan sebesar 51%, kandungan lignin sebesar 44%, hemiselulosa sebesar kurang lebih 15%, serta air dan abu dengan persentase masing-masing 8% dan 2,5%. Masing-masing kandungan tersebut memiliki fungsi tertentu, misalnya selulosa dan hemiselulosa menambah kekuatan adhesi, unsur lignin dapat berfungsi sebagai pelindung permukaan serat ijuk dari cuaca dingin dan panas, serta meningkatkan nilai tegangan (Santhiarsa, 2015).

Simulasi analisis kedalaman *rutting* dengan pengujian *wheel tracking* melibatkan pergerakan maju mundur beban roda di atas benda uji. Laju deformasi atau dalam istilah umum disebut *rate of deformation* (RD) diukur dalam satuan milimeter per menit. Nilai ketahanan deformasi dilakukan dengan mengukur kedalaman alur yang dihasilkan oleh benda uji (Hunter *et al.*, 2015). Selain nilai RD, nilai lain yang menjadi indikator deformasi adalah nilai stabilitas dinamis (*dynamic stability*) atau DS. DS dapat diartikan sebagai banyaknya jumlah lintasan yang dibutuhkan untuk membuat alur

dengan dalam 1 mm. Perhitungan nilai RD dan DS ditunjukkan dalam Persamaan 1 dan 2 (Suherman, 2012).

$$DS = 21 \times 2 \times \frac{(t_2 - t_1)}{(d_2 - d_1)} \times C_1 \times C_2 \quad (1)$$

$$RD = \frac{(d_2 - d_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

DS dinyatakan dalam satuan lintasan per milimeter (mm), sementara RD diukur dalam satuan milimeter per menit (mm/menit). Deformasi pada waktu pengujian 45 menit (d_1) dan 60 menit (d_2) diukur dalam milimeter. Faktor koreksi peralatan (C_1) dan faktor koreksi spesimen (C_2) masing-masing setara dengan 1,0. Waktu pengujian pertama adalah 45 menit (t_1), sedangkan waktu pengujian kedua adalah 60 menit (t_2).

Modulus kekakuan dihitung dengan uji kuat tarik tidak langsung (*indirect tensile strength*) dengan aplikasi beban secara vertical pada dimensi vertical silinder specimen sampel campuran aspal dengan terhadap beban dan temperatur pengujian (Mashaan *et al.*, 2013). Hasil pengujian deformasi horizontal diukur sebagai asumsi *passion ratio* untuk menghitung modulus resilien. Besarnya tegangan tarik dan modulus kekakuan horisontal pada campuran beton dapat dihitung berdasarkan Persamaan 3 dan 4.

$$\sigma_x(\max) = \frac{(2 \times P)}{(\pi \times d \times t)} \quad (3)$$

$$S_m = \frac{(P \times (\mu + 0.27))}{(H \times t)} \quad (4)$$

Dimana σ_{max} adalah tegangan tarik horisontal ditengah specimen, P adalah beban maksimum vertical yang diterapkan, d_x adalah diameter rata-rata spesimen, dan t ketebalan rata-rata specimen. Sedangkan S_m adalah modulus kekakuan, H adalah deformasi horisontal, dan μ adalah *passion ratio*.

Dalam penelitian ini akan menjadikan serat ijuk menjadi bahan penguatan campuran beton aspal. Penelitian ini adalah untuk menilai sejauh mana pengaruh serat ijuk sebagai bahan penguat dalam meningkatkan kekuatan kohesif dan tarik dari campuran beton aspal, terutama dalam merespons perubahan temperature.

Metode

Serat ijuk berasal dari pohon aren yang tumbuh di wilayah Sulawesi Selatan, dengan usia minimal 5 tahun dan harus memiliki serat hitam sebagai penguat. Serat ijuk yang dipilih dan diambil berasal dari bagian ujung dengan diameter 0,30 mm karena pada bagian itu solid tanpa lubang, berbeda dengan bagian pangkal yang berlubang dan mengandung gabus meskipun dalam jumlah kecil.

Sampel serat ijuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Agregat yang digunakan adalah batu pecah dengan ukuran menyesuaikan syarat spesifikasi campuran AC-WC dengan ukuran masing-masing sebesar 19,1 mm, 12,7 mm, dan 9,8 mm serta abu batu (lolos pada saringan No.4) dengan bahan pengikat aspal pen 60/70.



Gambar 3. a) Serat ijuk masih menyatu
b) Serat ijuk telah dipisahkan

Metode dalam penelitian adalah dengan melakukan pengujian ekperimental berdasarkan hiptotesa, penyeleksian sampel berdasarkan variasi komposisi panjang dan persentase serat, dan mengalokasi sampel pada kondisi eksperimental yang berbeda terhadap variasi temperatur pengujian. Model perlakuan serat ijuk dengan melakukan perendaman air laut selama 3 minggu (Mardin, H, *et al.*, 2016) seperti pada Gambar 4 dan selanjutnya dilakukan pengujian sifat mekanik serat ijuk pada uji tarik serat tunggal berdasarkan standar ASTM 3379-02 pada Gambar 5.



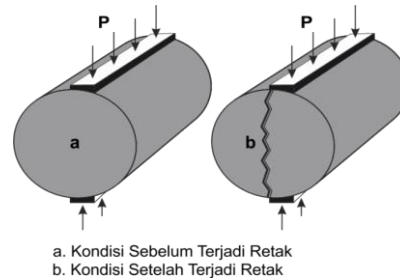
Gambar 4. Proses perendaman serat ijuk diameter 0,3 mm dengan air laut



Gambar 5. Set up uji tarik serat tunggal

Nilai modulus kekakuan diperoleh dari hasil pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* atau uji tarik tidak langsung. Uji ini dilakukan pada campuran yang telah ditambahkan serat ijuk. Adapun persentase penambahan serat ijuk terdiri dari 6 variasi dengan selisih 0,2% dimulai dengan

persentase penambahan 0,2% - 1,2%. Pengujian ini dilakukan dengan proses pemadatan dengan jumlah tumbukan 2×75 pada suhu 40°C . Panjang serat juga memiliki variasi yaitu 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, dan 14 mm. Model *set up* pengujian seperti ditampilkan pada Gambar 6.



a. Kondisi Sebelum Terjadi Retak
b. Kondisi Setelah Terjadi Retak
Sumber: Yoder *et al.*, 1975

Gambar 6. Ilustrasi pengujian IDT-Strength

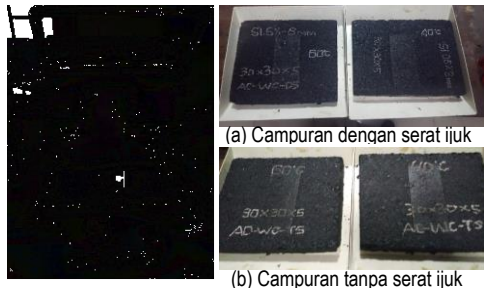
Pengujian kuat tarik tidak langsung digunakan untuk mengetahui sifat modulus kekakuan dan *passion ratio* seperti pada Gambar 7. Pengujian kuat tarik tidak langsung diuji untuk masing-masing variasi persentase dan panjang serat ijuk.



Gambar 7. Model pengujian ITS

Alat uji pengujian stabilitas dinamis dilakukan menggunakan *wheel tracking*, dimana benda uji berukuran $300 \times 300 \times 50$ mm dikenai beban roda yang bergerak bolak-balik sebagai simulasi beban roda kendaraan selama 60 menit. Deformasi permanen, sebagai indikator perubahan bentuk, diukur dalam pengujian *wheel tracking* dengan serat ijuk 8 mm dengan persentase optimum 0,6% pada temperatur 40°C dan 60°C . Pengujian dilakukan oleh roda penguji terbuat dari karet keras yang mempunyai diameter 20 cm dengan lebar 6 cm dan dibebani 6.4 ± 0.15 kg/cm². *Set up* pengujian dan model sampel uji seperti pada Gambar 8.

Hasil pengujian eksperimental di laboratorium adalah data karakteristik dan sifat campuran, seperti tegangan dan regangan tarik, modulus kekakuan, *passion ratio*, dan deformasi permanen, dengan memvariasikan panjang dan persentase serat ijuk serta temperatur. Analisis rancangan faktorial dengan metode statistik dilakukan untuk memahami hubungan antara parameter atau masing-masing variabel dengan data *output*.



Gambar 8. Set up pengujian *wheel tracking* dan kondisi deformasi permanen pada sampel uji

Hasil dan Pembahasan

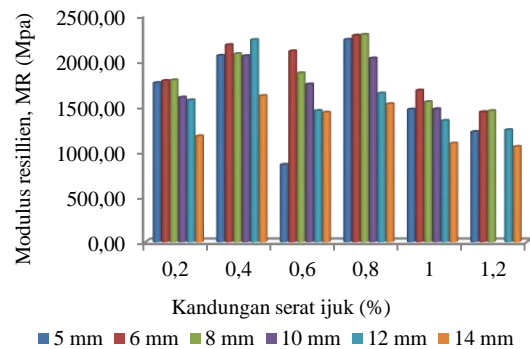
Hasil uji tarik serat tunggal

Pada Tabel 1 menunjukkan serat ijuk tanpa perendaman memiliki karakteristik dengan tegangan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan serat ijuk dengan perendaman air laut. Perendaman ini mengakibatkan modulus kekakuan dan sifat fleksibilitas serat semakin tinggi. Hal ini diakibatkan adanya penghapusan dan penurunan unsur lignin dan selulosa yang melapisi permukaan serat ijuk sehingga serat semakin lentur dengan persentase regangan sebesar 14,24%. Dibandingkan dengan serat ijuk tanpa rendaman persentase regangan yang terjadi lebih kecil sebesar 11,89%. Pada Tabel 2 menunjukkan modulus kekakuan campuran dengan variasi persentase terhadap panjang serat ijuk.

Hasil uji *indirect tensile strength*

Gambar 9 adalah hasil pengujian kuat tarik tidak langsung (*indirect tensile strength*) yang menunjukkan peningkatan nilai modulus resiliensi (MR) pada campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk hingga persentase 0,4% dari variasi panjang serat ijuk. Pada persentase 0,6%, terjadi penurunan yang diikuti oleh peningkatan pada persentase 0,8%, mencapai nilai modulus resiliensi maksimum. Selanjutnya, terdapat penurunan linear hingga persentase 1,2%. Pengaruh dan kontribusi panjang serat ijuk terlihat dalam peningkatan tegangan tarik dan regangan tarik, yang pada gilirannya meningkatkan modulus resiliensi. Pada persentase penggunaan serat ijuk 0,2% deviasi nilai tegangan dari panjang serat ijuk minimum 5 mm

terhadap panjang serat 8 mm sebesar $\sigma = 77,70$ Mpa dengan persentase rata-rata 4,42%. Sementara pada persentase 0,4% rata-rata peningkatan tegangan sebesar $\sigma = 64,73$ MPa dengan persentase 3,15%. Pada persentase 0,6% rata-rata kontribusi tegangan setiap panjang serat ijuk terhadap panjang serat optimum 8 mm sebesar $\sigma = 180,33$ MPa dan persentase sebesar 9,08% atau rata-rata kontribusi setiap penambahan panjang serat 8,74%. Hasil pada Tabel 2 dan Gambar 9 menunjukkan bahwa campuran dengan jumlah persentase serat yang sama tetapi panjang serat yang berbeda memiliki modulus kekakuan cenderung lebih rendah dengan panjang serat yang lebih pendek. Penggunaan serat panjang memberikan indikasi peningkatan rongga dalam campuran dengan kepadatan yang lebih rendah dibandingkan dengan serat yang pendek



Gambar 9. Hubungan kandungan serat dengan modulus resilien

Pada Gambar 10, terlihat bahwa modulus kekakuan mencapai nilai maksimum pada persentase 0,8% dengan panjang serat ijuk 8 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa campuran dengan persentase serat ijuk 0,8% pada berbagai panjang serat memiliki sifat modulus kekakuan yang lebih tinggi, dengan deformasi horisontal (Δdh) yang lebih kecil seperti ditunjukkan pada Gambar 11, dibandingkan dengan campuran dengan persentase serat ijuk 0,6%, yang memiliki deformasi horisontal yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa serat ijuk dengan persentase 0,6% dan panjang 8 mm memberikan sifat campuran yang lebih fleksibel, dengan deformasi horisontal maksimum Δdh_{maks} sebesar 1,68 mm dan *posision ratio* $\mu = 0,44$, seperti tercatat dalam Tabel 2, dan memiliki ketahanan terhadap terjadinya retak pada campuran.

Tabel 1. Hasil pengujian tarik serat ijuk diameter serat 0.3 mm

Sampel	Beban tarik (N/mm ²)	Luas (mm ²)	Tegangan tarik serat tunggal (N/mm ²)	Ø rata-rata (N/mm ²)	Erata-rata (%)
SI-Tr	5,91	0,07	134,71		
SI-M31	10,01	0,07	141,70		
SI-M32	9,73	0,07	137,65		
SI-M33	9,34	0,07	132,12	130.45	14.24
SI-M34	8,26	0,07	116,85		
SI-M35	8,76	0,07	123,92		

Tabel 2. Modulus kekakuan campuran dengan variasi persentase terhadap panjang serat ijuk

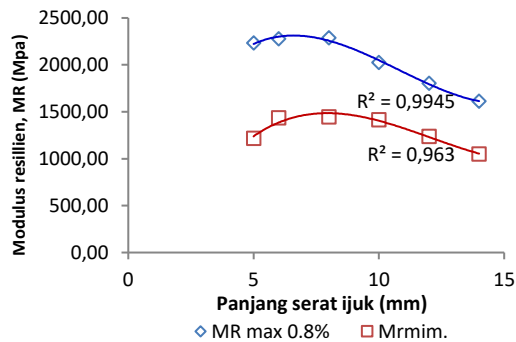
Komposisi campuran	Beban (KN)	Possion ratio (μ)	$\mu + 0.27$	Deformasi horisontal (mm)	Tinggi (mm)	Modulus kekakuan (Sm) Mpa
SI-DP-0,2%						
S1-0,2 %, L - 0,5 cm	200	0,33	0,60	1,05	65,5	1754,51
S1-0,2 %, L - 0,6 cm	222	0,34	0,61	1,10	65,5	1879,53
S1-0,2 %, L - 0,8 cm	211	0,36	0,63	1,13	65,5	1784,90
S1-0,2 %, L - 1,0 cm	194	0,34	0,61	1,07	65,5	1689,98
S1-0,2 %, L - 1,2 cm	173	0,31	0,58	0,98	65,5	1563,70
S1-0,2 %, L - 1,4 cm	125	0,29	0,56	0,92	65,5	1167,95
Rata-rata						1640,10
SI-DP-0,4%						
S1-0,4 %, L - 0,5 cm	235	0,36	0,63	1,10	65,5	2054,82
S1-0,4 %, L - 0,6 cm	255	0,37	0,64	1,15	65,5	2172,91
S1-0,4 %, L - 0,8 cm	254	0,36	0,63	1,18	65,5	2066,20
S1-0,4 %, L - 1,0 cm	230	0,40	0,67	1,15	65,5	2051,69
S1-0,4 %, L - 1,2 cm	193	0,37	0,64	0,85	65,5	2229,46
S1-0,4 %, L - 1,4 cm	149	0,40	0,67	0,95	65,5	1611,49
Rata-rata						2031,10
SI-DP-0,6%						
S1-0,6 %, L - 0,5 cm	245	0,36	0,63	1,18	65,5	1984,94
S1-0,6 %, L - 0,6 cm	265	0,38	0,65	1,25	65,5	2103,82
S1-0,6 %, L - 0,8 cm	280	0,44	0,71	1,63	65,5	1862,03
S1-0,6 %, L - 1,0 cm	248	0,41	0,68	1,48	65,5	1739,63
S1-0,6 %, L - 1,2 cm	200	0,37	0,64	1,35	65,5	1447,55
S1-0,6 %, L - 1,4 cm	156	0,33	0,60	1,00	65,5	1429,01
Rata-rata						1761,16
SI-DP-0,8%						
S1-0,8 %, L - 0,5 cm	264	0,34	0,61	1,21	65,5	2031,92
S1-0,8 %, L - 0,6 cm	280	0,38	0,65	1,22	65,5	2277,56
S1-0,8 %, L - 0,8 cm	290	0,41	0,68	1,32	65,5	2286,60
S1-0,8 %, L - 1,0 cm	258	0,39	0,66	1,28	65,5	2025,74
S1-0,8 %, L - 1,2 cm	220	0,34	0,61	1,25	65,5	1639,08
S1-0,8 %, L - 1,4 cm	169	0,31	0,58	0,98	65,5	1521,85
Rata-rata						1963,79
SI-DP-1,0%						
S1-1,0 %, L - 0,5 cm	171	0,32	0,59	1,02	65,5	1524,48
S1-1,0 %, L - 0,6 cm	182	0,33	0,60	1,03	65,5	1618,62
S1-1,0 %, L - 0,8 cm	180	0,32	0,59	1,05	65,5	1544,65
S1-1,0 %, L - 1,0 cm	170	0,30	0,57	1,02	65,5	1449,30
S1-1,0 %, L - 1,2 cm	141	0,28	0,55	0,90	65,5	1309,69
S1-1,0 %, L - 1,4 cm	108	0,25	0,52	0,77	65,5	1107,96
Rata-rata						1425,78
SI-DP-1,2%						
S1-1,2 %, L - 0,5 cm	135	0,31	0,58	0,98	65,5	1215,52
S1-1,2 %, L - 0,6 cm	161	0,29	0,56	0,96	65,5	1433,84
S1-1,2 %, L - 0,8 cm	155	0,29	0,56	0,92	65,5	1446,15
S1-1,2 %, L - 1,0 cm	133	0,28	0,55	0,78	65,5	1416,39
S1-1,2 %, L - 1,2 cm	110	0,26	0,53	0,72	65,5	1235,91
S1-1,2 %, L - 1,4 cm	86	0,22	0,49	0,62	65,5	1051,11
Rata-rata						1299,82

Hal sebaliknya terlihat pada Gambar 11. Nilai deformasi horizontal (Δdh) terbesar ditunjukkan pada campuran dengan panjang serat 8 mm. Nilai tersebut merupakan nilai yang paling tertinggi jika dibandingkan dengan campuran dengan variasi penambahan serat ijuk lebih tinggi (10 mm dan 12 mm) serta variasi penambahan serat ijuk yang lebih rendah (5 mm dan 6 mm).

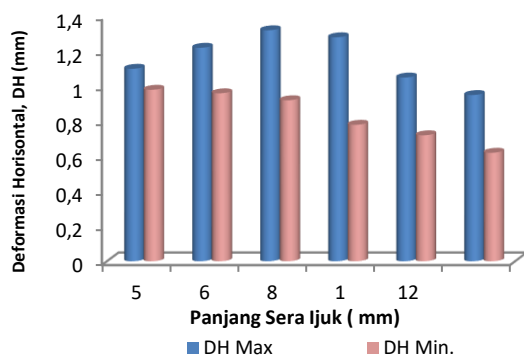
Telah dijelaskan oleh (Xue *et al.*, 2013) bahwa serat dengan ukuran yang lebih pendek akan secara

langsung menambah daya rekat aspal dalam mengikat campuran. Perpindahan, penyebaran dan penyerapan aspal sebagai bahan pengikat juga akan lebih baik apabila ditambahkan dengan serat yang berukuran lebih kecil atau pendek. Semakin erat ikatan antara aspal dan agregat maka resiko kerusakan struktur akan semakin kecil. Sementara itu menurut (Lavasani *et al.*, 2015), nilai tambah dari kuat tarik serat akan membuat campuran dapat menahan deformasi horizontal dengan baik. Namun perlu diperhatikan dengan baik terkait nilai batas

atau nilai optimum, karena penambahan serat yang terlalu banyak atau telah melebihi nilai optimum akan membuat campuran mengalami penurunan kekuatan.



Gambar 10. Hubungan nilai modulus resillien Mr maks dengan panjang serat ijuk



Gambar 11. Hubungan MR terhadap deformasi Dhmaks dan Dhmin

Deformasi permanen

Pengujian *wheel tracking* dalam penelitian ini digunakan untuk mencari nilai deformasi. Kemudian dari nilai deformasi ini dapat menghasilkan nilai stabilitas dinamis dan laju deformasi. Pengujian *wheel tracking* dilakukan dengan memberikan benda uji beban berupa roda yang bergerak maju mundur dengan jumlah lintasan atau dalam satuan waktu tertentu. Total waktu yang dibutuhkan adalah 60 menit dengan rincian pencatatan pada menit pertama, kelima, kesepuluh, 15, 30, 45 dan 60 menit. Tabel 3 dan Tabel 4 menampilkan hasil pengujian deformasi, dengan nilai optimum pada panjang serat 8 mm dan presentase optimum penambahan 0,6% (kemudian diberi simbol DP). Penambahan panjang dan variasi tersebut dibandingkan dengan nilai deformasi campuran tanpa serat ijuk (TS) dengan variasi pengujian pada suhu 40°C dan 60°C.

Tabel 3 mencantumkan data hasil percobaan pada suatu materi atau sistem pada suhu 40°C. Waktu dalam satuan menit mencatat durasi percobaan dalam menit. Jumlah Siklus (kali) merupakan

jumlah siklus percobaan yang dilakukan pada interval waktu tertentu. Semakin tinggi jumlah siklus, semakin tinggi intensitas beban yang diberikan pada sistem.

Tabel 3. Hasil pengujian wheel tracking pada temperatur 40°C

Waktu (menit)	Jumlah siklus	Deformasi (mm)	
		TS	DS
0	0	0,00	0,00
1	21	0,44	0,32
5	105	0,89	0,81
10	210	1,15	1,07
25	315	1,26	1,19
30	630	1,42	1,32
45	945	1,54	1,43
60	1260	1,60	1,09
Total deformasi		1,190	1,090
Stabilitas dinamis (lint/mm)		10,500	12,600
Laju deformasi (mm/menit)		0,004	0,003

Secara umum, dapat dilihat bahwa dengan adanya penguatan serat, deformasi cenderung lebih rendah dibandingkan tanpa serat pada setiap titik waktu dan siklus. Nilai deformasi pada kedua kondisi (tanpa serat dan dengan serat) cenderung meningkat seiring berjalannya waktu dan jumlah siklus. Pada setiap waktu dan siklus, deformasi cenderung lebih rendah saat menggunakan penguatan serat, menunjukkan efektivitas serat dalam mengurangi deformasi material pada kondisi tersebut. Pada akhir percobaan (60 menit), perbedaan deformasi antara tanpa serat dan dengan serat semakin terlihat, menunjukkan kontribusi positif penguatan serat terhadap ketahanan deformasi material pada suhu 40°C. Penguatan serat menghasilkan total deformasi yang lebih rendah, menunjukkan bahwa adanya serat dapat mengurangi deformasi keseluruhan pada material atau sistem.

Selain itu, penguatan serat meningkatkan stabilitas dinamis, menunjukkan bahwa material dengan serat lebih mampu mempertahankan integritas struktur saat menghadapi beban dinamis. Laju deformasi (mm/menit) juga menunjukkan bahwa penguatan serat mengurangi laju deformasi, menandakan bahwa material dengan serat lebih tahan terhadap deformasi seiring berjalannya waktu. Dengan demikian, penggunaan serat pada campuran memiliki dampak positif terhadap ketahanan deformasi dan stabilitas dinamis. Material dengan serat menunjukkan performa lebih baik dalam mengurangi total deformasi, meningkatkan stabilitas dinamis, dan mengurangi laju deformasi dibandingkan dengan material tanpa serat.

Tabel 4 memberikan gambaran tentang perubahan deformasi pada campuran beton aspal dengan dan tanpa penguatan serat pada berbagai waktu siklus

dan temperatur 60°C. Peningkatan jumlah siklus dapat mempengaruhi besarnya deformasi pada campuran, dan perbandingan antara deformasi dengan dan tanpa serat dapat memberikan informasi tentang efek penguatan serat terhadap ketahanan deformasi campuran pada suhu 60°C.

Tabel 4. Hasil pengujian wheel tracking pada temperatur 60°C

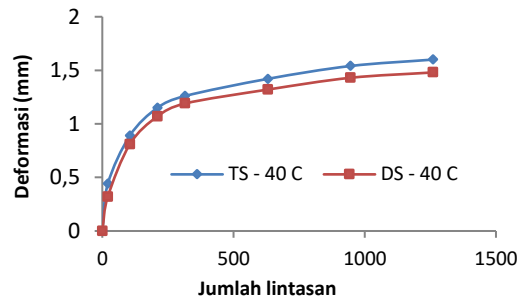
Waktu (menit)	Jumlah siklus	Deformasi (mm)	
		TS	DS
0	0	0,00	0
1	21	0,77	0,66
5	105	1,34	1,25
10	210	1,79	1,59
25	315	2,04	1,81
30	630	2,44	2,26
45	945	2,72	2,55
60	1260	2,89	2,72
Total deformasi		2,000	1,830
Stabilitas dinamis (lint/mm)		3,706	3,938
Laju deformasi (mm/menit)		0,0013	0,0107

Pada saat awal pengujian (waktu 0), deformasi pada campuran tanpa serat dan dengan serat adalah 0, menunjukkan bahwa campuran berada dalam keadaan awal tanpa deformasi. Seiring berjalannya waktu siklus, terlihat peningkatan deformasi pada kedua campuran, baik yang tanpa serat maupun yang dengan serat. Pada setiap tahap waktu, deformasi campuran dengan serat cenderung lebih rendah dibandingkan dengan campuran tanpa serat.

Perbandingan deformasi antara campuran tanpa serat dan dengan serat mengindikasikan bahwa penguatan serat memberikan efek pengurangan deformasi. Pada setiap titik waktu, deformasi pada campuran dengan serat lebih rendah, menunjukkan bahwa kontribusi serat mampu membatasi perubahan bentuk atau deformasi campuran. Hubungan data tersebut menggambarkan bahwa penggunaan serat pada campuran beton aspal memiliki potensi untuk mengurangi deformasi, sehingga dapat meningkatkan ketahanan campuran terhadap beban siklik atau dinamis.

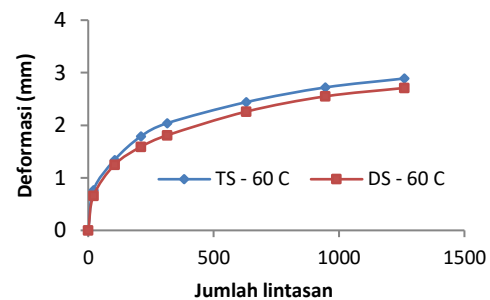
Gambar 12 dan Tabel 4 menunjukkan kedalaman rutting mengalami peningkatan yang cepat diawal atau pada tahap pertama baik untuk campuran beton aspal tanpa menggunakan serat ijuk (TS) maupun dengan serat ijuk (DP). Peningkatan ini terjadi pada temperatur pengujian 60°C seperti pada Tabel 4, hal ini diakibatkan campuran beton aspal pada temperatur 60°C mengalami penurunan tingkat kepadatan dimana aspal sebagai bahan pengikat mengalami perubahan sifat viscoelastis sehingga ikatan campuran menjadi lemah dan menyebabkan adanya pergeseran agregat dan gaya geser pada saat terjadi pemuatan beban kendaraan arah vertikal.

Selanjutnya tingkat kenaikan kedalaman rutting mengalami penurunan dan mengikuti hubungan linier dengan waktu khususnya terjadinya pergeseran dalam campuran akibat pengaruh gaya geser kondisi ini merupakan tahap sekunder pengembangan rutting pada campuran beton aspal.



Gambar 12. Hasil pengujian wheel tracking pada temperatur 40°C

Kemiringan garis linier pada Gambar 12 menunjukkan tingkat kedalaman rutting dan stabilitas material atau campuran terhadap siklus waktu pembebanan. Nilai kemiringan yang lebih tinggi menunjukkan bahwa total deformasi campuran aspal yang lebih besar. Pengaruh temperatur menunjukkan adanya peningkatan penurunan total deformasi pada temperatur 60°C baik tanpa serat maupun dengan serat ijuk. Dibandingkan campuran beton aspal pada pengujian temperatur 40°C lebih kecil penurunan nilai total deformasi dengan temperatur 60°C.



Gambar 13. Hasil pengujian Wheel Tracking pada temperatur 60°C

Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran yang menggunakan serat ijuk pada pengujian dua temperatur berbeda memiliki nilai stabilitas yang lebih tinggi terhadap ketahanan terjadinya rutting dibandingkan dengan campuran beton aspal tanpa serat ijuk. Kemampuan serat ijuk dalam mengurangi terjadinya rutting pada lapisan permukaan campuran beton aspal dapat diatributkan kepada dua faktor utama yaitu : 1) serat memiliki kemampuan untuk menstabilkan dan meningkatkan daya lekat aspal pada bidang permukaan antara agregat dan aspal terhadap perubahan sifat viskositas aspal yang disebabkan

oleh peningkatan temperatur, dan 2) serat dapat membentuk pola jaringan dan struktur ikat yang kuat pada campuran beton aspal.

Penguatan serat pada campuran memiliki pengaruh yang besar dalam mengurangi terjadinya *rutting* dimana dari hasil pengujian menunjukkan seperti pada Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan terhadap kedalaman *rutting* pada campuran tanpa serat, yang lebih besar, dengan total deformasi mencapai 1.19 mm pada suhu 40°C dan 2.89 mm pada suhu 60°C. Dibandingkan dengan campuran menggunakan serat ijuk, total deformasi sebesar 1.09 mm pada suhu 40°C dan 2.70 mm pada suhu 60°C.

Peningkatan daya lekat dan daya ikat pada campuran dipengaruhi oleh pola struktur jaringan yang lebih besar dan bergantung pada sifat fisik dan geometri serat. Secara umum, serat dengan kekuatan tarik tinggi efektif dalam menahan retak, dan rasio panjang terhadap diameter yang lebih besar efektif membentuk sistem jaringan yang lebih kuat. Rasio panjang serat yang optimal terhadap diameter serat merupakan salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan panjang dan diameter yang dapat meningkatkan kinerja campuran beton aspal.

Kesimpulan

Penggunaan serat ijuk dalam campuran beton aspal meningkatkan nilai modulus resillien hingga persentase tertentu. Panjang serat ijuk memberikan kontribusi terhadap peningkatan tegangan tarik dan regangan tarik, mempengaruhi modulus resillien. Serat dengan panjang optimal menghasilkan campuran yang lebih fleksibel dan resisten terhadap retak. Penguatan serat ijuk memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan daya lekat antara aspal dan agregat serta mengurangi retakan. Struktur jaringan yang terbentuk oleh serat ijuk dapat meningkatkan daya lekat dan ikatan, serta memberikan ketahanan terhadap deformasi horisontal. Rasio panjang dan diameter serat merupakan faktor penting dalam menentukan kinerja campuran beton aspal. Rasio yang optimal dapat meningkatkan daya tahan campuran terhadap deformasi dan retakan.

Hasil pengujian pada campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk menunjukkan bahwa penggunaan serat ijuk memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan modulus kekakuan, khususnya pada penggunaan panjang serat ijuk sepanjang 8 mm dan persentase serat ijuk sebesar 0.6%. Deformasi horisontal maksimum (Δd_{maks}) pada kondisi ini mencapai 1.63 mm, dengan modulus kekakuan (S_m) mencapai 1862.03 MPa.

Selain itu, campuran dengan penguatan serat ijuk menunjukkan kemampuan dalam meningkatkan ketahanan terhadap deformasi dan rutting akibat pengaruh temperatur dan peningkatan beban lalu lintas. Total deformasi (DP) pada campuran ini lebih rendah dibandingkan dengan campuran tanpa serat ijuk, menunjukkan kemampuan untuk meminimalisir potensi terjadinya rutting sebesar 17.5% pada temperatur rendah, serta mengurangi risiko terjadinya retak..

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih dan penghargaan kepada Keluarga Besar Laboratorium Bahan Perkerasan Jalan serta segenap civitas akademik Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muslim Indonesia. Juga terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penelitian tanpa terkecuali.

Daftar Pustaka

- AASHTO. (2002). *American Association of State Highway and Transportation Officials*. In American Association of State Highway and Transportation Officials 444 North Capitol Street, N.W., Suite 249 Washington, D.C. 20001 (17th ed.).
- Abiola, O. S., Kupolati, W. K., Sadiku, E. R., & Ndambuki, J. M. (2014). Utilisation Of Natural Fibre As Modifier In Bituminous Mixes: A Review. *Construction and Building Materials*, 54, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.037>
- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., & Hejazi, S. M. (2010). Fiber-Reinforced Asphalt-Concrete - A Review. *Construction and Building Materials*, 24(6), 871–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.009>
- Adtihya, A. P., S, B., Kosasih, D., & Hendarto, S. (2016). Evaluasi Karakteristik Modulus Resilien dan Deformasi Permanen Campuran Beton Beraspal (AC-Binder Course) Menggunakan Campuran Agregat Berabrasi Tinggi. *Journal of Civil Engineering*, 23(2), 223–232. <https://doi.org/10.5614/jts.2016.23.3.7>
- Aliha, M. R. M., Razmi, A., & Mansourian, A. (2017). The Influence Of Natural And Synthetic Fibers On Low Temperature Mixed Mode I + II Fracture Behavior Of Warm Mix Asphalt (WMA) Materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 182, 322–336. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.06.003>
- García, A., Norambuena-Contreras, J., Partl, M. N., & Schuetz, P. (2013). Uniformity And Mechanical

- Properties Of Dense Asphalt Concrete With Steel Wool Fibers. *Construction and Building Materials*, 43, 107–117.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.030>
- Hunter, R., Self, A., & Read, J. (2015). The Shell Bitumen Handbook. In ICE Publishing (Issue September).
<http://books.google.com/books?id=bA1tkRjL8kC&pgis=1>
- Jamal Khattak, M., Khattab, A., & R. Rizvi, H. (2013). Characterization Of Carbon Nano-fiber Modified Hot Mix Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, 40, 738–745.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.034>
- Lavasani, M., Latifi Namin, M., & Fartash, H. (2015). Experimental Investigation on Mineral and Organic fibers Effect on Resilient Modulus and Dynamic Creep of Stone Matrix Asphalt and Continuous Graded Mixtures in Three Temperature Levels. *Construction and Building Materials*, 95, 232–242.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.146>
- Mahan, H. M. (2013). Behavior of Permanent Deformation in Asphalt Concrete Pavements Under Temperature Variation غير لوملا وا لغمولال وا راغطلال ططغض يف تدابزل تجينن قيتلفسلال قرطلا يف تيسينرلا لكاشملا نم ددختلا رهاظ غ وللا اغ ه للاغغنتي يتلفغسلال كل ل تمزلالا تيرلتخملا و. *Al-Qdisya Journal For Engineering Science*, 6(1), 62–73.
<https://qu.edu.iq/journaleng/index.php/JQES/article/view/292>
- Mardin, H., Wardana, I. N. G., Kusno, K., Pratikto, & Wahyono, S. (2016). Sea Water Effects on Surface Morphology and Interfacial Bonding of Sugar Palm Fiber to Sago Matrix. In *Key Engineering Materials* (Vol. 724, pp. 39–42). Trans Tech Publications, Ltd.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.724.39>
- Mashaan, N. S., Ali, A. H., Koting, S., & Karim, M. R. (2013). Dynamic Properties And Fatigue Life Of Stone Mastic Asphalt Mixtures Reinforced With Waste Tyre Rubber. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 1–9.
<https://doi.org/10.1155/2013/319259>
- Sabouri, M., Mirzaeian, D., & Moniri, A. (2018). Effectiveness of Linear Amplitude Sweep (LAS) asphalt binder test in predicting asphalt mixtures fatigue performance. *Construction and Building Materials*, 171, 281–290.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.146>
- Santhiarsa, N. (2015). Pengujian Kandungan Unsur Logam Serat Ijuk dengan X-Ray Fluorescence Testing. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*, Material 2(Snttm Xiv), 7–8.
- Serin, S., Morova, N., Saltan, M., & Terzi, S. (2012). Investigation of Usability of Steel Fibers in Asphalt Concrete Mixtures. *Construction and Building Materials*, 36, 238–244.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.113>
- Suaryana, N., Nasution, J. A. H., & Bandung, N. (2016). Pengembangan Model Deformasi Permanen Untuk Campuran Stone Matrix Asphalt (Development Of Permanent Deformation Model For Stone Matrix Asphalt Mixtures. *Jurnal Jalan-Jembatan*, 33(1), 1–11.
- Suherman. (2012). Kinerja Modulus Resilien dan Deformasi Permanen Dari Campuran Lapis Antara (AC-BC) yang Menggunakan Material Hasil Daur Ulang (Rap) Ac Lapis Antara (AC-Binder Course , AC- BC) dan AC Lapis Pondasi (AC-Base). Perencanaan Campuran Beton Aspal Lapis. *Sains, Teknologi Dan Industri*, 10(1), 51–58.
<http://ejournal.uin-suska.ac.id/index.php/sitekin/article/download/575/547>
- Tapkin, S., & Keskin, M. (2013). Rutting Analysis Of 100 Mm Diameter Polypropylene Modified Asphalt Specimens Using Gyrotory And Marshall Compactors. *Materials Research*, 16(2), 546–564.
<https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000016>
- Xue, Q., Liu, L., & Chen, Y. J. (2013). Study On The Action Effect Of Pavement Straw Composite Fiber Material In Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, 43, 293–299.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.031>
- Yoder, E. J., M. W. Witzcak, Witzcak, M. W., & M. W. Witzcak. (1975). *Principles of Pavement Design, Second Edition*. Principles of Pavement Design, 716.
<https://www.scribd.com/document/408401339/E-J-Yoder-M-W-Witzcak-auth-Principles-of-Pavement-Design-Second-Edition-1975-pdf>
- Ziari, H., & Moniri, A. (2019). Laboratory Evaluation Of The Effect Of Synthetic Polyolefin-Glass Fibers On Performance Properties Of Hot Mix Asphalt. *Construction and Building Materials*, 213, 459–468.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.084>