

Korespondensi

Jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil (MKTS)

Penerbit: Badan Kejuruan Teknik Sipil Persatuan Insinyur Indonesia
dan Badan Musyawarah Pendidikan Tinggi Teknik Sipil Seluruh
Indonesia

Website : <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/mkts>

ISSN : 0854-1809

SINTA : 2

Scope : Teknik Sipil

Author : Andi Alifuddin

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

*Rutting Behavior and Stiffness Modulus with Palm Fiber Reinforcement in Asphalt Concrete
Mixtures*

Volume : 29

No : 2

Page(s) : 223-232

Year(s) : 2023

Submission : 21/03/2023

Accepted : 8 Januari 2024

DOI : <https://doi.org/10.14710/mkts.v29i2.53190>

Link Paper : <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/mkts/article/view/53190>

PDF Download : <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/mkts/article/view/53190/25626>

1. Jurnal Profil



MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL

Jurnal Ilmu dan Terapan Bidang Teknik Sipil

Published by :
Badan Musyawarah Pendidikan Tinggi Teknik Sipil Seluruh Indonesia

e-ISSN : 2549 - 6778
p-ISSN : 0854 - 1809

[Home](#) [About](#) [People](#) [Submissions](#) [Issue](#) [Announcements](#)   [Iz./S.T./M.P.W.K Muhammad Ridha Kasim](#)

Policies

[Editorial Team](#)
[Focus & Scope](#)
[Publication Ethics](#)
[Peer-Reviewer](#)
[Author Guide](#)
[Indexing & Abstracting](#)
[Manuscript Template](#)

ISSN:
2549 - 6778 (Online Version)
0854 - 1809 (Print Version)



User

You are logged in as...

ridhadang

- My Journals
- My Profile
- Log Out

Download Articles

Volume 27, Nomor 2, December 2021
Volume 27, Nomor 1, July 2021
Volume 26, Nomor 2, December 2020
Volume 26, Nomor 1, July 2020
Volume 25, Nomor 2, December 2019
Volume 25, Nomor 1, July 2019
[Download The Other Volume](#)

Current issue: Volume 30, Nomor 1, JULI 2024 | [Archives](#) | [Start Submission](#)

Media Komunikasi Teknik Sipil (ISSN 0854-1809) published twice in a year, in July and December. The article can be product of researches, scientific thoughts or case study, in civil engineering and isn't formed by politics, commercialism, and subjectivity unsure. This scientific journal contains articles of thought and research results in Civil Engineering that have never been published in scientific journals or other media.

Any matters relating to the use of the software, citation and copyright permissions made by the author of the article, and the legal consequences it causes, are the sole responsibility of the author of the article. The format of writing scientific articles for publication in scientific journals should follow the guidelines of scientific article writing, which is located on the back of this scientific journal.

Peer Review Process Media Komunikasi Teknik Sipil



Articles submitted to Media Komunikasi Teknik Sipil will be reviewed by reviewers. Accepted whether or not it is determined by the Chief Editor Team based on the comments from the reviewers. The decision on the acceptance of the text is determined in the Editor Session. Reviewer does not know the author and the author does not know the reviewer (Double Blind Review).

Indexing and Abstracting

Media Komunikasi Teknik Sipil (p-ISSN: 0854-1809; e-ISSN: 2549-6778) has been covered by the following indexing and abstracting services:

- DOAJ
- CrossRef DOI
- Google Scholar
- Indonesian Publication Index (IPI)
- Sinta
- Dimensions
- Garuda

Citation Profile of Media Komunikasi Teknik Sipil on Google Scholar :

- Number of articles indexed in Google Scholar : 71
- Number of citations in Google Scholar : 29
- h-index in Google Scholar : 2



Media Komunikasi Teknik Sipil

Discipline	: Civil Engineering
Language	: English, Indonesia
Editorial Team	: Prof. Dr. Ir. Sri Sangkawati Sachro, MS. (ScopusID: 57193519682) Prof. Ir. I Nyoman Arya Thanaya, ME., Ph.D (ScopusID: 26665175500) Prof. Dr. Ir. Sri Prabandiyani R Wardani, M.Sc. (ScopusID: 6506808940) Prof. Bagus Hario Setiadji, ST., MT., Ph.D (ScopusID: 57170622600)
Publication Detail	
Publisher	: Department of Civil Engineering, Diponegoro University
Publication history	: 2007 - present
Sponsors	: - Badan Kejuruan Sipil Persatuan Insinyur Indonesia - Badan Musyawarah Pendidikan Tinggi Teknik Sipil Seluruh Indonesia
	Sponsors document
Accreditation	: Sinta 2 Accreditation Documents
Frequency	: 2 Issue per year
Open Access	: Yes
Impact factor	: -
Indexing	
ISSN (Printed)	: 0854 - 1809
ISSN (Online)	: 2549 - 6778
Link	
Journal Homepage	
Online Access	
Online Archive	

REFERENCE TOOL



2. Submit

- Melakukan Submit Artikel pada Tanggal 21 Maret 2023

Summary	Review	Editing
Submission		
Authors	Andi Alifuddin, Muhammad Ridha Kasim, Lambang Basri Said	
Title	Rutting Behavior and Stiffness Modulus with Palm Fiber Reinforcement in Asphalt Concrete Mixtures	
Original file	53190-170628-1-SM.docx 21-03-2023	
Supp. files	53190-170629-1-SP.docx 21-03-2023	
Submitter	Ir./S.T./M.P.W.K Muhammad Ridha Kasim	
Date submitted	March 21, 2023 - 04:58 PM	
Section	Articles	
Editor	Yulita Priastiwati, ST. MT.	
Reviewers suggestion	Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST., M.Eng.Sc Civil Engineering Department Hasanuddin University Makassar, Indonesia Sri Wahyuni, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Dr. Ir. Windu Partono MSc. (ScopusID: 56974382500), Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia	

- Mendapatkan email balasan (Submission Acknowledgement) dari Pengelola Jurnal pada Tanggal 21 Maret 2023

[MKTS] Pernyataan Naskah External Inbox x

Prof. Dr. Ir.Sri Sangkawati, MS <mkts@live.undip.ac.id> Tue, Mar 21, 2023, 11:58 PM

to me

Translate to English

Ir./S.T./M.P.W.K Muhammad Ridha Kasim:

Terima kasih untuk menyerahkan manuskrip, "Perilaku Rutting dan Modulus Kekakuan Pada Campuran Beton Aspal dengan Penguatan Serat Ijuk" untuk MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL. Dengan sistem manajemen jurnal online yang kami gunakan, Anda akan bisa melacak kemajuan naskah dalam proses editorial dengan login ke web site jurnal:

URL Manuskrip: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/mkts/author/submission/53190>
Nama pengguna Penulis: ridhadang

Jika Anda mempunyai pertanyaan, silakan hubungi saya. Terima kasih untuk mempertimbangkan jurnal ini sebagai tempat untuk karya Anda.

Prof. Dr. Ir.Sri Sangkawati, MS
MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL

MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL
<http://mkts.sipil.undip.ac.id/>
email : mkts@live.undip.ac.id

Reply Forward

Lampiran File yang Pertama di Submit

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

Andi Alifuddin¹, Lambang Basri Said², *Muhammad Ridha Kasim³

¹²³Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Kota Makassar,

*)andi.alifuddin@umi.ac.id

Received: Revised: Accepted:

Abstract

Reinforcement of 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 study was to determine the effect of palm fiber as a reinforcing material in increasing the cohesive and tensile strength of asphalt concrete mixtures due to the temperature influence. The research was done by experimental methods in the laboratory using palm fiber material based on the optimum percentage of 0.6% with a length of 8 mm and tested with variations in temperature. The results show that the asphalt concrete mixture with palm fiber reinforcement has a total deformation value of 1.09 mm with a deformation rate of 0.0033 mm/minute which is smaller than the asphalt concrete mixture without using palm fiber which has a total deformation of 1.19 mm with a deformation rate 0.0040 mm/minute at a test temperature of 40°C meanwhile at a temperature of 60°C asphalt concrete mixture with palm fiber is 1.83 mm with a deformation rate of 0.0107 mm/minute, while without palm 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 untuk meningkatkan kekuatan dan indeks kelelahan akibat peningkatan beban lalu lintas dan pengaruh temperatur guna mengurangi potensi terjadinya defromasi permanen. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui sebesar pengaruh serat ijuk sebagai bahan penguat dalam meningkatkan kekuatan kohesif dan tarik campuran beton aspal akibat pengaruh temperatur. Penelitian dilakukan dengan metode eksprimental dilaboratorium dengan bahan serat ijuk berdasarkan persentase optimum sebesar 0,6% dengan panjang 8 mm dan diuji dengan variasi temperatur. Hasil pengujian menunjukkan campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk (DS) memiliki nilai total deformasi sebesar 1.09 mm dengan laju deformasi 0.0033 mm/menit lebih kecil dibandingkan dengan campuran beton aspal tanpa menggunakan serat ijuk (TS) dengan total deformasi sebesar 1.19 mm dengan laju deformasi 0.0040 mm/menit pada temperatur pengujian 40°C dan sementara pengujian pada temperatur 60°C campuran beton aspal dengan serat ijuk (DS) sebesar 1.83 mm dengan laju deformasi 0.0107 mm/menit, sementara tanpa serat ijuk total deformasi sebesar 2.00 mm dengan laju defromasi 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

Perkerasan jalan raya dipengaruhi oleh faktor beban lalu lintas dan kondisi alam sekitarnya.

Beban lalu lintas terdiri dari adanya tarik arah radial dan tegangan tekan arah vertikal yang terjadi akibat beban gandar kendaraan yang melintas diatas struktur perkerasan. Intesnitas dan besarnya

beban yang bekerja berbanding lurus sebagai beban berulang secara periodik yang diakibatkan adanya tekanan pada struktur lapis perkerasan (Serin et al., 2012) Peningkatan tekanan pada struktur lapis perkerasan mengalami kerusakan defromasi permanen atau adanya alur permukaan (rutting) pada temperatur tinggi sebagai akibat terjadi geser (Suaryana et al., 2016)

Gaya geser didefinisikan sebagai perpindahan campuran aspal kearah horisontal. Ada dua pokok mekanisme terjadinya gaya geser. Yang pertama adalah ketidakstabilan dari campuran aspal, dimana menghasilkan indeks plastis (kelelahan) yang rendah menyebabkan terjadinya pergeseran arah horisontal.

Ketidakstabilan, dan adanya gaya geser yang diakibatkan tekanan beban, hal ini yang sering terjadi sebagai dampak pemakaian atau persentase aspal pengikat yang terlalu banyak (rongga udara rendah) menyebabkan terjadinya bleeding dan rutting, serta lendutan. 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)

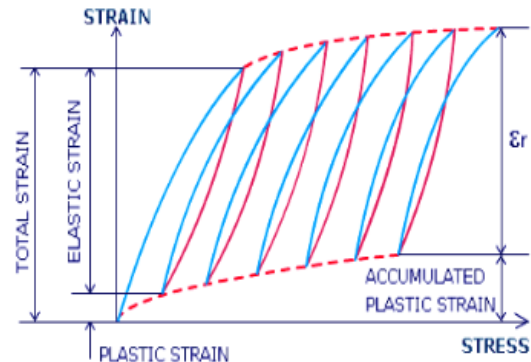
Deformasi permanen (dalam bentuk rutting banyak terjadi pada jalur tapak roda kendaraan. Rutting mempunyai dua penyebab utama yaitu: 1). Rutting yang disebabkan oleh terlalu banyaknya tekanan/ pembebanan berulang yang berdampak terhadap kerusakan pada lapis bawah (dikarenakan subgrade jelek). 2.). Rutting yang disebabkan terlalu banyaknya tekanan/ pembebanan berulang yang berdampak terhadap kerusakan pada lapis atas (struktur perkerasan) (Adtihya et al., 2016)

Pada **Gambar 1** menunjukkan distribusi tegangan sampai terjadinya deformasi permanen pada perkerasan jalan lentur, yang biasa disebut (rutting dan geser), Alur, biasanya terdiri dari lendutan memanjang yang terjadi pada jalur roda kendaraan merupakan akumulasi dalam jumlah kecil terjadinya deformasi disebabkan oleh adanya peningkatan beban (Asphalt Institute, 1996).

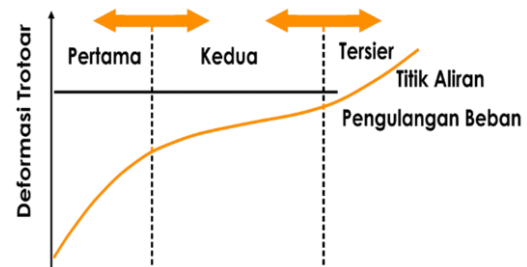
Tahapan proses deformasi sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2** yaitu tahap primer merupakan tahap awal miliki potensi rutting yang tinggi, dengan tingkat penurunan deformasi plastik, terutama yang berhubungan dengan perubahan volumetrik.

Tahap primer merupakan tahap awal miliki potensi rutting yang tinggi, dengan tingkat penurunan deformasi plastik, terutama yang berhubungan dengan perubahan volumetrik. Tahap sekunder dengan tingkat rutting yang kecil menunjukkan tingkat perubahan rutting yang konstan yang juga

terkait dengan perubahan volumetric campuran aspal; Namun, deformasi geser terjadi peningkatan. Sementara tahap tersier dengan tingkat rutting yang tinggi terutama terkait dengan deformasi plastik (geser), ada perubahan volume panduan desain AASHTO (AASHTO, 2002).



Gambar 1. Akumulasi Tegangan Plastis pada Perkerasan Jalan (Modifikasi Sumber After Asphalt Institute, 1996 dalam (Mahan, 2013))



Gambar 2. Perilaku Deformasi Permanen Terhadap Model Beban Berulang pada Lapisan Perkerasan (Modifikasi Sumber 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 berfungsi untuk meningkatkan sifat-sifat campuran dan kekuatan material dan karakteristik kelelahan, dan meningkatkan elastisitas (García et al., 2013); (Jamal Khattak et al., 2013). Selain itu, diketahui bahwa serat dapat berkontribusi untuk meningkatkan ketahanan dan mencegah terjadinya (Xue et al., 2013), meningkatkan kekuatan kohesif dan tarik campuran aspal dan memberikan perubahan fisik terhadap campuran aspal (Abtahi et al., 2010), dan tingkat penyerapan dan luas permukaan tergantung jenis serat (Abiola et al., 2014).

Selain itu, serat dapat meningkatkan modulus dinamis, tahan air, ketahanan retak, dan ketahanan

rutting pada campuran beton aspal, mencegah pembentukan dan propagasi retak. (García et al., 2013); (Aliha et al., 2017), memperbaiki alur, kelelahan dan perilaku campuran pada temperatur rendah (Ziari & Moniri, 2019). Beberapa konsep atau teori terhadap karakteristik fungsi serat tersebut, dimana tidak hanya mengoptimalkan sifat serat, diameter serat, panjang, tekstur permukaan, tetapi juga dalam mekanisme sebagai bahan penguat pada campuran beton aspal (Abtahi et al., 2010).

Oleh karena itu, penguatan serat pada campuran beton aspal merupakan salah satu pendekatan untuk meningkatkan tegangan tarik dan serat adalah bahan penguat yang memiliki sifat dan karakteristik dengan kekuatan tarik dan sifat lentur yang cukup tinggi. Salah satu serat alam yang memiliki potensi dengan kemampuan lentur dan kekuatan tarik yang tinggi adalah serat ijuk (Arenga Pinnata) sebagai bahan penguatan pada campuran beton aspal.

Serat Ijuk merupakan bahan baku yang mudah diperoleh dengan harga yang lebih murah, memiliki massa jenis yang lebih rendah dibanding dengan serat mineral. Serat ijuk diperoleh dari batang aren (arenga pinnata) yang banyak tumbuh di seluruh wilayah Indonesia. Dari tumbuhan ini menghasilkan serat berwarna hitam dan mudah diperoleh dan ramah lingkungan.

Serat ijuk memiliki komposisi kandungan kimia sebagai berikut, selulosa, hemiselulosa, lignin, air, dan abu, berturut turut sebesar 51.54%, 15.88%, 44.09%, dan 8,9% serta 2,54 %. Persentase kandungan unsur selulosa dan Hemiselulosa pada serat ijuk memberikan kekuatan adhesi yang tinggi sebagai material komposit pada campuran beton aspal, sementara unsur lignin melindungi permukaan serat ijuk dari cuaca dan panas dan meningkatkan tegangan pada serat ijuk (Santhiarsa, 2015).

Analisis kedalaman rutting dengan pengujian Wheel Tracking merupakan suatu simulasi, dimana beban roda bergerak maju mundur melintas diatas benda uji. Ketahanan deformasi dari benda uji yang telah ditetapkan, dapat diukur dengan melihat hasil yang diperoleh dari kedalaman alur (Rut Depth) setelah dilalui sejumlah lintasan, atau Laju Deformasi (RD, Rate of Deformation) dalam mm/menit (Hunter et al., 2015) Disamping itu juga dapat diukur nilai Stabilitas Dinamis (DS, Dynamic Stability), yaitu jumlah lintasan yang diperlukan untuk membentuk alur sedalam 1 mm. Stabilitas Dinamis (DS) dan Laju deformasi (RD) dapat dihitung dengan menggunakan rumus: (Suherman, 2012).

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

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

Dengan :

DS = Stabilitas Dinamis (lintasan/mm)

RD = Laju Deformasi (mm/menit)

d1 = Deformasi pada pengujian 45 menit (mm)

d2 = Deformasi pada pengujian 60 menit (mm)

C1 = Faktor koreksi peralatan adalah 1.0

C2 = Faktot r koreksi spesimen adalah 1.0

t1 = 45 menit

t2 = 60 menit

Modulus kekakuan dihitung dengan uji kuat tarik tidak langsung (Indirect Tensile Strength) dengan aplikasi beban secara vertikal pada dimensi vertikal 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) sebagai berikut :

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

Dimana σ_{max} adalah tegangan tarik horisontal ditengah specimen, P adalah beban maksimum vertikal yang diterapkan, dx adalah diameter rata-rata spesimen, dan t ketebalan rata-rata specimen.

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

Dimana S_m adalah modulus kekakuan, H adalah deformasi horisontal, dan μ adalah passion ratio.

Metode

Serat ijuk diperoleh dari Sulawesi Selatan dengan usia pohon aren diatas umur 5 tahun dengan serat yang hitam sebagai penguat (reinforced), Serat ijuk dipilih pada bagian ujung yang berdiameter 0.30 mm ini dipilih karena pada bagian tersebut solit tidak terdapat lubang sedangkan pada bagian pangkal berlubang dan terdapat gabus walaupun hanya sedikit kandungannya. Sampel serat ijuk seperti pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Serat Ijuk a) yang Masih Menyatu b) Serat Ijuk telah Dipisahkan

Agregat yang digunakan adalah batu pecah ukuran maksimum 19.1 mm”, 12.7 mm, dan 9.8 mm

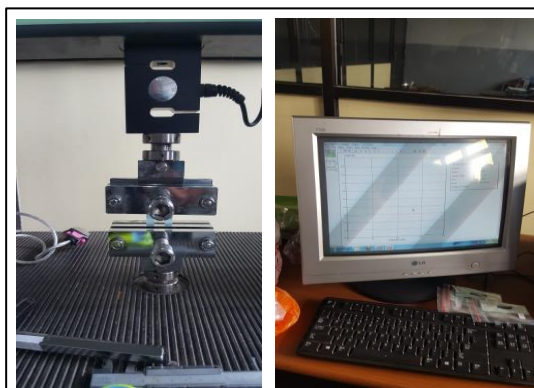
berdasarkan persyaratan spesifikasi campuran AC WC, dan Abu batu (ukuran Lolos saringan No. 4 (4,75 mm) dengan bahan pengikat aspal pen 60/70 Metode dalam penelitian ini dengan melakukan pengujian ekperimental berdasarkan hiptotesa, penyeleksian sampel berdasarkan variasi komposisi panjang dan persentase 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 seperti pada **Gambar 4** dan selanjutnya dilakukan pengujian sifat mekanik serat ijuk pada uji tarik serat tunggal berdasarkan standar ASTM 3379-02 pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Proses Perendaman Serat Ijuk Diameter 0.3 mm dengan Air Laut

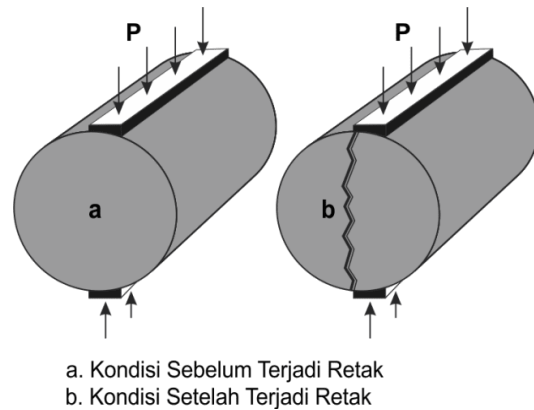
Penentuan modulus kekakuan berdasarkan hasil Pengujian dengan uji tarik tidak langsung (indirect tensile strenght) pada campuran dengan penguatan serat ijuk terhadap variasi panjang (5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm dan 14 mm dan persentase serat ijuk dengan variasi 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8%, 1,0% dan 1,2% dengan temperatur 40oC, dengan pemadatan 2 x 75 tumbukan. Model set up pengujian seperti pada **Gambar 6**.



Gambar 5. Set Up Uji Tarik Serat Tunggal

Sementara pengujian kuat tarik tidak langsung pada campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk terhadap variasi panjang dan persentase serat

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



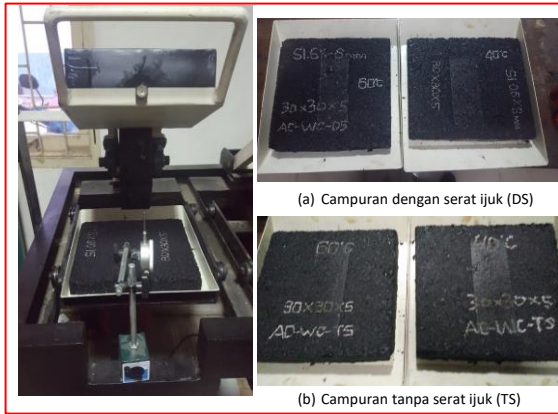
Gambar 6. Ilustrasi Pengujian IDT-Strength (Sumber : (Yoder et al., 1975)



Gambar 7. Model Pengujian ITS

Pengujian stabilitas dinamis dilakukan dengan alat uji wheel tracking dimana benda uji ukuran 300 x 300 x 50 mm dibebani dengan roda yang melintasinya bolak balik sebagai simulasi beban roda kendaraan selama 60 menit. Perubahan bentuk yang dinyatakan sebagai deformasi permanen diukur. pada pengujian Wheel traking pada camuran beton aspal tanpa serat ijuk dan campuran dengan serat ijuk berdasarkan panjang serat ijuk 8 mm dengan persentase optimum 0.6 % pada pengujian temperatur 40°C dan 60°C.

Pengujian dilakukan oleh roda penguji terbuat dari karet keras yang mempunya 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**.



Gambar 8. Set Up Pengujian Wheel Tracking dan Kondisi Deformasi Permanen pada Sampel Uji

Hasil dan Pembahasan

Data hasil pengujian eksperimental dilaboratorium sebagai data primer kemudin diperoleh data karakteristik dan sifat campuran berupa tegangan dan regangan tarik, modulus kekakuan, passion ratio dan deformasi permanen dengan parameter variasi panjang dan persentase serat ijuk dan temperatur. Untuk memperoleh hubungan antara parameter atau masing-masing variabel dan output data dilakukan analisis rancangan factorial dengan metode statistik.

1. 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.

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

Sampel	Beban Tarik $P = N/mm^2$	Luasan $A = (mm^2)$	Tegangan tarik Serat Tunggal $\sigma = N/mm^2$	$\sigma_{rata-rata}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{rata-rata}$ (%)
SI-TR	5.910	0.0707	134.71	130.45	14.24
SI-M3-1	10.018	0.0707	141.70		
SI-M3-2	9.732	0.0707	137.65		
SI-M3-3	9.341	0.0707	132.12		
SI-M3-4	8.261	0.0707	116.85		
SI-M3-5	8.761	0.0707	123.92		

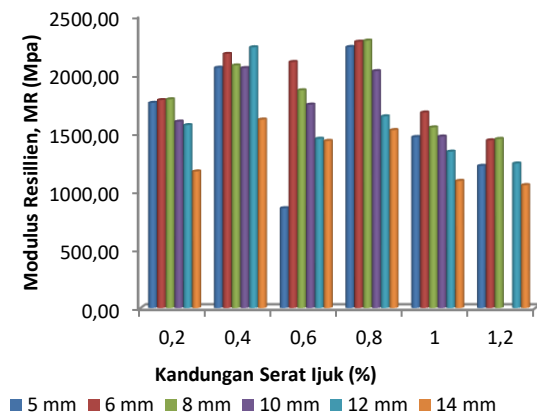
Pengaruh perendaman air laut mengakibatkan modulus kekakuan dan sifat fleksibilitas serat semakin tinggi. Hal ini diakibatkan adanya penghapusan dan penurunan unsur lignin dan selulosa yang melapisi permukaan serat ijuk sehingga serat semakin lentur dengan persentase regangan yang dihasilkan sebesar 14.24 %. Dibandingkan dengan serat ijuk tanpa rendaman persentase regangan yang terjadi lebih kecil sebesar 11.89 %. Pada **Tabel 2** (lampiran) menunjukkan modulus kekakuan campuran

dengan variasi persentase terhadap panjang serat ijuk

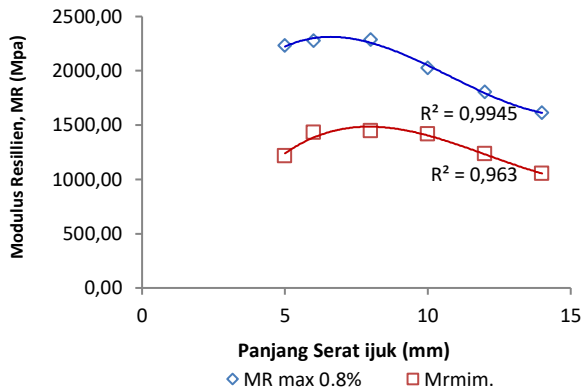
2. Hasil Uji Indirect Tensile Strength

Hasil pengujian kuat tarik tidak langsung (indirect tensile strength) pada **Gambar 9** menunjukkan bahwa nilai modulus resillien (MR) campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk mengalami peningkatan sampai persentase 0.4% terhadap masing-masing variasi panjang serat ijuk, selanjutnya pada persentase 0.6% mengalami penurunan kemudian naik pada persentase 0.8% dengan nilai modulus resillien maksimum dan secara linier mengalami penurunan sampai pada persentase 1.2%.

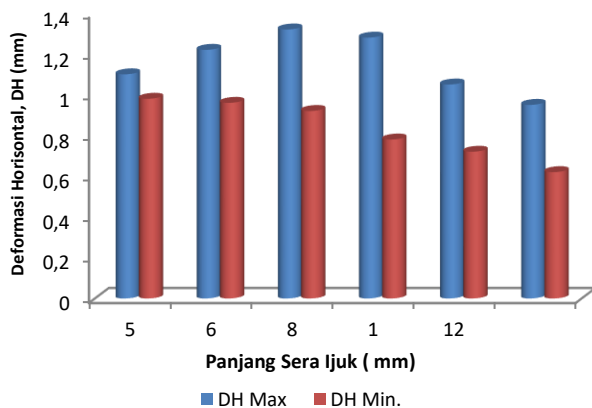
Panjang serat ijuk memiliki pengaruh dan konstribusi dalam meningkatkan tegangan tarik dan regangan tarik terhadap peningkatan modulus resillien. Pada persentase penggunaan serat ijuk 0.2% deviasi nilai tegangan dari panjang serat ijuk minimum 5 mm terhadap panjang serat 8 mm sebesar $\sigma = 77.70$ 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 konstribusi tegangan setiap panjang serat ijuk terhadap panjang serat optimum 8 mm sebesar $\sigma = 180,33$ Mpa dan persentase sebesar 9.08% atau rata-rata konstribusi 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 Terhadap Panjang Serat dengan Modulus Resilien



Gambar 10. Hubungan Nilai Modulus Resillien MR Maksimum (Mrmaks.) dengan Panjang Serat Ijuk



Gambar 11. Hubungan Modulus Resillien (MR) Dengan Panjang Serta Ijuk terhadap Deformasi Horizontal Maksimum (Dhmaks.) dan Minimum (Dhmin)

Pada **Gambar 10** menunjukkan modulus kekakuan maksimum pada persentase 0.8% dengan panjang serat ijuk 8 mm. kondisi menunjukkan bahwa campuran dengan persentase serat ijuk 0.8 % terhadap variasi panjang memiliki sifat modulus kekakuan yang lebih tinggi dengan deformasi horisontal Δdh yang lebih kecil seperti pada **Gambar 11** dibandingkan dengan campuran dengan persentase serat ijuk 0.6 % dengan deformasi horisontal Δdh yang lebih besar. Hal menunjukkan serat ijuk dengan persentase 0.6 % dengan panjang 8 mm memberikan sifat campuran yang lebih fleksibel dengan deformasi horisontal maksimum Δdh_{maks} sebesar 1.68 mm dengan poisson ratio $\mu = 0.44$ seperti pada **Tabel 2** dan memiliki ketahanan terhadap terjadi retak pada campuran.

Namun sebaliknya campuran dengan modulus kekakuan yang rendah dengan deformasi yang kecil menunjukkan kekakuan yang tinggi rentang terjadinya retak akibat peningkatan beban lalu

lintas. Hal ini terlihat pada **Gambar 12** serat dengan panjang 8 mm menunjukkan deformasi horisontal (Δdh) sebesar 1.2 mm yang lebih besar dibandingkan dengan serat ijuk dengan ukuran yang lebih pendek maupun yang lebih panjang. Sementara serat ijuk pada panjang maksimum 14 mm pada persentase 1.2 % persentase penurunan nilai modulus resillien (MR) sebesar 45.968 % dengan tegangan $\sigma = 1051.11$ Mpa terhadap panjang dan persentase serat optimum.

Serat dengan ukuran panjang yang lebih pendek memiliki kemampuan memperkuat daya rekat dari pengikat aspal dimana penyerapan, difusi, dan ikatan antara aspal dan peningkatan tebal film oleh pada campuran mengandung aspal pengikat dan memperkuat efek ikatan bidang permukaan antara fase serat aspal dan fase mineral agregat, yang secara efektif menurunkan risiko kerusakan struktur (Xue et al., 2013). Kekuatan tarik serat meningkatkan kinerja campuran untuk tahan terhadap deformasi horisontal dengan baik. Peningkatan kandungan serat sampai pada batas optimum pada campuran meningkatkan kekuatan tarik dan kandungan serat lebih dari batas ekstrim atau optimum, serat-serat akan mengurangi kemampuan daya lekat antara agregat dan kekuatan akan berkurang (Lavassani et al., 2015).

3. Deformasi Permanen

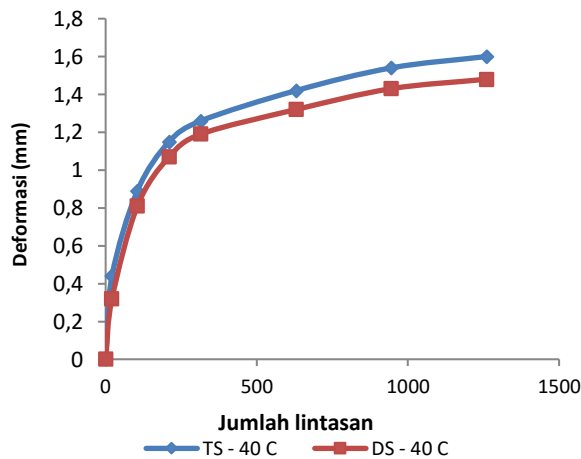
Pengujian Wheel Tracking merupakan suatu simulasi, dimana beban roda bergerak maju mundur melintas diatas benda uji untuk mengukur kedalaman alur alur (Rut Depth) setelah dilalui sejumlah lintasan, atau Laju Deformasi (RD, Rate of Deformation) dalam mm/menit (Shell Bitumen, 1990). Pada **Tabel 3** dan **Tabel 4** menunjukkan hasil pengujian deformasi permanen terhadap campuran dengan serat ijuk (DS) dengan panjang 8 mm dan persentase optimum 0.6 % dan tanpa serat ijuk (TS) pada temperatur pengujian 40°C dan 60°C.

Tabel 3. Hasil Pengujian Wheel Tracking pada Temperatur 40°C

Temperatur		40°C	40°C
Waktu (Menit)	Jumlah siklus	Deformasi, (mm)	
		TS	DS
0	0	0	0
1	21	0.44	0.32
5	105	0.89	0.81
10	210	1.15	1.07
15	315	1.26	1.19
30	630	1.42	1.32
45	945	1.54	1.43
60	1260	1.6	1.48
Total defomasi		1.19	1.09
Stabilitas dinamis (lintasan/ mm)		10,500	12,600
Laju deformasi (mm/menit)		0.0040	0.0033

Tabel 4. Hasil Pengujian Wheel Tracking pada Temperatur 40°C

Temperatur		60°C	60°C
Waktu (Menit)	Jumlah siklus	Deformasi, (mm)	
		TS	DS
0	0	0	0
1	21	0.77	0.66
5	105	1.34	1.25
10	210	1.79	1.59
15	315	2.04	1.81
30	630	2.44	2.26
45	945	2.72	2.55
60	1260	2.89	2.71
Total defomasi		2.00	1.83
Stabilitas dinamis (lintasan/ mm)		3,706	3,938
Laju deformasi (mm/menit)		0.0113	0.0107

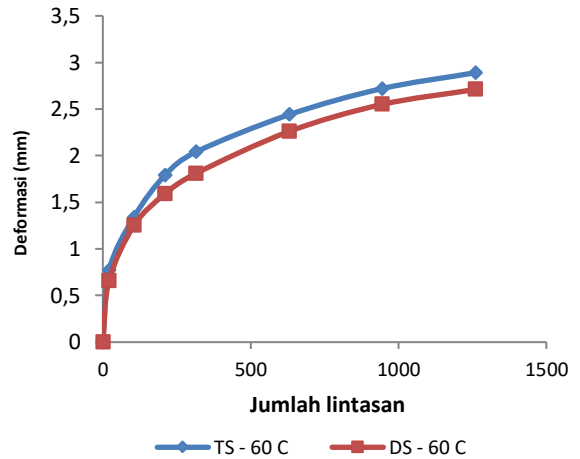


Gambar 12. Hasil pengujian Wheel Tracking pada temperatur 40°C

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 (DS). 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.

Kemiringan garis linier pada **Gambar 12** dan **Gambar 13** 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 campuran tanpa serat maupun campuran 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 40°C

Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran dengan menggunakan serat ijuk dengan pengujian dua temperatur yang 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 ada dua faktor yaitu: 1) serat memiliki kemampuan dalam menstabilkan dan meningkatkan daya lekat aspal pada bidang permukaan antara agregat dengan aspal terhadap perubahan sifat viscositas aspal akibat peningkatan temperatur, 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** adanya perbedaan yang cukup signifikan terhadap kedalaman rutting pada campuran tanpa serat yang lebih besar dengan total deformasi 1.19 mm untuk temperatur 40°C dan 2.89 mm untuk temperatur 60°C. Dibandingkan dengan campuran dengan serat ijuk total deformasi sebesar 1.09 mm untuk temperatur 40°C dan 2.70 mm untuk temperatur 60°C. Pola struktur jaringan yang lebih besar pada campuran dan tergantung pada geometrik dan sifat fisik serat memberi pengaruh terhadap peningkatan daya lekat dan

daya ikat. Umumnya serat dengan kekuatan tarik yang tinggi memiliki kemampuan secara efektif dalam menahan terjadinya retak, dan rasio panjang dan diameter yang lebih besar secara efektif membentuk suatu sistim jaringan yang lebih kuat. Rasio panjang serat yang optimum terhadap diameter serat merupakan salah satu faktor yang menjadi pertimbangan dalam penentuan panjang dan diameter yang dapat meningkatkan kinerja campuran beton aspal.

Kesimpulan

Hasil pengujian pada campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk dapat disimpulkan bahwa Penggunaan serat ijuk pada campuran beton aspal menunjukkan pengaruh signifikan terhadap peningkatan modulus kekakuan yang lebih pada penggunaan panjang serat ijuk 8 mm dengan persentase serat ijuk 0.6 % dengan deformasi horisontal maksimum Δd_{maks} . Sebesar 1.63 mm dengan modulus kekakuan S_m sebesar 1862.03 Mpa. Disamping itu campuran dengan penguatan serat ijuk memiliki kemampuan dalam meningkatkan ketahanan deformasi terhadap terjadinya rutting akibat pengaruh temperatur dan peningkatan beban lalu lintas dengan total deformasi (DS) yang terjadi lebih kecil dibandingkan campuran tanpa menggunakan serat ijuk dengan kemampuan meminimalisir potensi terjadinya rutting sebesar 17,5% pada temperatur rendah dan resiko terjadinya retak.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih dan penghargaan kepada kepala laboratorium Bahan Perkerasan Jalan dan Staf serta segenap civitas akademik program studi teknik sipil fakultas teknik Universitas Muslim Indonesia

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada.

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.). https://kupdf.net/download/aashto-2002-standard-specifications-for-highway-bridges-17th_5af8664fe2b6f5f20add3215_pdf
- 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>
- Adtithya, 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=bA1tIkRjL8kC&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 واغيرلوملا لغمولال وا راغللا ططغض يف قدايزل قجيتن قيتلفسلا قرطلا يف قيسينرلا لكاشملا نم ددختلا رهاظ غ وللا اغ ه لااغنتي يتلفغسلا كل ل قمزلا قيرلتخملا و A1-

- Qdisya Journal For Engineering Science, Vol. 6, No. 1., 6(1), 62–73. <https://qu.edu.iq/journaleng/index.php/JQES/article/view/292>
- 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. <https://www.example.edu/paper.pdf>
- 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 Gyratory 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. Witczak, Witczak, M. W., & M. W. Witczak. (1975). *Principles of Pavement Design*, Second Edition. Principles of Pavement Design, 716. <https://www.scribd.com/document/408401339/E-J-Yoder-M-W-Witczak-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>

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

SI-DP-0,2 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu +0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,2 %, L - 0,5 cm	200.00	0.33	0.60	1.05	65.5	1754.51
S1-0,2 %, L - 0,6 cm	222.00	0.34	0.61	1.10	65.5	1879.53
S1-0,2 %, L - 0,8 cm	211.00	0.36	0.63	1.13	65.5	1784.90
S1-0,2 %, L - 1,0 cm	194.00	0.34	0.61	1.07	65.5	1689.98
S1-0,2 %, L - 1,2 cm	173.00	0.31	0.58	0.98	65.5	1563.70
S1-0,2 %, L - 1,4 cm	125.00	0.29	0.56	0.92	65.5	1167.95
				Rata-rata		1640.09
SI-DP-0,4 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu +0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,4 %, L - 0,5 cm	235.00	0.36	0.63	1.10	65.5	2054.82
S1-0,4 %, L - 0,6 cm	255.00	0.37	0.64	1.15	65.5	2172.91
S1-0,4 %, L - 0,8 cm	254.00	0.36	0.63	1.18	65.5	2066.20
S1-0,4 %, L - 1,0 cm	230.00	0.40	0.67	1.15	65.5	2051.69
S1-0,4 %, L - 1,2 cm	193.00	0.37	0.64	0.85	65.5	2229.46
S1-0,4 %, L - 1,4 cm	149.00	0.40	0.67	0.95	65.5	1611.49
				Rata-rata	131.00000	2031.09
SI-DP-0,6 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu +0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,6 %, L - 0,5 cm	245.00	0.36	0.63	1.18	65.5	1984.94
S1-0,6 %, L - 0,6 cm	265.00	0.38	0.65	1.25	65.5	2103.82
S1-0,6 %, L - 0,8 cm	280.00	0.44	0.71	1.63	65.5	1862.03
S1-0,6 %, L - 1,0 cm	248.00	0.41	0.68	1.48	65.5	1739.63
S1-0,6 %, L - 1,2 cm	200.00	0.37	0.64	1.35	65.5	1447.55
S1-0,8 %, L - 1,4 cm	156.00	0.33	0.60	1.00	65.5	1429.01
				Rata-rata		1761.16
SI-DP-0,8 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu +0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,8 %, L - 0,5 cm	264.00	0.34	0.61	1.21	65.5	2031.92
S1-0,8 %, L - 0,6 cm	280.00	0.38	0.65	1.22	65.5	2277.56
S1-0,8 %, L - 0,8 cm	290.00	0.41	0.68	1.32	65.5	2286.60
S1-0,8 %, L - 1,0 cm	258.00	0.39	0.66	1.28	65.5	2025.74
S1-0,8 %, L - 1,2 cm	220.00	0.34	0.61	1.25	65.5	1639.08
S1-0,8 %, L - 1,4 cm	169.00	0.31	0.58	0.98	65.5	1521.85
				Rata-rata		1963.79
SI-DP-1.0 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu +0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-1.0 %, L - 0,5 cm	171.00	0.32	0.59	1.02	65.5	1524.48
S1-1.0 %, L - 0,6 cm	182.00	0.33	0.60	1.03	65.5	1618.62
S1-1.0 %, L - 0,8 cm	180.00	0.32	0.59	1.05	65.5	1544.65
S1-1.0 %, L - 1,0 cm	170.00	0.30	0.57	1.02	65.5	1449.30
S1-1.0 %, L - 1,2 cm	141.00	0.28	0.55	0.90	65.5	1309.69
S1-1.0 %, L - 1,4 cm	108.00	0.25	0.52	0.77	65.5	1107.96
				Rata-rata		1425.78
SI-DP-1.2 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu +0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-1.2 %, L - 0,5 cm	135.00	0.31	0.58	0.98	65.5	1215.52
S1-1.2 %, L - 0,6 cm	161.00	0.29	0.56	0.96	65.5	1433.84
S1-1.2 %, L - 0,8 cm	155.00	0.29	0.56	0.92	65.5	1446.15
S1-1.2 %, L - 1,0 cm	133.00	0.28	0.55	0.78	65.5	1416.39
S1-1.2 %, L - 1,2 cm	110.00	0.26	0.53	0.72	65.5	1235.91
S1-1.2 %, L - 1,4 cm	86.00	0.22	0.49	0.62	65.5	1051.11
				Rata-rata		1299.82

3. Proses Review

- Mendapat Notifikasi Revisi pada 5 Desember 2023

[MKTS] Editor Decision

External

Inbox x

Dr. Yulita Arni Priastwi, ST. MT. <mailto:ejournal.undip.ac.id>

to me

Translate to English

X

Ir/S.T./M.P.W.K Muhammad Ridha Kasim:

Terima kasih atas kontribusi Saudara pada jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil. Terlampir Hasil Review dari reviewer. Silahkan upload makalah yang sudah direvisi maksimal 7 hari setelah menerima email ini pada kolom author version melalui link berikut:

<https://ejournal.undip.ac.id/index.php/mkts/index>

Silakan kirim form author response ke mkts@live.undip.ac.id. Contoh "Author Response" terlampir.

Salam

Dr. Yulita Arni Priastwi, ST. MT.
Department of Civil Engineering Diponegoro University
Phone 08122858572
yulitaarnipriastwi@gmail.com

Reviewer A:

Originality

1 (poor)

Quality

2

Relevance

4

Presentation

1 (poor)

Consistency of title with content

4

Consistency of conclusion with content

3

Total (sum of I-VI)

15

General comment

Sangat banyak typo. Penggunaan tata bahasa yang tidak baik. Penyusunan kalimat yang buruk. Metode dan analisis yang terlalu sederhana. Dikuti kesimpulan yang sempit.

Mandatory changes

Tiadakan typo. Tulis ulang dengan tata bahasa Indonesia yang sederhana, baik, dan benar. Analisis perlu diperdalam, misalkan dengan statistik deskriptif.

Suggested changes

Gunakan raster / hatch hitam-putih untuk gambar.

MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL
<http://mkts.sipil.undip.ac.id>
email : mkts@live.undip.ac.id

Lampiran Catatan File Revisi



MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL

Website : mkts.sipil.undip.ac.id

E-ISSN : 2549 - 6778

doi: [mkts.v22i2.12871](https://doi.org/10.22121/mkts.v22i2.12871)

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

Abstract

Reinforcement of **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 study was to determine the effect of palm fiber as a reinforcing material in increasing the cohesive and tensile strength of asphalt concrete mixtures due to the temperature influence. The research was done by experimental methods in the laboratory using palm fiber material based on the optimum percentage of 0.6% with a length of 8 mm and tested with variations in temperature. The results show that the asphalt concrete mixture with palm fiber reinforcement has a total deformation value of 1.09 mm with a deformation rate of 0.0033 mm/minute which is smaller than the asphalt concrete mixture without using palm fiber which has a total deformation of 1.19 mm with a deformation rate 0.0040 mm/minute at a test temperature of 40°C meanwhile at a temperature of 60°C asphalt concrete mixture with palm fiber is 1.83 mm with a deformation rate of 0.0107 mm/minute, while without palm 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 untuk meningkatkan kekuatan dan indeks kelelahan akibat peningkatan beban lalu lintas dan pengaruh temperatur guna mengurangi potensi terjadinya defomasi permanen. Tujuan penelitian ini untuk **mengetahui sebesar** pengaruh serat ijuk sebagai bahan penguat dalam meningkatkan kekuatan kohesif dan tarik campuran beton aspal akibat pengaruh temperatur. Penelitian dilakukan dengan metode eksprimental **dilaboratorium** dengan bahan serat ijuk berdasarkan persentase optimum sebesar 0,6% dengan panjang 8 mm dan diuji dengan variasi temperatur. Hasil pengujian menunjukkan campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk (DS) memiliki nilai total deformasi sebesar 1.09 mm dengan laju deformasi 0.0033 mm/menit lebih kecil dibandingkan dengan campuran beton aspal tanpa menggunakan serat ijuk (TS) dengan total deformasi sebesar 1.19 mm dengan laju deformasi 0.0040 mm/menit pada temperatur pengujian 40°C dan sementara pengujian pada temperatur 60°C campuran beton aspal dengan serat ijuk (DS) sebesar 1.83 mm dengan laju deformasi 0.0107 mm/menit, sementara tanpa serat ijuk total deformasi sebesar 2.00 mm dengan laju defromasi 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

Perkerasan jalan raya dipengaruhi oleh faktor beban lalu lintas dan kondisi alam **sekitarnya**. Beban lalu lintas terdiri dari adanya tarik arah radial dan tegangan tekan arah vertikal yang terjadi akibat beban gandar kendaraan yang melintas diatas struktur perkerasan. **Intesnitas** dan **besaranya** beban yang bekerja berbanding lurus sebagai

beban berulang secara periodik yang diakibatkan adanya tekanan pada struktur lapis perkerasan (Serin et al., 2012) Peningkatan tekanan pada struktur lapis perkerasan **mengalami** kerusakan defromasi permanen atau adanya alur permukaan (rutting) pada temperatur tinggi **sebagai akibat terjadi geser** (Suaryana et al., 2016) Gaya geser didefinisikan sebagai perpindahan campuran aspal kearah horisontal. Ada dua pokok

Commented [A1]: Sugar palm fibers

Commented [A2]: Deformasi ?

Commented [A3]: Perhatikan pemilihan katanya

Commented [A4]: Perhatikan tata bahasa

Commented [A5]: Sederhanakan kalimat ini, supaya lebih mudah dipahami

Commented [A6]: Apa yang mengalami ?

Commented [A7]: Gunakan tata bahasa yang baku

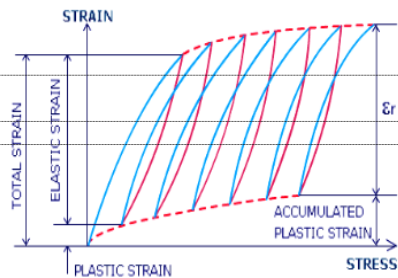
mekanisme terjadinya gaya geser. Yang pertama adalah ketidakstabilan dari campuran aspal, dimana menghasilkan indeks plastis (kelelahan) yang rendah menyebabkan terjadinya pergeseran arah horizontal.

Ketidakstabilan dan adanya gaya geser yang diakibatkan tekanan beban, hal ini yang sering terjadi sebagai dampak pemakaian atau persentase aspal pengikat yang terlalu banyak (rongga udara rendah) menyebabkan terjadinya bleeding dan rutting, serta lendutan. 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).

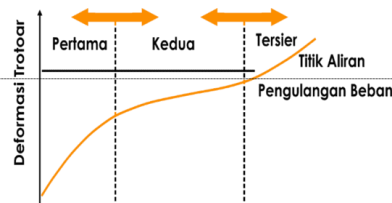
Deformasi permanen (dalam bentuk rutting banyak terjadi pada jalur tapak roda kendaraan. Rutting mempunyai dua penyebab utama yaitu: 1). Rutting yang disebabkan oleh terlalu banyaknya tekanan/pembebanan berulang yang berdampak terhadap kerusakan pada lapis bawah (dikarenakan subgrade jelek). 2). Rutting yang disebabkan terlalu banyaknya tekanan/pembebanan berulang yang berdampak terhadap kerusakan pada lapis atas (struktur perkerasan) (Aditihya et al., 2016). Pada Gambar 1 menunjukkan distribusi tegangan sampai terjadinya deformasi permanen pada perkerasan jalan lentur, yang biasa disebut (rutting dan geser), Alur, biasanya terdiri dari lendutan memanjang yang terjadi pada jalur roda kendaraan merupakan akumulasi dalam jumlah kecil terjadinya deformasi disebabkan oleh adanya peningkatan beban (Asphalt Institute, 1996).

Tahapan proses deformasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 yaitu tahap primer merupakan tahap awal memiliki potensi rutting yang tinggi, dengan tingkat penurunan deformasi plastik, terutama yang berhubungan dengan perubahan volumetrik. Tahap sekunder dengan tingkat rutting yang kecil menunjukkan tingkat perubahan rutting yang konstan yang juga terkait dengan perubahan volumetrik campuran aspal; Namun, deformasi geser terjadi peningkatan. Sementara tahap tersier dengan tingkat rutting yang tinggi terutama terkait dengan deformasi plastik (geser), ada perubahan volume panduan desain AASHTO (AASHTO, 2002).

Tahap primer merupakan tahap awal memiliki potensi rutting yang tinggi, dengan tingkat penurunan deformasi plastik, terutama yang berhubungan dengan perubahan volumetrik. Tahap sekunder dengan tingkat rutting yang kecil menunjukkan tingkat perubahan rutting yang konstan yang juga terkait dengan perubahan volumetrik campuran aspal; Namun, deformasi geser terjadi peningkatan. Sementara tahap tersier dengan tingkat rutting yang tinggi terutama terkait dengan deformasi plastik (geser), ada perubahan volume panduan desain AASHTO (AASHTO, 2002).



Gambar 1. Akumulasi Tegangan Plastik pada Perkerasan Jalan (Modifikasi Sumber After Asphalt Institute, 1996 dalam (Mahan, 2013)



Gambar 2. Perilaku Deformasi Permanen Terhadap Model Beban Berulang pada Lapisan Perkerasan (Modifikasi Sumber 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 berfungsi untuk meningkatkan sifat-sifat campuran dan kekuatan material dan karakteristik kelelahan, dan meningkatkan elastisitas (García et al., 2013); (Jamal Khattak et al., 2013). Selain itu, diketahui bahwa serat dapat berkontribusi untuk meningkatkan ketahanan dan mencegah terjadinya (Xue et al., 2013), meningkatkan kekuatan kohesif dan tarik campuran aspal dan memberikan perubahan fisik terhadap campuran aspal (Abtahi et al., 2010), dan tingkat penyerapan dan luas permukaan tergantung jenis serat (Abiola et al., 2014).

Selain itu, serat dapat meningkatkan modulus dinamis, tahan air, ketahanan retak, dan ketahanan rutting pada campuran beton aspal, mencegah pembentukan dan propagasi retak. (García et al., 2013); (Aliha et al., 2017), memperbaiki alur, kelelahan dan perilaku campuran pada temperatur rendah (Ziari & Moniri, 2019). Beberapa konsep atau teori terhadap karakteristik fungsi serat tersebut, dimana tidak hanya mengoptimalkan sifat

Commented [A8]: Dimana ?
Perhatikan tata bahasanya.

Commented [A9]: Mana yang kedua ?

Commented [A10]: Sederhanakan kalimat, perhatikan tata bahasa

Commented [A11]: Mana kurang tutupnya?

Commented [A12]: Penulisan tidak ajeg

serat, diameter serat, panjang, tekstur permukaan, tetapi juga dalam mekanisme sebagai bahan penguat pada campuran beton aspal (Abtahi et al., 2010).

Oleh karena itu, penguatan serat pada campuran beton aspal merupakan salah satu pendekatan untuk meningkatkan tegangan tarik dan serat adalah bahan penguat yang memiliki sifat dan karakteristik dengan kekuatan tarik dan sifat lentur yang cukup tinggi. Salah satu serat alam yang memiliki potensi dengan kemampuan lentur dan kekuatan tarik yang tinggi adalah serat ijuk (Arenga Pinnata) sebagai bahan penguatan pada campuran beton aspal.

Serat Ijuk merupakan bahan baku yang mudah diperoleh dengan harga yang lebih murah, memiliki massa jenis yang lebih rendah dibanding dengan serat mineral. Serat ijuk diperoleh dari batang aren (arenga pinnata) yang banyak tumbuh di seluruh wilayah Indonesia. Dari tumbuhan ini menghasilkan serat berwarna hitam dan mudah diperoleh dan ramah lingkungan.

Serat ijuk memiliki komposisi kandungan kimia sebagai berikut, selulosa, hemiselulosa, lignin, air, dan abu, berturut turut sebesar 51.54%, 15.88%, 44.09%, dan 8,9% serta 2,54 %. Persentase kandungan unsur selulosa dan Hemiselulosa pada serat ijuk memberikan kekuatan adhesi yang tinggi sebagai material komposit pada campuran beton aspal, sementara unsur lignin melindungi permukaan serat ijuk dari cuaca dan panas dan meningkatkan tegangan pada serat ijuk (Santhiarsa, 2015).

Analisis kedalaman rutting dengan pengujian Wheel Tracking merupakan suatu simulasi, dimana beban roda bergerak maju mundur melintas diatas benda uji. Ketahanan deformasi dari benda uji yang telah ditetapkan, dapat diukur dengan melihat hasil yang diperoleh dari kedalaman alur (Rut Depth) setelah dilalui sejumlah lintasan, atau Laju Deformasi (RD, Rate of Deformation) dalam mm/menit (Hunter et al., 2015) Disamping itu juga dapat diukur nilai Stabilitas Dinamis (DS, Dynamic Stability), yaitu jumlah lintasan yang diperlukan untuk membentuk alur sedalam 1 mm. Stabilitas Dinamis (DS) dan Laju deformasi (RD) dapat dihitung dengan menggunakan rumus: (Suherman, 2012).

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

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

Dengan :

DS = Stabilitas Dinamis (lintasan/mm)

RD = Laju Deformasi (mm/menit)

d1 = Deformasi pada pengujian 45 menit (mm)

d2 = Deformasi pada pengujian 60 menit (mm)

C1 = Faktor koreksi peralatan adalah 1.0

C2 = Faktot r koreksi spesimen adalah 1.0

t1 = 45 menit

t2 = 60 menit

Modulus kekakuan dihitung dengan uji kuat tarik tidak langsung (Indirect Tensile Strength) dengan aplikasi beban secara vertikal pada dimensi vertikal 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) sebagai berikut :

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

Dimana σ_{max} adalah tegangan tarik horisontal ditengah specimen, P adalah beban maksimum vertikal yang diterapkan, dx adalah diameter rata-rata spesimen, dan t ketebalan rata-rata specimen.

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

Dimana S_m adalah modulus kekakuan, H adalah deformasi horisontal, dan μ adalah passion ratio.

Metode

Serat ijuk diperoleh dari Sulawesi Selatan dengan usia pohon aren diatas umur 5 tahun dengan serat yang hitam sebagai penguat (reinforced). Serat ijuk dipilih pada bagian ujung yang berdiameter 0.30 mm ini dipilih karena pada bagian tersebut solit tidak terdapat lubang sedangkan pada bagian pangkal berlubang dan terdapat gabus walaupun hanya sedikit kandungannya. Sampel serat ijuk seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Serat Ijuk a) yang Masih Menyatu b) Serat Ijuk telah Dipisahkan

Agregat yang digunakan adalah batu pecah ukuran maksimum 19.1 mm, 12.7 mm, dan 9.8 mm berdasarkan persyaratan spesifikasi campuran AC WC, dan Abu batu (ukuran Lolos saringan No. 4 (4,75 mm) dengan bahan pengikat aspal pen 60/70 Metode dalam penelitian ini dengan melakukan pengujian ekprimental berdasarkan hiptotesa, penyeleksian sampel berdasarkan variasi komposisi panjang dan persentase serat, dan

Commented [A13]: Solit ?

Commented [A14]: Seerhanakan kalmatnya.

Commented [A15]: Maksimum kok ada beberapa ukuran ?

Commented [A16]: Apa guna tanda kutip ini?

mengalokasi sampel pada kondisi eksperimental yang berbeda terhadap variasi temperatur pengujian.

Model perlakuan serat ijuk dengan melakukan perendaman **air** laut selama 3 minggu seperti pada **Gambar 4** dan selanjutnya dilakukan pengujian sifat mekanik serat ijuk pada uji tarik serat tunggal berdasarkan standar ASTM 3379-02 pada **Gambar 4**.



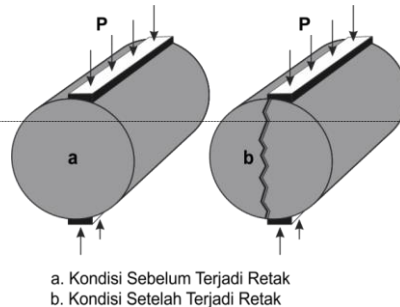
Gambar 4. Proses Perendaman Serat Ijuk Diameter 0.3 mm dengan Air Laut

Penentuan modulus kekakuan berdasarkan hasil Pengujian dengan uji tarik tidak langsung (**indirect tensile strenght**) pada campuran dengan penguatan serat ijuk terhadap variasi panjang (5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm dan 14 mm dan persentase serat ijuk dengan variasi 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8%, 1,0% dan 1,2% dengan temperatur 40°C, dengan pemadatan 2 x 75 tumbukan. Model set up pengujian seperti pada **Gambar 6**.



Gambar 5. Set Up Uji Tarik Serat Tunggal

Sementara pengujian kuat tarik tidak langsung pada campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk terhadap variasi panjang dan persentase serat ijuk untuk mengetahui sifat modulus kekakuan dan passion ratio pada **Gambar 7**. Pengujian kuat tarik tidak langsung (**indirect tensile strenght**) diuji untuk masing-masing variasi persentase dan panjang serat ijuk.



a. Kondisi Sebelum Terjadi Retak
b. Kondisi Setelah Terjadi Retak

Gambar 6. Ilustrasi Pengujian IDT-Strength (Sumber : (Yoder et al., 1975)

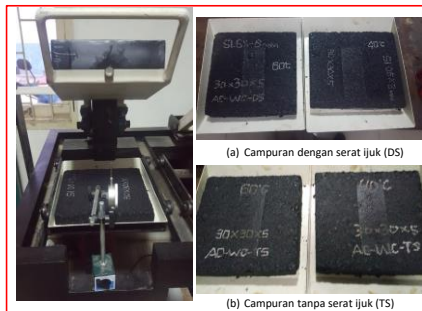


Gambar 7. Model Pengujian ITS

Pengujian stabilitas dinamis dilakukan dengan alat uji **wheel tracking** dimana benda uji ukuran 300 x 300 x 50 mm dibebani dengan roda yang melintasinya bolak balik sebagai simulasi beban roda kendaraan selama 60 menit. Perubahan bentuk yang dinyatakan sebagai deformasi permanen diukur. pada pengujian **Wheel traking** pada campuran beton aspal tanpa serat ijuk dan campuran dengan serat ijuk berdasarkan panjang serat ijuk 8 mm dengan persentase optimum 0.6 % pada pengujian temperatur 40°C dan 60°C.

Pengujian dilakukan oleh roda penguji terbuat dari karet keras yang **mempunya** diameter 20 cm dengan lebar 6 cm dan dibebani $6.4 \pm 0.15 \text{ kg/cm}^2$. **Set up** pengujian dan model sampel uji seperti pada **Gambar 8**.

Commented [A17]: Sebutkan sumber metode yang dipakai



Gambar 8. Set Up Pengujian Wheel Tracking dan Kondisi Deformasi Permanen pada Sampel Uji

Hasil dan Pembahasan

Data hasil pengujian eksperimental dilaboratorium sebagai data primer kemudian diperoleh data karakteristik dan sifat campuran berupa tegangan dan regangan tarik, modulus kekakuan, passion ratio dan deformasi permanen dengan parameter variasi panjang dan persentase serat ijuk dan temperatur. Untuk memperoleh hubungan antara parameter atau masing-masing variabel dan output data dilakukan analisis rancangan factorial dengan metode statistik.

1. 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.

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

Sampel	Beban Tarik $P = \text{N/mm}^2$	Luasan $A = (\text{mm}^2)$	Tegangan tarik Serat Tunggal $\sigma = \text{N/mm}^2$	$\sigma_{\text{rata-rata}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{rata-rata}}$ (%)
SI-TR	5.910	0.0707	134.71	130.45	14.24
SI-M3-1	10.018	0.0707	141.70		
SI-M3-2	9.732	0.0707	137.65		
SI-M3-3	9.341	0.0707	132.12		
SI-M3-4	8.261	0.0707	116.85		
SI-M3-5	8.761	0.0707	123.92		

Pengaruh perendaman air laut 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 yang dihasilkan sebesar 14.24 %. Dibandingkan dengan serat ijuk tanpa rendaman persentase regangan yang terjadi lebih kecil sebesar 11.89 %. Pada Tabel 2 (lampiran) menunjukkan modulus kekakuan campuran

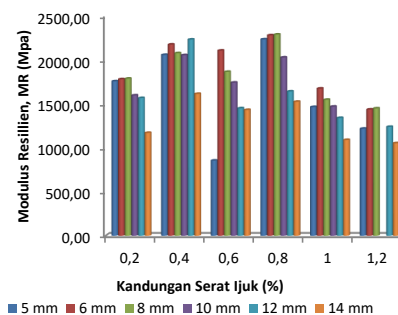
dengan variasi persentase terhadap panjang serat ijuk

2. Hasil Uji Indirect Tensile Strength

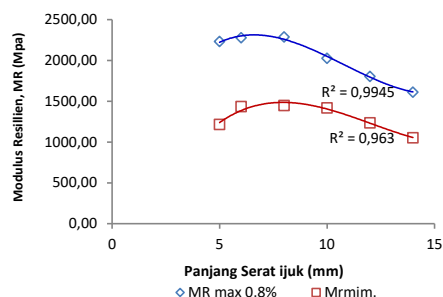
Hasil pengujian kuat tarik tidak langsung (indirect tensile strength) pada Gambar 9 menunjukkan bahwa nilai modulus resillien (MR) campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk mengalami peningkatan sampai persentase 0.4% terhadap masing-masing variasi panjang serat ijuk, selanjutnya pada persentase 0.6% mengalami penurunan kemudian naik pada persentase 0.8% dengan nilai modulus resillien maksimum dan secara linier mengalami penurunan sampai pada persentase 1.2%.

Panjang serat ijuk memiliki pengaruh dan kontribusi dalam meningkatkan tegangan tarik dan regangan tarik terhadap peningkatan modulus resillien. Pada persentase penggunaan serat ijuk 0.2% deviasi nilai tegangan dari panjang serat ijuk minimum 5 mm terhadap panjang serat 8 mm sebesar $\sigma = 77.70 \text{ Mpa}$ dengan persentase rata-rata 4.42 %. Sementara pada persentase 0.4% rata-rata peningkatan tegangan sebesar $\sigma = 64.73 \text{ Mpa}$ dengan persentase 3.15 %. Pada persentase 0.6% rata-rata kontribusi tegangan setiap panjang serat ijuk terhadap panjang serat optimum 8 mm sebesar $\sigma = 180.33 \text{ Mpa}$ 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

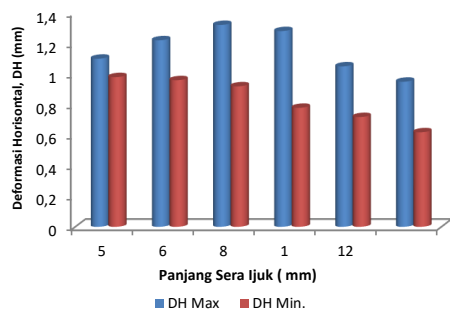
Commented [A18]: MPa



Gambar 9. Hubungan Kandungan Serat Terhadap Panjang Serat dengan Modulus Resilien



Gambar 10. Hubungan Nilai Modulus Resilien MR Maksimum (Mrmaks.) dengan Panjang Serat Ijuk



Gambar 11. Hubungan Modulus Resilien (MR) Dengan Panjang Serta Ijuk terhadap Deformasi Horizontal Maksimum (Dhmaks.) dan Minimum (Dhmin)

Pada **Gambar 10** menunjukkan modulus kekakuan maksimum pada persentase 0.8% dengan panjang serat ijuk 8 mm. kondisi menunjukkan bahwa campuran dengan persentase serat ijuk 0.8 % terhadap variasi panjang memiliki sifat modulus kekakuan yang lebih tinggi dengan deformasi horizontal Δdh yang lebih kecil seperti pada **Gambar 11** dibandingkan dengan campuran dengan persentase serat ijuk 0.6 % dengan deformasi horizontal Δdh yang lebih besar. Hal menunjukkan serat ijuk dengan persentase 0.6 % dengan panjang 8 mm memberikan sifat campuran yang lebih fleksibel dengan deformasi horizontal maksimum Δdh_{maks} sebesar 1.68 mm dengan poisson ratio $\mu = 0.44$ seperti pada **Tabel 2** dan memiliki ketahanan terhadap terjadi retak pada campuran.

Namun sebaliknya campuran dengan modulus kekakuan yang rendah dengan deformasi yang kecil menunjukkan kekakuan yang tinggi rentang terjadinya retak akibat peningkatan beban lalu

lintas. Hal ini terlihat pada **Gambar 12** serat dengan panjang 8 mm menunjukkan deformasi horizontal (Δdh) sebesar 1.2 mm yang lebih besar dibandingkan dengan serat ijuk dengan ukuran yang lebih pendek maupun yang lebih panjang. Sementara serat ijuk pada panjang maksimum 14 mm pada persentase 1.2 % persentase penurunan nilai modulus resilien (MR) sebesar 45.968 % dengan tegangan $\sigma = 1051.11$ Mpa terhadap panjang dan persentase serat optimum.

Serat dengan ukuran panjang yang lebih pendek memiliki kemampuan memperkuat daya rekat dari pengikat aspal dimana penyerapan, difusi, dan ikatan antara aspal dan peningkatan tebal film oleh pada campuran mengandung aspal pengikat dan memperkuat efek ikatan bidang permukaan antara fase serat aspal dan fase mineral agregat, yang secara efektif menurunkan risiko kerusakan struktur (Xue et al., 2013). Kekuatan tarik serat meningkatkan kinerja campuran untuk tahan terhadap deformasi horisontal dengan baik. Peningkatan kandungan serat sampai pada batas optimum pada campuran meningkatkan kekuatan tarik dan kandungan serat lebih dari batas ekstrim atau optimum, serat-serat akan mengurangi kemampuan daya lekat antara agregat dan kekuatan akan berkurang (Lavassani et al., 2015).

3. Deformasi Permanen

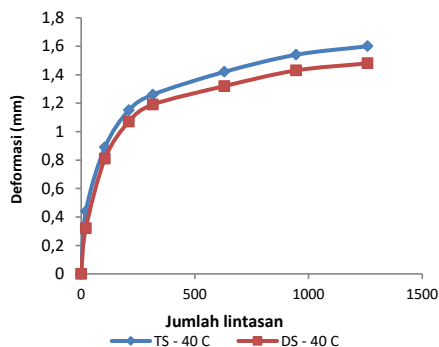
Pengujian **Wheel Tracking** merupakan suatu simulasi, dimana beban roda bergerak maju mundur melintas diatas benda uji untuk mengukur kedalaman alur alur (**Rut Depth**) setelah dilalui sejumlah lintasan, atau Laju Deformasi (RD, Rate of Deformation) dalam mm/menit (Shell Bitumen, 1990). Pada **Tabel 3** dan **Tabel 4** menunjukkan hasil pengujian deformasi permanen terhadap campuran dengan serat ijuk (DS) dengan panjang 8 mm dan persentase optimum 0.6 % dan tanpa serat ijuk (TS) pada temperatur pengujian 40°C dan 60°C.

Tabel 3. Hasil Pengujian Wheel Tracking pada Temperatur 40°C

Temperatur		40°C	40°C
Waktu (Menit)	Jumlah siklus	Deformasi, (mm)	
		TS	DS
0	0	0	0
1	21	0.44	0.32
5	105	0.89	0.81
10	210	1.15	1.07
15	315	1.26	1.19
30	630	1.42	1.32
45	945	1.54	1.43
60	1260	1.6	1.48
Total deformasi		1.19	1.09
Stabilitas dinamis (lintasan/ mm)		10,500	12,600
Laju deformasi (mm/menit)		0.0040	0.0033

Tabel 4. Hasil Pengujian Wheel Tracking pada Temperatur 40°C

Temperatur		60°C	60°C
Waktu (Menit)	Jumlah siklus	Deformasi, (mm)	
		TS	DS
0	0	0	0
1	21	0.77	0.66
5	105	1.34	1.25
10	210	1.79	1.59
15	315	2.04	1.81
30	630	2.44	2.26
45	945	2.72	2.55
60	1260	2.89	2.71
Total deformasi		2.00	1.83
Stabilitas dinamis (lintasan/ mm)		3,706	3,938
Laju deformasi (mm/menit)		0.0113	0.0107

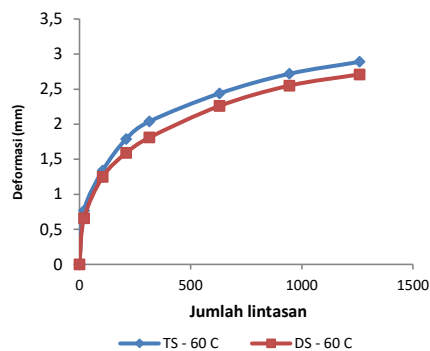


Gambar 12. Hasil pengujian Wheel Tracking pada temperatur 40°C

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 (DS). 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.

Kemiringan garis linier pada **Gambar 12** dan **Gambar 13** 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 campuran tanpa serat maupun campuran 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 40°C

Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran dengan menggunakan serat ijuk dengan pengujian dua temperatur yang 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 ada dua faktor yaitu: 1) serat memiliki kemampuan dalam menstabilkan dan meningkatkan daya lekat aspal pada bidang permukaan antara agregat dengan aspal terhadap perubahan sifat **viscositas** aspal akibat peningkatan temperatur, 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** adanya perbedaan yang cukup signifikan terhadap kedalaman **rutting** pada campuran tanpa serat yang lebih besar dengan total deformasi 1.19 mm untuk temperatur 40°C dan 2.89 mm untuk temperatur 60°C. Dibandingkan dengan campuran dengan serat ijuk total deformasi sebesar 1.09 mm untuk temperatur 40°C dan 2.70 mm untuk temperatur 60°C. Pola struktur jaringan yang lebih besar pada campuran dan tergantung pada geometrik dan sifat fisik serat memberi pengaruh terhadap peningkatan daya lekat dan

daya ikat. Umumnya serat dengan kekuatan tarik yang tinggi memiliki kemampuan secara efektif dalam menahan terjadinya retak, dan rasio panjang dan diameter yang lebih besar secara efektif membentuk suatu sistim jaringan yang lebih kuat. Rasio panjang serat yang optimum terhadap diameter serat merupakan salah satu faktor yang menjadi pertimbangan dalam penentuan panjang dan diameter yang dapat meningkatkan kinerja campuran beton aspal.

Kesimpulan

Hasil pengujian pada campuran beton aspal dengan penguatan serat ijuk dapat disimpulkan bahwa Penggunaan serat ijuk pada campuran beton aspal menunjukkan pengaruh signifikan terhadap peningkatan modulus kekakuan yang lebih pada penggunaan panjang serat ijuk 8 mm dengan persentase serat ijuk 0.6 % dengan deformasi horisontal maksimum Adhmaks. Sebesar 1.63 mm dengan modulus kekakuan Sm sebesar 1862.03 Mpa. Disamping itu campuran dengan penguatan serat ijuk memiliki kemampuan dalam meningkatkan ketahanan deformasi terhadap terjadinya rutting akibat pengaruh temperatur dan peningkatan beban lalu lintas dengan total deformasi (DS) yang terjadi lebih kecil dibandingkan campuran tanpa menggunakan serat ijuk dengan kemampuan meminimalisir potensi terjadinya rutting sebesar 17,5% pada temperatur rendah dan resiko terjadinya retak.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih dan penghargaan kepada kepala laboratorium Bahan Perkerasan Jalan dan Staf serta segenap civitas akademik program studi teknik sipil fakultas teknik Universitas Muslim Indonesia

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada,

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.).
https://kupdf.net/download/aashto-2002-standard-specifications-for-highway-bridges-17th_5af8664fe2b6f5f20add3215.pdf
- 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>
- Addihya, 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=bA1tIkRjL8kC&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 راغلطلا ططغض يف ددايزل تجيبن قينلفسلال قرطلا يف قيسيرلا لكاشملا نم ددختلا رهاظ غ وللا ا غ ه لاغغنتي يئلفغسلال كل ل قمزلالا غيرلخملا و*

Commented [A19]: Simbol DS dipakai tumpang tindih, sebaiknya dibuat unik.

Commented [A20]: Kesimpulan terlalu sempit, padahal banyak hal bisa diungkapkan.

Commented [A21]: Kepada ?

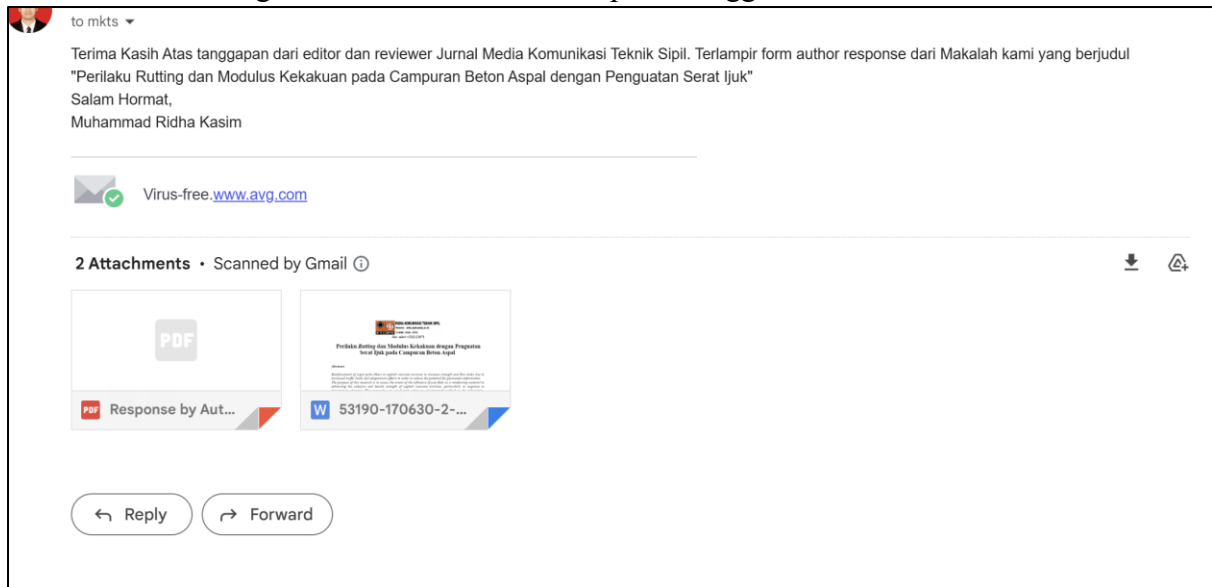
Commented [A22]: Perbaiki cara membuat bibliografi

- Qdisya Journal For Engineering Science, Vol. 6, No. 1., 6(1), 62–73. <https://qu.edu.iq/journaleng/index.php/JQES/article/view/292>
- 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. <https://www.example.edu/paper.pdf>
- 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. Witczak, Witczak, M. W., & M. W. Witczak. (1975). *Principles of Pavement Design*, Second Edition. Principles of Pavement Design, 716. <https://www.scribd.com/document/408401339/E-J-Yoder-M-W-Witczak-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>

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

SI-DP-0,2 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,2 %, L - 0,5 cm	200.00	0.33	0.60	1.05	65.5	1754.51
S1-0,2 %, L - 0,6 cm	222.00	0.34	0.61	1.10	65.5	1879.53
S1-0,2 %, L - 0,8 cm	211.00	0.36	0.63	1.13	65.5	1784.90
S1-0,2 %, L - 1,0 cm	194.00	0.34	0.61	1.07	65.5	1689.98
S1-0,2 %, L - 1,2 cm	173.00	0.31	0.58	0.98	65.5	1563.70
S1-0,2 %, L - 1,4 cm	125.00	0.29	0.56	0.92	65.5	1167.95
				Rata-rata		1640.09
SI-DP-0,4 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,4 %, L - 0,5 cm	235.00	0.36	0.63	1.10	65.5	2054.82
S1-0,4 %, L - 0,6 cm	255.00	0.37	0.64	1.15	65.5	2172.91
S1-0,4 %, L - 0,8 cm	254.00	0.36	0.63	1.18	65.5	2066.20
S1-0,4 %, L - 1,0 cm	230.00	0.40	0.67	1.15	65.5	2051.69
S1-0,4 %, L - 1,2 cm	193.00	0.37	0.64	0.85	65.5	2229.46
S1-0,4 %, L - 1,4 cm	149.00	0.40	0.67	0.95	65.5	1611.49
				Rata-rata	131.00000	2031.09
SI-DP-0,6 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,6 %, L - 0,5 cm	245.00	0.36	0.63	1.18	65.5	1984.94
S1-0,6 %, L - 0,6 cm	265.00	0.38	0.65	1.25	65.5	2103.82
S1-0,6 %, L - 0,8 cm	280.00	0.44	0.71	1.63	65.5	1862.03
S1-0,6 %, L - 1,0 cm	248.00	0.41	0.68	1.48	65.5	1739.63
S1-0,6 %, L - 1,2 cm	200.00	0.37	0.64	1.35	65.5	1447.55
S1-0,8 %, L - 1,4 cm	156.00	0.33	0.60	1.00	65.5	1429.01
				Rata-rata		1761.16
SI-DP-0,8 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,8 %, L - 0,5 cm	264.00	0.34	0.61	1.21	65.5	2031.92
S1-0,8 %, L - 0,6 cm	280.00	0.38	0.65	1.22	65.5	2277.56
S1-0,8 %, L - 0,8 cm	290.00	0.41	0.68	1.32	65.5	2286.60
S1-0,8 %, L - 1,0 cm	258.00	0.39	0.66	1.28	65.5	2025.74
S1-0,8 %, L - 1,2 cm	220.00	0.34	0.61	1.25	65.5	1639.08
S1-0,8 %, L - 1,4 cm	169.00	0.31	0.58	0.98	65.5	1521.85
				Rata-rata		1963.79
SI-DP-1.0 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-1.0 %, L - 0,5 cm	171.00	0.32	0.59	1.02	65.5	1524.48
S1-1.0 %, L - 0,6 cm	182.00	0.33	0.60	1.03	65.5	1618.62
S1-1.0 %, L - 0,8 cm	180.00	0.32	0.59	1.05	65.5	1544.65
S1-1.0 %, L - 1,0 cm	170.00	0.30	0.57	1.02	65.5	1449.30
S1-1.0 %, L - 1,2 cm	141.00	0.28	0.55	0.90	65.5	1309.69
S1-1.0 %, L - 1,4 cm	108.00	0.25	0.52	0.77	65.5	1107.96
				Rata-rata		1425.78
SI-DP-1.2 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-1.2 %, L - 0,5 cm	135.00	0.31	0.58	0.98	65.5	1215.52
S1-1.2 %, L - 0,6 cm	161.00	0.29	0.56	0.96	65.5	1433.84
S1-1.2 %, L - 0,8 cm	155.00	0.29	0.56	0.92	65.5	1446.15
S1-1.2 %, L - 1,0 cm	133.00	0.28	0.55	0.78	65.5	1416.39
S1-1.2 %, L - 1,2 cm	110.00	0.26	0.53	0.72	65.5	1235.91
S1-1.2 %, L - 1,4 cm	86.00	0.22	0.49	0.62	65.5	1051.11
				Rata-rata		1299.82

- Mengirim kan File Hasil Revisi pada Tanggal 6 Desember 2023



Catatan Respon Author Atas Rekomendasi Revisi:

Tanggapan Penulis untuk komentar Reviewer Perilaku Rutting dan Modulus Kekakuan Pada Campuran Beton Aspal dengan Penguatan Serat Ijuk		
	Reviewer Comments	Author Response
1	General Comments Sangat banyak typo. Penggunaan tata bahasa yang tidak baik. Penyusunan kalimat yang buruk. Metode dan analisis yang terlalu sederhana. Diikuti kesimpulan yang sempit.	• Kata dengan penulisan yang typo telah diperbaiki; • Penggunaan bahasa yang tidak baik telah dilakukan tata ulang Bahasa; • Kesimpulan telah ditambahkan dan diperluas.
2	Mandatory changes Tiadakan typo. Tulis ulang dengan tata bahasa Indonesia yang sederhana, baik, dan benar. Analisis perlu diperdalam, misalkan dengan statistik deskriptif.	• Kata dengan penulisan yang typo telah diperbaiki; • Penggunaan bahasa yang tidak baik telah dilakukan tata ulang Bahasa; • Analisis telah ditambahkan dan diperdalam; • Kesimpulan telah ditambahkan dan diperluas
3	Suggested changes Gunakan raster / hatch hitam-putih untuk gambar.	Grafik lebih informatif jika terdapat perbedaan warna, khususnya pada grafik yang menampilkan perbedaan panjang serat dan suhu
4	Other Changes / manuscript coments	Telah menyesuaikan catatan yang diberikan pada file terlampir (A1-A22)

Pemberitahuan Penerimaan Revisi dari Pengelola Jurnal

[MKTS] [ID-53190] Revised Version Acknowledgement External Inbox x

 **Prof. Dr. Ir. Sri Sangkawati, MS** <mkts@live.undip.ac.id>
to me ▾

Dec 6, 2023, 2:25 AM ☆ ↶ ⋮

Ir./S.T./M.P.W.K Muhammad Ridha Kasim:

Thank you for submitting the revision of manuscript, "Perilaku Rutting dan Modulus Kekakuan Pada Campuran Beton Aspal dengan Penguatan Serat Ijuk" to MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Manuscript URL: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/mkts/author/submission/53190>
Username: ridhadang
Editor: Yulita Priastiw, ST. MT.

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

Prof. Dr. Ir. Sri Sangkawati, MS
MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL

MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL
<http://mkts.sipil.undip.ac.id/>
email : mkts@live.undip.ac.id

Lampiran File Hasil Revisi

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

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.

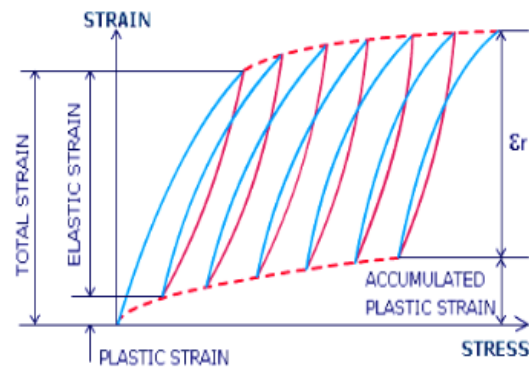
Ketidakstabilan dan gaya geser karena tekanan beban sering terjadi akibat penggunaan aspal pengikat yang berlebihan (rongga udara rendah). Hal ini dapat menyebabkan lendutan, *bleeding*, serta *rutting*. *Rutting* dapat secara signifikan mengurangi struktur dan kinerja fungsional struktur lapisan perkerasan 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. (Adtithya et al., 2016)

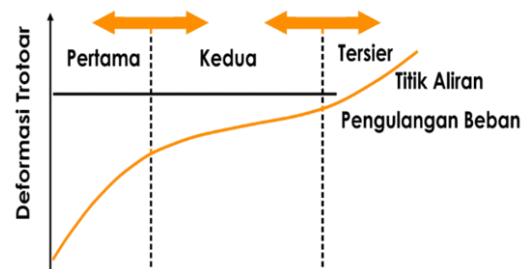
Gambar 1 menunjukkan distribusi tegangan sampai terjadinya *rutting* dan geser pada perkerasan jalan lentur biasanya disebut dengan deformasi permanen. Deformasi kecil akibat dari peningkatan beban yang terakumulasi biasanya akan membentuk alur. Alur ini biasanya merupakan lendutan yang memanjang akibat 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. Tahapan selanjutnya atau 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. Sedangkan pada tahapan 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). Selain itu 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 campuran aspal tersebut (Abtahi et al., 2010), dan penambahan serat jenis tertentu dapat pula meningkatkan nilai penyerapan dan luas permukaan (Abiola et al., 2014).

Selain itu, serat 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. Salah satu serat yang telah diidentifikasi memiliki sifat tersebut adalah serat ijuk. Dalam penelitian ini kemudian akan menjadikan serat ijuk menjadi bahan penguatan campuran beton aspal.

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, dimana tanaman ini sangat mudah ditemui di seluruh wilayah di Indonesia. Serat ijuk ini juga memiliki sifat ramah lingkungan dibandingkan dengan penggunaan serat mineral dalam hubungannya dengan limbah.

Serat ijuk secara kimiawi memiliki kandungan selulosa yang dominan sebesar 51%, kemudian kandungan lignin sebesar 44%, kemudian hemiselulosa sebesar kurang lebih 15%, serta air dan abu dengan persentase masing-masing 8% dan 2,5%. Masing-masing kandungan tersebut dapat memiliki fungsi tertentu, misalnya selulosa dan hemiselulosa dapat menambah kekuatan adhesi campuran aspal beton, 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 persamaan 2 berikut: (Suherman, 2012).

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

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

Dimana :

DS = Stabilitas Dinamis (lintasan/mm)

RD = Laju Deformasi (mm/menit)

d1 = Deformasi pengujian 45 menit (mm)

d2 = Deformasi pengujian 60 menit (mm)

C1 = Faktor koreksi peralatan adalah 1.0

C2 = Faktor koreksi spesimen adalah 1.0

t1 = 45 menit

t2 = 60 menit

Modulus kekakuan dihitung dengan uji kuat tarik tidak langsung (*indirect tensile strenght*) 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 horizontal pada campuran beton dapat dihitung berdasarkan persamaan (3) dan (4) sebagai berikut :

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

Dimana $\sigma_{\max}$ adalah tegangan tarik horizontal ditengah specimen, P adalah beban maksimum vertical yang diterapkan, dx adalah diameter rata-rata spesimen, dan t ketebalan rata-rata specimen.

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

Dimana S_m adalah modulus kekakuan, H adalah deformasi horizontal, dan μ adalah *passion ratio*.

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 pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Serat Ijuk a) yang Masih Menyatu b) Serat Ijuk telah Dipisahkan

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.

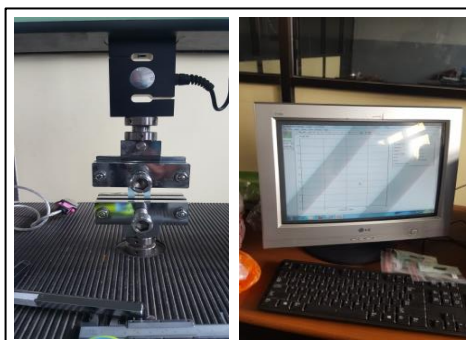
Metode dalam penelitian ini dengan melakukan pengujian ekprimental berdasarkan hiptotesa, penyeleksian sampel berdasarkan variasi komposisi panjang dan persentase serat, dan mengalokasi sampel pada kondisi eksprimental yang berbeda terhadap variasi temperatur pengujian.

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 sifak mekanik serat ijuk pada uji tarik serat tunggal berdasarkan standar ASTM 3379-02 pada **Gambar 4**.



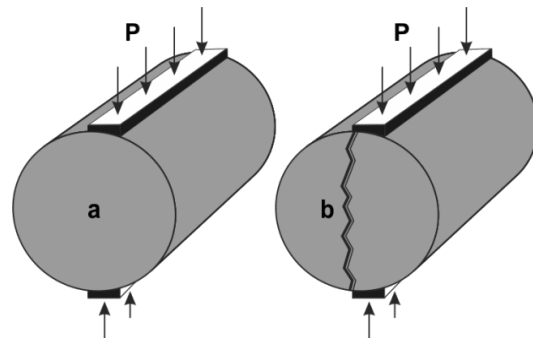
Gambar 4. Proses Perendaman Serat Ijuk Diameter 0.3 mm dengan Air Laut

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 pemdatan dengan jumlah tumbukan 2 x 75 pada suhu 40°C. Adapun panjang serat juga memiliki variasi antara lain 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, dan 14 mm. Adapun Model set up pengujian seperti ditampilkan pada **Gambar 6**.



Gambar 5. Set Up Uji Tarik Serat Tunggal

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.



a. Kondisi Sebelum Terjadi Retak
b. Kondisi Setelah Terjadi Retak

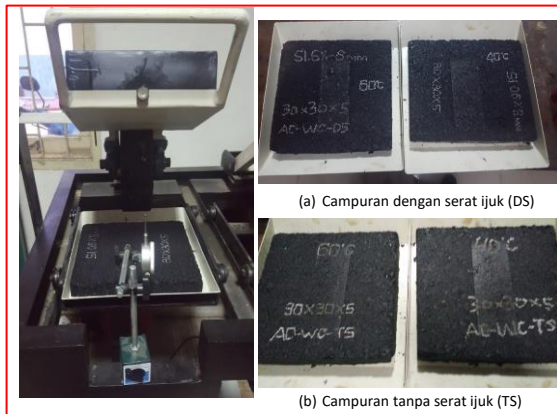
Gambar 6. Ilustrasi Pengujian IDT-Strength (Sumber : (Yoder et al., 1975))



Gambar 7. Model Pengujian ITS

Pengujian stabilitas dinamis dilakukan menggunakan alat uji *wheel tracking*, di mana benda uji berukuran 300 x 300 x 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 $6.4 \pm 0.15 \text{ kg/cm}^2$. Set up pengujian dan model sampel uji seperti pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Set Up Pengujian Wheel Tracking dan Kondisi Deformasi Permanen pada Sampel Uji

Hasil dan Pembahasan

Data hasil pengujian eksperimental dilaboratorium sebagai data primer kemudian menghasilkan 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.

1. 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 alut.

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

Sampel	Beban Tarik $P = N/mm^2$	Luasan $A = (mm^2)$	Tegangan tarik Serat Tunggal $\sigma = N/mm^2$	$\sigma_{rata-rata}$ (N/mm^2)	$\epsilon_{rata-rata}$ (%)
SI-TR	5.910	0.0707	134.71	130.45	14.24
SI-M3-1	10.018	0.0707	141.70		
SI-M3-2	9.732	0.0707	137.65		
SI-M3-3	9.341	0.0707	132.12		
SI-M3-4	8.261	0.0707	116.85		
SI-M3-5	8.761	0.0707	123.92		

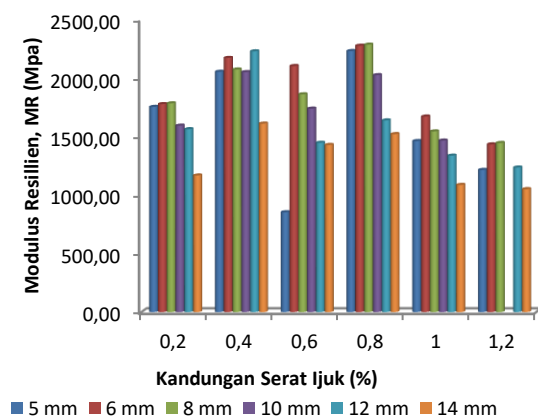
Pengaruh perendaman air laut mengakibatkan modulus kekakuan dan sifat fleksibilitas serat semakin tinggi. Hal ini diakibatkan adanya penghapusan dan penurunan unsur lignin dan selulosa yang melapisi permukaan serat ijuk sehingga serat semakin lentur dengan persentase regangan yang dihasilkan sebesar 14.24 %. Dibandingkan dengan serat ijuk tanpa rendaman persentase regangan yang terjadi lebih kecil sebesar 11.89 %. Pada **Tabel 2** (lampiran) menunjukkan

modulus kekakuan campuran dengan variasi persentase terhadap panjang serat ijuk

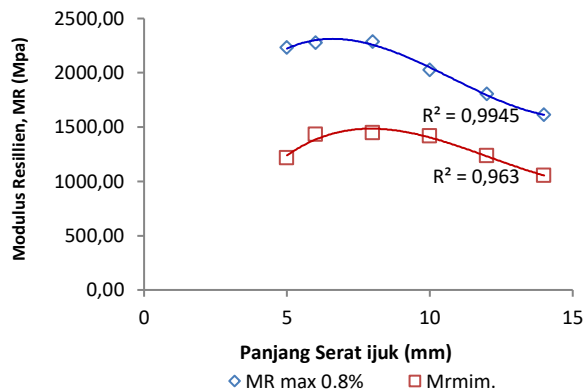
2. Hasil Uji Indirect Tensile Strength

Gambar 9 menunjukkan 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. Kemudian, 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%.

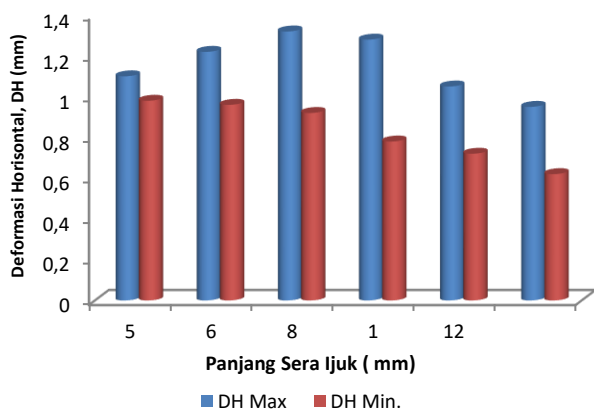
Pengaruh dan kontribusi panjang serat ijuk terlihat dalam peningkatan tegangan tarik dan regangan tarik, yang pada gilirannya meningkatkan modulus resiliensi. Pada persentase penggunaan serat ijuk 0.2% deviasi nilai tegangan dari panjang serat ijuk minimum 5 mm terhadap panjang serat 8 mm sebesar $\sigma = 77.70$ 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 Terhadap Panjang Serat dengan Modulus Resilien



Gambar 10. Hubungan Nilai Modulus Resillien MR Maksimum (Mrmaks.) dengan Panjang Serat Ijuk



Gambar 11. Hubungan Modulus Resillien (MR) Dengan Panjang Serta Ijuk terhadap Deformasi Horizontal Maksimum (Dhmaks.) dan Minimum (Dhmin)

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 yang 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 *poission ratio* $\mu = 0.44$, seperti tercatat dalam **Tabel 2**, dan memiliki ketahanan terhadap terjadinya retak pada campuran.

Hal sebaliknya terlihat pada Gambar 11. Nilai deformasi horisontal (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., Tahun 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., Tahun 2015, nilai tambah dari kuat tarik serat akan membuat campuran dapat menahan deformasi harizontal 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.

3. 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. Hasil Pengujian *Wheel Tracking* pada Temperatur 40°C

Temperatur		40°C	40°C
Waktu (Menit)	Jumlah siklus	Deformasi, (mm)	
		TS	DS
0	0	0	0
1	21	0.44	0.32
5	105	0.89	0.81
10	210	1.15	1.07
15	315	1.26	1.19
30	630	1.42	1.32
45	945	1.54	1.43
60	1260	1.6	1.48
Total defomasi		1.19	1.09
Stabilitas dinamis (lintasan/ mm)		10,500	12,600
Laju deformasi (mm/menit)		0.0040	0.0033

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.

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. Hasil Pengujian Wheel Tracking pada Temperatur 60°C

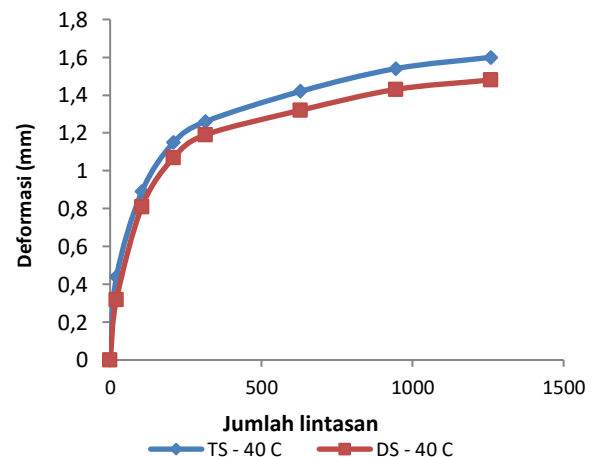
Temperatur		60°C	60°C
Waktu (Menit)	Jumlah siklus	Deformasi, (mm)	
		TS	DS
0	0	0	0
1	21	0.77	0.66
5	105	1.34	1.25
10	210	1.79	1.59
15	315	2.04	1.81
30	630	2.44	2.26
45	945	2.72	2.55
60	1260	2.89	2.71
Total deformasi		2.00	1.83
Stabilitas dinamis (lintasan/ mm)		3,706	3,938
Laju deformasi (mm/menit)		0.0113	0.0107

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.

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.

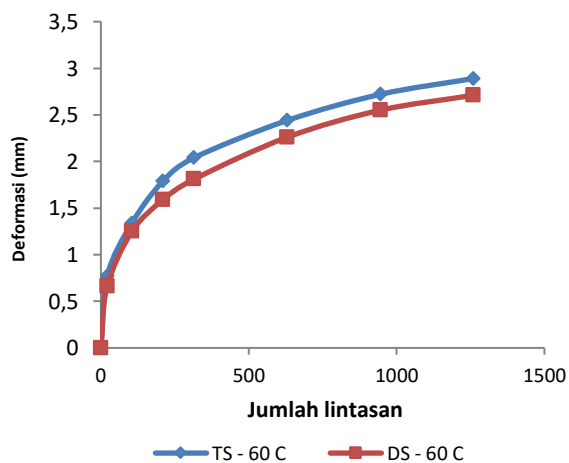


Gambar 12. Hasil pengujian Wheel Tracking pada temperatur 40°C

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.

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 campuran tanpa serat maupun campuran 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 40°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: 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, 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 yang 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 ($\Delta d_{maks.}$) 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>
- Adthiya, 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=bA1tIkRjL8kC&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 را غطلا ططغض يف قدابزل ةجبتن قيتلفسلال قرطلا يف قيسيزلا لكاشملا نم ددختلا ةرهاظ غ وللا ا غ ه للا غنتي بتلفغسلال كل ل تمزالا قيرلتخملا و*. *Al-Qdisya Journal For Engineering Science*, Vol. 6, No. 1., 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/ke m.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 Gyratory 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. Witczak, Witczak, M. W., & M. W. Witczak. (1975). *Principles of Pavement Design*, Second Edition. Principles of Pavement Design, 716.
<https://www.scribd.com/document/408401339/E-J-Yoder-M-W-Witczak-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>

Gambar 2. Modulus Kekakuan Campuran dengan Variasi Persentase Terhadap Panjang Serat Ijuk

SI-DP-0,2 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,2 %, L - 0,5 cm	200.00	0.33	0.60	1.05	65.5	1754.51
S1-0,2 %, L - 0,6 cm	222.00	0.34	0.61	1.10	65.5	1879.53
S1-0,2 %, L - 0,8 cm	211.00	0.36	0.63	1.13	65.5	1784.90
S1-0,2 %, L - 1,0 cm	194.00	0.34	0.61	1.07	65.5	1689.98
S1-0,2 %, L - 1,2 cm	173.00	0.31	0.58	0.98	65.5	1563.70
S1-0,2 %, L - 1,4 cm	125.00	0.29	0.56	0.92	65.5	1167.95
				Rata-rata		1640.09
SI-DP-0,4 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,4 %, L - 0,5 cm	235.00	0.36	0.63	1.10	65.5	2054.82
S1-0,4 %, L - 0,6 cm	255.00	0.37	0.64	1.15	65.5	2172.91
S1-0,4 %, L - 0,8 cm	254.00	0.36	0.63	1.18	65.5	2066.20
S1-0,4 %, L - 1,0 cm	230.00	0.40	0.67	1.15	65.5	2051.69
S1-0,4 %, L - 1,2 cm	193.00	0.37	0.64	0.85	65.5	2229.46
S1-0,4 %, L - 1,4 cm	149.00	0.40	0.67	0.95	65.5	1611.49
				Rata-rata	131.00000	2031.09
SI-DP-0,6 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,6 %, L - 0,5 cm	245.00	0.36	0.63	1.18	65.5	1984.94
S1-0,6 %, L - 0,6 cm	265.00	0.38	0.65	1.25	65.5	2103.82
S1-0,6 %, L - 0,8 cm	280.00	0.44	0.71	1.63	65.5	1862.03
S1-0,6 %, L - 1,0 cm	248.00	0.41	0.68	1.48	65.5	1739.63
S1-0,6 %, L - 1,2 cm	200.00	0.37	0.64	1.35	65.5	1447.55
S1-0,8 %, L - 1,4 cm	156.00	0.33	0.60	1.00	65.5	1429.01
				Rata-rata		1761.16
SI-DP-0,8 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-0,8 %, L - 0,5 cm	264.00	0.34	0.61	1.21	65.5	2031.92
S1-0,8 %, L - 0,6 cm	280.00	0.38	0.65	1.22	65.5	2277.56
S1-0,8 %, L - 0,8 cm	290.00	0.41	0.68	1.32	65.5	2286.60
S1-0,8 %, L - 1,0 cm	258.00	0.39	0.66	1.28	65.5	2025.74
S1-0,8 %, L - 1,2 cm	220.00	0.34	0.61	1.25	65.5	1639.08
S1-0,8 %, L - 1,4 cm	169.00	0.31	0.58	0.98	65.5	1521.85
				Rata-rata		1963.79
SI-DP-1.0 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-1.0 %, L - 0,5 cm	171.00	0.32	0.59	1.02	65.5	1524.48
S1-1.0 %, L - 0,6 cm	182.00	0.33	0.60	1.03	65.5	1618.62
S1-1.0 %, L - 0,8 cm	180.00	0.32	0.59	1.05	65.5	1544.65
S1-1.0 %, L - 1,0 cm	170.00	0.30	0.57	1.02	65.5	1449.30
S1-1.0 %, L - 1,2 cm	141.00	0.28	0.55	0.90	65.5	1309.69
S1-1.0 %, L - 1,4 cm	108.00	0.25	0.52	0.77	65.5	1107.96
				Rata-rata		1425.78
SI-DP-1.2 %						
Komposisi Campuran	Beban KN	Possion Ratio μ	$\mu + 0.27$	Deformasi Horisontal mm	Tinggi mm	Modulus Kekakuan (S_m) Mpa
S1-1.2 %, L - 0,5 cm	135.00	0.31	0.58	0.98	65.5	1215.52
S1-1.2 %, L - 0,6 cm	161.00	0.29	0.56	0.96	65.5	1433.84
S1-1.2 %, L - 0,8 cm	155.00	0.29	0.56	0.92	65.5	1446.15
S1-1.2 %, L - 1,0 cm	133.00	0.28	0.55	0.78	65.5	1416.39
S1-1.2 %, L - 1,2 cm	110.00	0.26	0.53	0.72	65.5	1235.91
S1-1.2 %, L - 1,4 cm	86.00	0.22	0.49	0.62	65.5	1051.11
				Rata-rata		1299.82

4. Pemberitahuan Naskah Diterima pada Tanggal 8 Januari dan 15 Januari 2024

Editor Decision di OJS

Editor Decision

Decision	Accept Submission 08-01-2024
Notify Editor	 Editor/Author Email Record  05-12-2023
Editor Version	53190-182578-1-ED.docx 01-08-2023
Author Version	53190-194263-1-ED.docx 05-12-2023 53190-194263-2-ED.docx 05-12-2023
Upload Author Version	Pilih File Tidak ada file yang dipilih Upload

Tagihan Pembayaran dari Pengelola Jurnal ke email

Pembayaran APC Artikel Jurnal MKTS

External

Inbox x



MKTS Undip <mkts@live.undip.ac.id>
to me

Mon, Jan 15, 8:04 AM

 Translate to English

x

Yth. Penulis
Paper ID53190

Selamat paper Anda telah siap disunting untuk diterbitkan dalam jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil.

Berkenaan dengan hal tersebut, mulai Volume 29 No 1, Juli 2023 penulis dikenakan biaya proses penerbitan sebesar Rp.900.000,- setiap judul paper. Mohon biaya tersebut dikirimkan ke rekening sekretariat jurnal berikut.

Bank : BNI
Nama : Andina Restiana
No rekening : 1795294043

Bukti pembayaran mohon dikirim melalui wa ke nomor 085641142115

Hormat kami,

—
Prof. Dr. Ir. Sri Sangkawati, MS
Editor In Chief
Media Komunikasi Teknik Sipil

Bukti Pembayaran Telah Melakukan Pembayaran



ISSN 0854-1809

No : 004/MKTS.APC/2024

Telah terima dari : Muhammad Ridha Kasim

Sebesar : Sembilan ratus ribu rupiah

Gunan Membayar : Proses penerbitan paper (ID Paper 53190)

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

Semarang, 15 Januari 2024

Andina Restiana

Sekretariat Jurnal MKTS

Rp. 900.000,-

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (UNDIP)
Jl. Prof. H Soedarto, SH., Tembalang, Semarang 50275 • Telp. 62 24 7474770, Faks. 62 24 7460060
Web site <http://www.ejournal.undip.ac.id> • Email: mkts@live.undip.ac.id

5. Proses Editing : Layout Approval

Layout Approval

External

Inbox x





MKTS Undip <mkts@live.undip.ac.id>
to me ▾

Sun, Mar 17, 11:47 AM ☆ ↶ ⋮

 Translate to English

×

Yth. Penulis

Terlampir file paper saudara yang telah kami proses editing layout, mohon periksa kembali identitas penulis, dan isi paper saudara, jika saudara setuju dengan layout ini silahkan reply email ini dengan dan melampirkan file paper (pdf) yang anda setuju, jika ada revisi mohon highlight pada bagian yang diperbaiki. Mohon lengkapi metadata pada sistem dalam 2 bahasa (bahasa Indonesia dan bahasa Inggris) **setelah anda menyetujui file ini maka anda sudah tidak diperkenankan untuk melakukan perbaikan.** kami tunggu respon anda dalam 1x24 Jam

Prof. Dr. Ir. Sri Sangkawati, MS
Editor In Chief
Media Komunikasi Teknik Sipil

2 Attachments • Scanned by Gmail ⓘ





Layout 53190 And...



Layout 53190 And...

↶ Reply

↷ Forward

#53190 Editing

[Summary](#) | [Review](#) | [Editing](#)

Submission

Authors Andi Alifuddin, Muhammad Ridha Kasim, Lambang Basri Said 

Title Rutting Behavior and Stiffness Modulus with Palm Fiber Reinforcement in Asphalt Concrete Mixtures

Section Articles

Editor Yulita Priastiwi, ST. MT. 

Copyediting

[Copyedit Instructions](#)

[Review Metadata](#)

		Request	Underway	Complete
1.	Initial Copyedit	—	—	—
	File: None			
2.	Author Copyedit	—	—	
	File: None			
	Pilih File Tidak ada file yang dipilih Upload			
3.	Final Copyedit	—	—	—
	File: None			

Copyedit Comments  No Comments

Layout

Layout Editor	None
----------------------	------

Layout Version		Request	Underway	Complete	Views
None		—	—	—	
Galley Format		File			
1.	PDF (Bahasa Indonesia) View Proof	53190-203433-1-PB.pdf	17-03-2024		0
Supplementary Files		File			
1.	Lampiran Tabel 2	53190-170629-1-SP.docx	21-03-2023		

Layout Comments  No Comments

Proofreading

[Review Metadata](#)

		Request	Underway	Complete
1.	Author	—	—	
2.	Proofreader	—	—	—
3.	Layout Editor	—	—	—

Proofreading Corrections  No Comments

Lampiran Layout Approval



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).

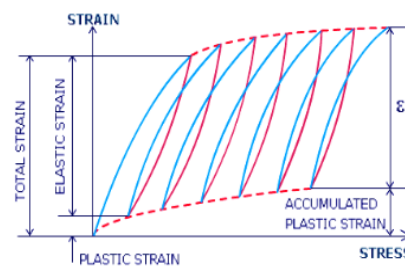
Gaya geser kemudian dapat diartikan sebagai pergeseran campuran aspal ke arah horizontal. Terdapat dua faktor utama penyebab terjadinya gaya geser. Pertama, berkaitan dengan campuran aspal yang tidak stabil, indeks plastis atau kelelahan yang terbentuk memiliki nilai yang rendah sehingga menyebabkan 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).

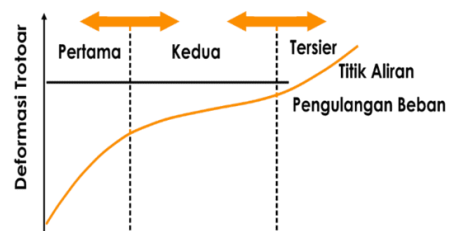
Deformasi permanen, berupa *rutting*, sering terjadi pada jalur dan area yang sering dilalui oleh roda kendaraan. *Rutting* dapat disebabkan oleh dua faktor utama. Pembebanan atau tekanan yang terlalu besar dan berulang secara terus-menerus dapat merusak lapisan bawah karena kondisi subgrade yang buruk. Kedua, *rutting* juga dapat disebabkan oleh tekanan atau pembebanan yang kemudian akan berdampak dan merusak lapisan dan struktur atas. (Adtihya *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 kemampuan 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 (d1) dan 60 menit (d2) diukur dalam milimeter. Faktor koreksi peralatan (C1) dan faktor koreksi spesimen (C2) masing-masing setara dengan 1,0. Waktu pengujian pertama adalah 45 menit (t1), sedangkan waktu pengujian kedua adalah 60 menit (t2).

Modulus kekakuan dihitung dengan uji kuat tarik tidak langsung (*indirect tensile strenght*) 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 $\sigma_{\max}$ adalah tegangan tarik horisontal ditengah specimen, P adalah beban maksimum vertical yang diterapkan, dx 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.

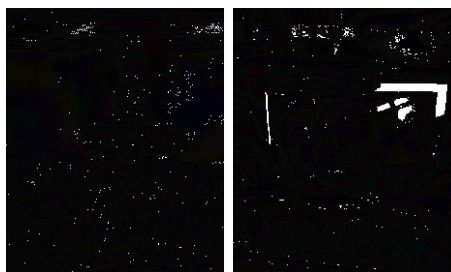


**Gambar 3. a) Serat ijuk masih menyatu
b) Serat ijuk telah dipisahkan**

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.



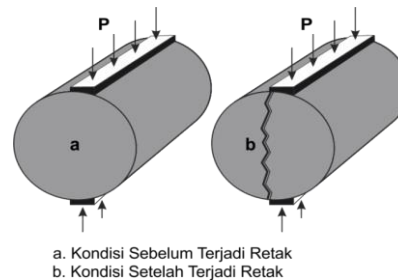
Gambar 4. Proses perendaman serat ijuk diameter 0,3 mm dengan air laut



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 x 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.



Sumber: Yoder *et al.*, 1975

Gambar 6. Ilustrasi pengujian IDT-Strength

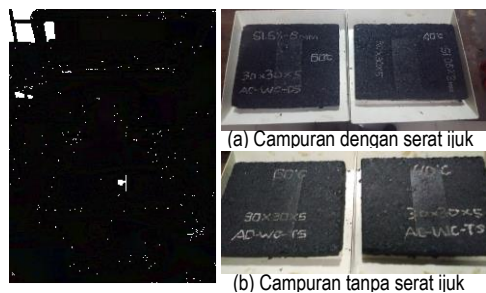
Pengujian kuat tarik tidak langsung digunakan untuk mengetahui sifat modulus kekakuan dan *passion ratio* seperti pada Gambar 7. Pengujian kuat tarik tidak langsung diuji untuk masing-masing variasi persentase dan panjang serat ijuk.



Gambar 7. Model pengujian ITS

Alat uji pengujian stabilitas dinamis dilakukan menggunakan *wheel tracking*, dimana benda uji berukuran 300 x 300 x 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

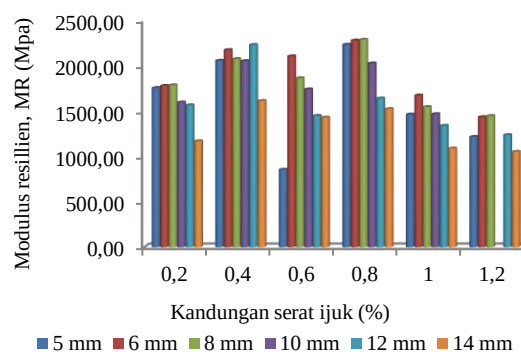
Hasil uji tarik serat tunggal

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 (Δd_h) 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 Δd_{hmaks} sebesar 1,68 mm dan *possession 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)	$\bar{\sigma}$ rata-rata (N/mm ²)	$\bar{\epsilon}$ rata-rata (%)
SI-Tr	5,91	0,07	134,71	130.45	14.24
SI-M31	10,01	0,07	141,70		
SI-M32	9,73	0,07	137,65		
SI-M33	9,34	0,07	132,12		
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

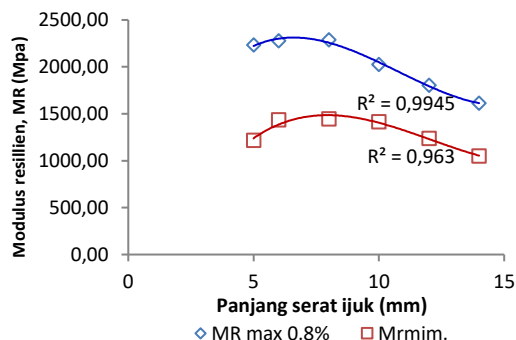
Komposisi campuran	Beban (KN)	Possion ratio (μ)	$\mu + 0.27$	Deformasi horisontal (mm)	Tinggi (mm)	Modulus kekakuan (Sm) Mpa
SI-DP-0,2%						
S1-0,2 %, L - 0,5 cm	200	0,33	0,60	1,05	65,5	1754,51
S1-0,2 %, L - 0,6 cm	222	0,34	0,61	1,10	65,5	1879,53
S1-0,2 %, L - 0,8 cm	211	0,36	0,63	1,13	65,5	1784,90
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).

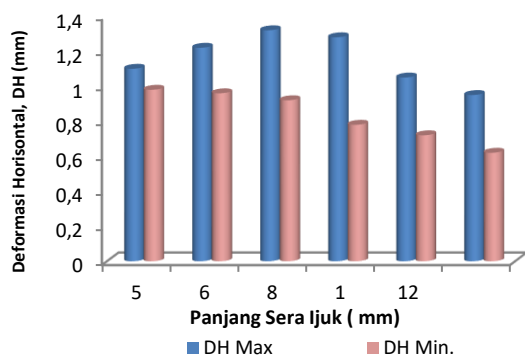
Telah dijelaskan oleh (Xue *et al.*, 2013) bahwa serat dengan ukuran yang lebih pendek akan secara

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 harizontal 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

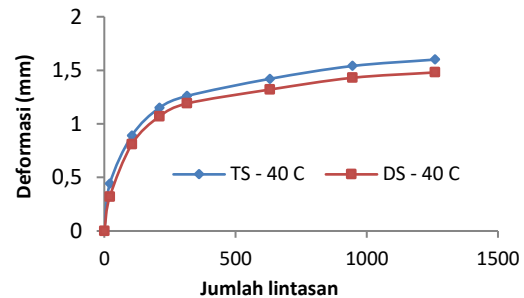
Waktu (menit)	Jumlah siklus	Deformasi (mm)	
		TS	DS
0	0	0,00	0
1	21	0,77	0,66
5	105	1,34	1,25
10	210	1,79	1,59
25	315	2,04	1,81
30	630	2,44	2,26
45	945	2,72	2,55
60	1260	2,89	2,72
Total deformasi		2,000	1,830
Stabilitas dinamis (lint/mm)		3,706	3,938
Laju deformasi (mm/menit)		0,0013	0,0107

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.

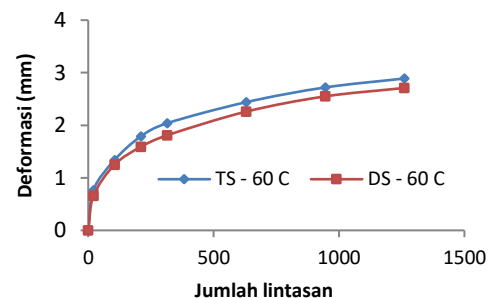
Gambar 12 dan Tabel 4 menunjukkan kedalaman *rutting* mengalami peningkatan yang cepat diawal atau pada tahap pertama baik untuk campuran beton aspal tanpa menggunakan serat ijuk (TS) maupun dengan serat ijuk (DP). Peningkatan ini terjadi pada temperatur pengujian 60°C seperti pada Tabel 4, hal ini diakibatkan 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 40°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 ($\Delta d_{maks.}$) 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 راغللا ططغض يف تدابزل فجبين قيتلفسلال قرطلا يف قيسيرلا لكاشملا نم ددختلا رهاظ غ وللا اغ ه للاغنتي يتلفغسلال كل ل قمزلالا قيرلتخملا 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.72.4.39>

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 Gyrotray 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. Witczak, Witczak, M. W., & M. W. Witczak. (1975). *Principles of Pavement Design, Second Edition*. Principles of Pavement Design, 716.

<https://www.scribd.com/document/408401339/E-J-Yoder-M-W-Witczak-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>

6. Publikasi



MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL

Published by :
Badan Kejuruan Teknik Sipil Persatuan Insinyur Indonesia dan
Badan Musyawarah Pendidikan Tinggi Teknik Sipil Seluruh Indonesia

e-ISSN : 2549 - 6778
p-ISSN : 0854 - 1809

[Home](#) [About](#) [People](#) [Submissions](#) [Issue](#) [Announcements](#) [Register](#) [Login](#)

[Home](#) > [Archives](#) > [Volume 29, Nomor 2, DESEMBER 2023](#) > [Alifuddin](#)

DOI: <https://doi.org/10.14710/mkts.v29i2.53190> [Check for updates](#)

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

Rutting Behavior and Stiffness Modulus with Palm Fiber Reinforcement in Asphalt Concrete Mixtures

[*Andi Alifuddin](#) - Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Indonesia [✉](#)
[Muhammad Ridha Kasim](#) - Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Indonesia
[Lambang Basri Said](#) - Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Indonesia

[How to cite](#) (IEEE): A. Alifuddin, M.R. Kasim, and L.B. Said, "Perilaku Rutting dan Modulus Kekakuan dengan Penguatan Serat Ijuk pada Campuran Beton Aspal," *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, vol. 29, no. 2, pp. 223-232, Jan. 2024. <https://doi.org/10.14710/mkts.v29i2.53190>

Citation Format: [IEEE](#) [Download Citation](#) [Mendeley](#) [Zotero](#)

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.
Note: This article has supplementary file(s).

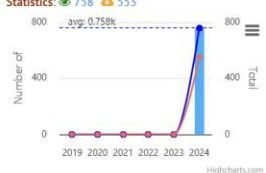
[Fulltext](#) [View](#) [Download](#) [Analysis Data](#)

Keywords: Deformation; deformation rate; flow index; palm fiber; stiffness modulus

Article Metrics: [Citations](#) [?](#)

Article Info

Section: Articles
Language: ID
In Volume: 29, Nomor 2, DESEMBER 2023
Statistics: [758](#) [553](#)



Recent articles

- > Rutting Behavior and Stiffness Modulus with Palm Fiber Reinforcement in Asphalt Concrete Mixtures
- > The Impact of Land Cover Changes on Flood Hydrograph Characteristics (Jragung dam Case Study)
- > Numerical Modeling of Claystone Slope Stability (Case Study of the Sumedang-Cirebon Road Section Km 68+750)

[More recent articles](#)

Most cited articles

- > Analisis Perbandingan Kontrak Tradisional dan Kontrak Berbasis Kinerja (KBK) Berdasarkan Risiko Persepsi Kontraktor dengan Metode

Artikel yang di Publikasi



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).

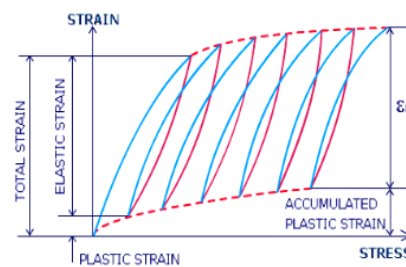
Gaya geser kemudian dapat diartikan sebagai pergeseran campuran aspal ke arah horizontal. Terdapat dua faktor utama penyebab terjadinya gaya geser. Pertama, berkaitan dengan campuran aspal yang tidak stabil, indeks plastis atau kelelahan yang terbentuk memiliki nilai yang rendah sehingga menyebabkan 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).

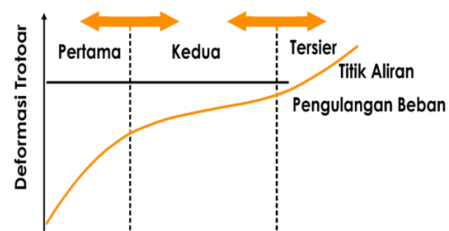
Deformasi permanen, berupa *rutting*, sering terjadi pada jalur dan area yang sering dilalui oleh roda kendaraan. *Rutting* dapat disebabkan oleh dua faktor utama. Pembebanan atau tekanan yang terlalu besar dan berulang secara terus-menerus dapat merusak lapisan bawah karena kondisi subgrade yang buruk. Kedua, *rutting* juga dapat disebabkan oleh tekanan atau pembebanan yang kemudian akan berdampak dan merusak lapisan dan struktur atas. (Adtihya *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 keelehan 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 kemampuan 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 (d1) dan 60 menit (d2) diukur dalam milimeter. Faktor koreksi peralatan (C1) dan faktor koreksi spesimen (C2) masing-masing setara dengan 1,0. Waktu pengujian pertama adalah 45 menit (t1), sedangkan waktu pengujian kedua adalah 60 menit (t2).

Modulus kekakuan dihitung dengan uji kuat tarik tidak langsung (*indirect tensile strenght*) 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 $\sigma_{\max}$ adalah tegangan tarik horisontal ditengah specimen, P adalah beban maksimum vertical yang diterapkan, dx 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.

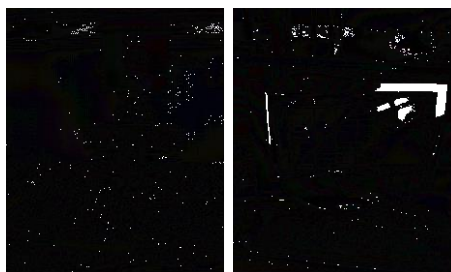


**Gambar 3. a) Serat ijuk masih menyatu
b) Serat ijuk telah dipisahkan**

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.



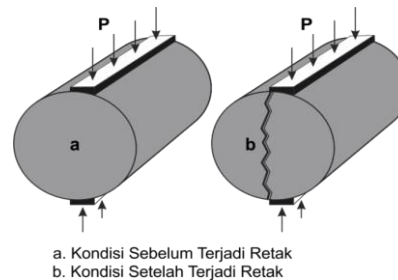
Gambar 4. Proses perendaman serat ijuk diameter 0,3 mm dengan air laut



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 x 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.



Sumber: Yoder *et al.*, 1975

Gambar 6. Ilustrasi pengujian IDT-Strength

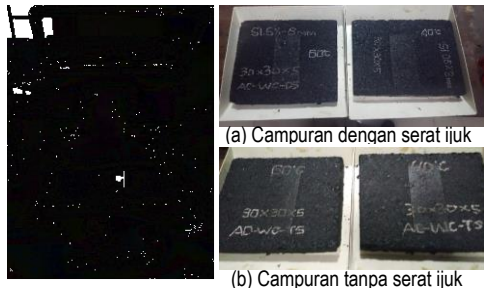
Pengujian kuat tarik tidak langsung digunakan untuk mengetahui sifat modulus kekakuan dan *passion ratio* seperti pada Gambar 7. Pengujian kuat tarik tidak langsung diuji untuk masing-masing variasi persentase dan panjang serat ijuk.



Gambar 7. Model pengujian ITS

Alat uji pengujian stabilitas dinamis dilakukan menggunakan *wheel tracking*, dimana benda uji berukuran 300 x 300 x 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

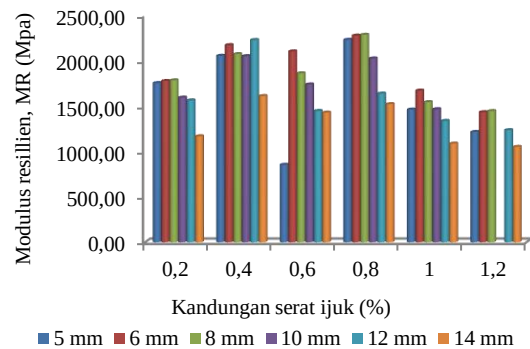
Hasil uji tarik serat tunggal

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 (Δd_h) 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 Δd_{hmaks} sebesar 1,68 mm dan *possession 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)	$\bar{\sigma}$ rata-rata (N/mm ²)	$\bar{\epsilon}$ rata-rata (%)
SI-Tr	5,91	0,07	134,71	130.45	14.24
SI-M31	10,01	0,07	141,70		
SI-M32	9,73	0,07	137,65		
SI-M33	9,34	0,07	132,12		
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

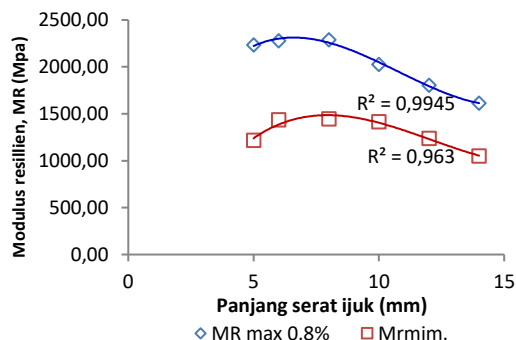
Komposisi campuran	Beban (KN)	Possion ratio (μ)	$\mu + 0.27$	Deformasi horisontal (mm)	Tinggi (mm)	Modulus kekakuan (Sm) Mpa
SI-DP-0,2%						
S1-0,2 %, L - 0,5 cm	200	0,33	0,60	1,05	65,5	1754,51
S1-0,2 %, L - 0,6 cm	222	0,34	0,61	1,10	65,5	1879,53
S1-0,2 %, L - 0,8 cm	211	0,36	0,63	1,13	65,5	1784,90
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).

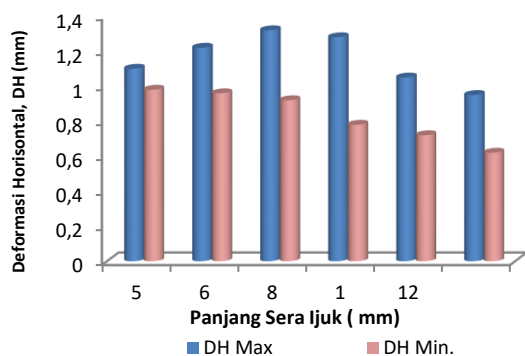
Telah dijelaskan oleh (Xue *et al.*, 2013) bahwa serat dengan ukuran yang lebih pendek akan secara

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 harizontal 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

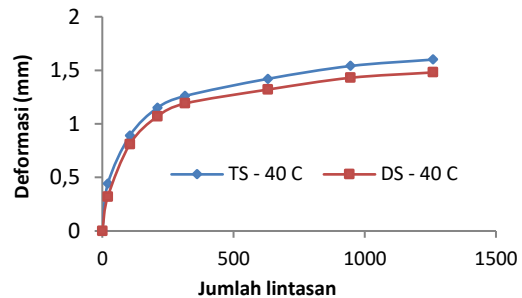
Waktu (menit)	Jumlah siklus	Deformasi (mm)	
		TS	DS
0	0	0,00	0
1	21	0,77	0,66
5	105	1,34	1,25
10	210	1,79	1,59
25	315	2,04	1,81
30	630	2,44	2,26
45	945	2,72	2,55
60	1260	2,89	2,72
Total deformasi		2,000	1,830
Stabilitas dinamis (lint/mm)		3,706	3,938
Laju deformasi (mm/menit)		0,0013	0,0107

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.

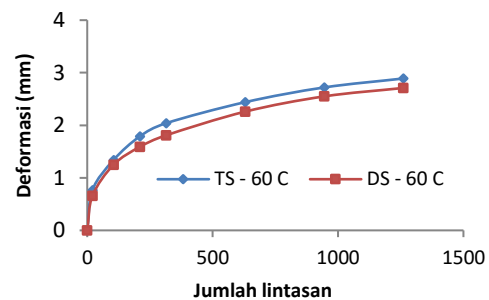
Gambar 12 dan Tabel 4 menunjukkan kedalaman *rutting* mengalami peningkatan yang cepat diawal atau pada tahap pertama baik untuk campuran beton aspal tanpa menggunakan serat ijuk (TS) maupun dengan serat ijuk (DP). Peningkatan ini terjadi pada temperatur pengujian 60°C seperti pada Tabel 4, hal ini diakibatkan 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 40°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 ($\Delta d_{maks.}$) 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 راغللا ططغض يف تدابزل تجين قيتلفسلا قرطلا يف تيسينرلا لكاشملا نم ددختلا رهاظ غ وللا ا غ ه للاغنتي يتلفغسلا كل ل قمز لا لا 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. Witczak, Witczak, M. W., & M. W. Witczak. (1975). *Principles of Pavement Design, Second Edition*. Principles of Pavement Design, 716.

<https://www.scribd.com/document/408401339/E-J-Yoder-M-W-Witczak-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>