

**ANALISIS PENGARUH PERENDAMAN OLI TERHADAP  
SIFAT FISIK DAN TRIBOLOGI KAMPAS REM BERBASIS  
CANGKANG TELUR DAN SERAT BAMBU DENGAN  
VARIASI FRAKSI VOLUME**

**Skripsi**

**Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat sarjana S1 Pada  
Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa**



Disusun Oleh:

**Muhammad Naufal Farros Aqilla  
3331210052**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA  
CILEGON–BANTEN  
2025**

## TUGAS AKHIR

### ANALISIS PENGARUH PERENDAMAN OLI TERHADAP SIFAT FISIK DAN TRIBOLOGI KAMPAS REM BERBASIS CANGKANG TELUR DAN SERAT BAMBU DENGAN VARIASI FRAKSI VOLUME

Dipersiapkan dan disusun Oleh :

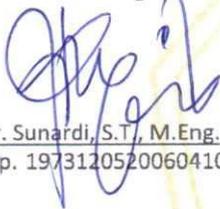
Muhammad Naufal Farros Aqilla

3331210052

telah dipertahankan di depan Dewan Penguji

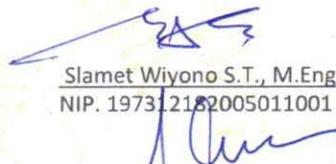
pada tanggal, 30 Juni 2025

Pembimbing Utama



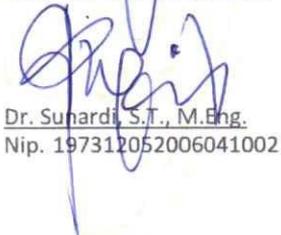
Dr. Sunardi, S.T., M.Eng.  
Nip. 197312052006041002

Anggota Dewan Penguji



Slamet Wiyono S.T., M.Eng  
NIP. 197312182005011001

Miftahul Jannah S.T., M.T.  
NIP. 199108052020122017



Dr. Sunardi, S.T., M.Eng.  
Nip. 197312052006041002

Tugas Akhir ini sudah diterima sebagai salah satu persyaratan,  
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Tanggal, 10 Juli 2025  
Ketua Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA



Ir. Dhimas Satria, ST., M.Eng  
NIP. 198305102012121006

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Muhammad Naufal Farros Aqilla

NPM : 3331210052

Judul : Analisis Pengaruh Perendaman Oli Terhadap Sifat Fisik dan Tribologi  
Kampas Rem Berbasis Cangkang Telur dan Serat Bambu dengan Variasi  
Fraksi Volume

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

### MENYATAKAN

Bahwa skripsi ini hasil karya sendiri dan tidak ada duplikat dengan karya orang lain,  
kecuali untuk yang telah disebutkan sumbernya.

Cilegon, 15 Juli 2025



Muhammad Naufal Farros Aqilla

NPM. 3331210052

## ABSTRAK

# ANALISIS PENGARUH PERENDAMAN OLI TERHADAP SIFAT FISIK DAN TRIBOLOGI KAMPAS REM BERBASIS CANGKANG TELUR DAN SERAT BAMBU DENGAN VARIASI FRAKSI VOLUME

Disusun oleh:

**Muhammad Naufal Farros Aqilla**

**3331210052**

Kampas rem merupakan salah satu komponen pada kendaraan yang berfungsi mengurangi dan menghentikan laju kendaraan. Untuk mengurangi polusi udara akibat debu dari kampas rem, maka digunakanlah material yang ramah lingkungan seperti cangkang telur dan serat bambu. Pada kampas rem dilakukan pengujian fisik dan tribologi dengan memberikan simulasi paparan oli selama 7, 14, dan 21 hari dimana pada serat bambu dan partikel cangkang telur diberikan 3 variasi fraksi volume untuk menemukan variasi terbaik. Sebelum dilakukan proses manufaktur, serat bambu diberikan perlakuan alkali 5% selama 2 jam. Digunakan mesin *cold press* dengan tekanan 5 MPa selama 75 menit dan oven untuk proses *curing* bertemperatur 150°C selama 1 jam. Proses *finishing* menggunakan amplas gerinda untuk mendapatkan permukaan yang rata dan selanjutnya spesimen direndam pada oli. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, diketahui jika spesimen FCT memiliki performa terbaik jika diukur secara keseluruhan dengan *multi response performance index*. Didapatkan densitas aktual rata-rata 1,674 g/cm<sup>3</sup>, porositas 21,835%, *oil absorption* 0,819%, koefisien gesek pada perendaman oli 7 hari sebesar 0,440, 14 hari sebesar 0,460, 21 hari sebesar 0,473, dan spesifik abrasi  $2,699 \times 10^{-6}$  mm<sup>2</sup>/kg.

**Kata Kunci :** *Cangkang Telur, Fraksi Volume, Kampas Rem, Metode Taguchi, Pengujian Fisik dan Tribologi, Serat Bambu*

## **ABSTRACT**

### ***ANALYSIS OF THE EFFECT OF OIL IMMERSION ON THE PHYSICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF BRAKE PADS BASED ON EGG SHELLS AND BAMBOO FIBERS WITH VARIATIONS IN VOLUME FRACTION***

*Compiled by:*

**Muhammad Naufal Farros Aqilla**

**3331210052**

*Brake pads are one of the components in a vehicle that function to reduce and stop the vehicle's speed. To reduce air pollution caused by dust from brake pads, environmentally friendly materials such as eggshells and bamboo fibers are used. Physical and tribological testing was conducted on the brake pads by simulating oil exposure for 7, 14, and 21 days, with bamboo fibers and eggshell particles subjected to three variations in volume fraction to determine the optimal variation. Before the manufacturing process, the bamboo fibers were treated with 5% alkali for 2 hours. A cold press machine with a pressure of 5 MPa was used for 75 minutes, followed by an oven for curing at 150°C for 1 hour. The finishing process used sandpaper to achieve a smooth surface, and the specimens were then immersed in oil. Based on the tests conducted, it was found that the FCT specimens exhibited the best overall performance when measured using the multi-response performance index. The average actual density was 1.674 g/cm<sup>3</sup>, porosity 21.835%, oil absorption of 0.819%, friction coefficient during oil immersion of 0.440 after 7 days, 0.460 after 14 days, and 0.473 after 21 days, and specific abrasiveness of  $2,699 \times 10^{-6}$  mm<sup>2</sup>/kg.*

**Keywords:** *Eggshell, Volume Fraction, Brake Pads, Taguchi Method, Physical and Tribological Testing, Bamboo Fiber*

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT berkat rahmat dan hidayah-nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Perendaman Oli Terhadap Sifat Fisik dan Tribologi Kampas Rem Berbasis Cangkang Telur dan Serat Bambu dengan Variasi Fraksi Volume”. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada segenap pihak yang telah membantu kelancaran dalam penyusunan proposal Tugas Akhir ini, khususnya kepada:

1. Bapak Ir. Dhimas Satria, ST., M.Eng, Selaku Kepala Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,
2. Bapak Prof. Dr.Eng Ir. A. Ali Alhamidi, S.T., M.T Selaku Dosen Pembimbing Akademik,
3. Bapak Dr. Sunardi S.T., M.Eng selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir atas segala ilmu, motivasi, dan semangat positif yang selalu beliau berikan sehingga studi ini dapat terselesaikan dengan baik,
4. Bapak Yusvardi Yusuf S.T., M.T selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,
5. Seluruh staf dan jajaran dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa,
6. Kedua Orang Tua dan Adik yang selalu memberikan dukungan moral, doa, kepercayaan, dan seluruh pengorbanan serta cinta tanpa syarat sehingga saya dapat menyelesaikan studi ini,
7. Teman-teman jurusan Teknik Mesin angkatan 2021 atas dukungan dan solidaritas yang menjadikan proses perkuliahan menjadi lebih berwarna dan bermakna,
8. dan Teman-teman kontrakan Markas Tapops atas dukungan, kebersamaan, dan kehangatan yang tak ternilai harganya hingga saya dapat menyelesaikan studi ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir yang telah dibuat ini masih jauh dari kata sempurna karena terbatasnya pengetahuan dan pengalaman yang dimiliki penulis. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan adanya saran dan masukan dari berbagai pihak.

Cilegon, 15 Juli 2025

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 <i>State of The Art</i> .....	5
2.2 Sistem Pengereman .....	6
2.3 Kampas Rem .....	7
2.4 Komposit .....	10
2.5 Bahan Penyusun Kampas Rem .....	10
2.5.1 Cangkang Telur .....	10
2.5.2 Serat Bambu .....	11
2.5.3 Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	12
2.5.4 Resin Epoksi.....	13
2.5.5 ZnO.....	14
2.5.6 Grafit.....	15
2.6 Kompaksi .....	16

2.7 Pengujian Komposit .....	17
2.7.1 Pengujian Fisik .....	18
2.7.2 Pengujian Tribologi .....	20
2.8 Variasi Fraksi Volume .....	23
2.9 Pemberian Perlakuan .....	23
2.9.1 Perlakuan Alkali .....	24
2.9.2 Perendaman Oli .....	24
2.9.3 <i>Curing</i> .....	25
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	26
3.2 Alat dan Bahan Penelitian .....	27
3.2.1 Alat yang Digunakan .....	28
3.2.2 Bahan yang Digunakan .....	32
3.3 Prosedur Penelitian .....	36
<b>BAB IV DATA DAN ANALISIS</b>	
4.1 Deskripsi Sampel Kampas Rem .....	42
4.2 Data Hasil Pengujian Densitas .....	43
4.3 Data Hasil Pengujian Porositas .....	45
4.4 Data Hasil Pengujian <i>Oil Absorption</i> .....	48
4.5 Data Hasil Pengujian Koefisien Gesek .....	50
4.6 Pengujian Laju Keausan .....	53
4.7 <i>Multi Response Performance Index</i> .....	55
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	58
5.2 Saran .....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Sistem pengereman.....	7
<b>Gambar 2.2</b> Kampas rem.....	8
<b>Gambar 2.3</b> Cangkang telur dan partikel cangkang telur .....	11
<b>Gambar 2.4</b> Serat bambu .....	12
<b>Gambar 2.5</b> Serbuk alumina .....	13
<b>Gambar 2.6</b> Resin epoksi.....	13
<b>Gambar 2.7</b> ZnO.....	15
<b>Gambar 2.8</b> Grafit.....	16
<b>Gambar 2.9</b> Jenis-jenis kompaksi.....	17
<b>Gambar 2.10</b> Proses pemadatan serbuk.....	17
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian kampas rem.....	27
<b>Gambar 3.2</b> Saringan mesh 120.....	28
<b>Gambar 3.3</b> Neraca digital.....	28
<b>Gambar 3.4</b> Cetakan .....	29
<b>Gambar 3.5</b> Penggaris.....	29
<b>Gambar 3.6</b> Oven.....	30
<b>Gambar 3.7</b> Mesin <i>cold press</i> .....	30
<b>Gambar 3.8</b> <i>Thermocouple</i> .....	31
<b>Gambar 3.9</b> Amplas gerinda.....	31
<b>Gambar 3.10</b> Instrument pengukuran koefisien gesek.....	32
<b>Gambar 3.11</b> <i>Ogoshi high speed universal wear testing machine</i> .....	32
<b>Gambar 3.12</b> Aquades dan soda api .....	33
<b>Gambar 3.13</b> Cangkang telur.....	33
<b>Gambar 3.14</b> Serat bambu .....	34
<b>Gambar 3.15</b> ZnO.....	34
<b>Gambar 3.16</b> Resin epoksi.....	34
<b>Gambar 3.17</b> <i>Alumina powder</i> .....	35
<b>Gambar 3.18</b> <i>Graphite powder</i> .....	35

<b>Gambar 3.19</b> Silikon.....	36
<b>Gambar 3.20</b> Pelumas oli motor .....	36
<b>Gambar 4.1</b> Bentuk spesimen kampas rem .....	42
<b>Gambar 4.2</b> Perbandingan densitas teoritis dengan densitas aktual .....	44
<b>Gambar 4.3</b> Data porositas komposit kampas rem .....	46
<b>Gambar 4.4</b> Data <i>oil absorption</i> kampas rem.....	48
<b>Gambar 4.5</b> Data hasil pengujian koefisien gesek.....	51
<b>Gambar 4.6</b> Laju keausan kampas rem.....	54
<b>Gambar 4.7</b> <i>Multi response performance index</i> spesimen kampas rem.....	56

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Kode untuk standar SAE J661.....	8
<b>Tabel 2.2</b> Standar ukuran lebar dan tebal kampas rem.....	9
<b>Tabel 2.3</b> Spesifikasi matriks epoksi.....	14
<b>Tabel 2.4</b> Nilai koefisien gesek dan toleransi.....	22
<b>Tabel 3.1</b> Nilai densitas bahan penyusun kampas rem.....	37
<b>Tabel 3.2</b> Komposisi setiap spesimen (gram) .....	37
<b>Tabel 4.1</b> Kode spesimen kampas rem.....	43
<b>Tabel 4.2</b> Densitas teoritis setiap fraksi volume.....	43
<b>Tabel 4.3</b> Densitas aktual setiap fraksi volume .....	44
<b>Tabel 4.4</b> Data porositas komposit kampas rem.....	45
<b>Tabel 4.5</b> Data <i>oil absorption</i> kampas rem .....	48
<b>Tabel 4.6</b> Data koefisien gesek kampas rem .....	50
<b>Tabel 4.7</b> Data laju keausan kampas rem .....	53
<b>Tabel 4.8</b> <i>Multi response performance index</i> komposit kampas rem.....	56

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Rem merupakan komponen pada kendaraan yang berfungsi untuk mendisipasi energi gerak kendaraan sehingga laju kendaraan tersebut berkurang [1]. Pada sistem kerja pengereman terjadi perubahan energi dari energi kinetik menjadi energi panas. Perubahan energi tersebut terjadi karena kontak gesekan antara cakram rem dengan kampas rem. Seiring waktu, kampas rem akan mengalami keausan akibat gesekan secara terus-menerus. Maka dari itu material dari kampas rem harus memiliki sifat bahan yang tahan terhadap gesekan dan temperatur tinggi sehingga tidak meleleh atau berubah bentuk ketika sistem pengereman sedang bekerja. Material yang tahan terhadap gesekan umumnya berasal dari gabungan beberapa bahan yang diberikan perlakuan tertentu dalam proses pembentukannya [2]. Gabungan beberapa bahan ini dinamakan sebagai komposit. Komposit ini membentuk material baru sehingga material ini memiliki keunggulan sifat dibandingkan dengan bahan penyusunnya.

Kombinasi antara cangkang telur dan serat bambu merupakan inovasi baru yang masih dikembangkan. Kedua bahan ini merupakan limbah alami yang jumlahnya sangat berlimpah dan dapat ditemukan dengan mudah. Pada bahan penyusun kampas rem, cangkang telur digunakan sebagai bahan pengisi yang berfungsi menambah volume dan meningkatkan kekakuan tanpa memberikan berat yang signifikan. Selain itu cangkang telur dapat mengurangi tingkat penyerapan cairan dan meningkatkan stabilitas dimensi. Sedangkan untuk serat bambu digunakan sebagai bahan serat yang berfungsi untuk meningkatkan koefisien gesek dan kekuatan mekanik bahan [3]. Berdasarkan karakteristiknya serta penelitian terdahulu yang telah dilakukan, kedua bahan ini berpotensi sebagai alternatif dalam pembuatan kampas rem. Namun untuk memastikannya, perlu dilakukan pengujian lebih lanjut agar diketahui karakteristiknya dengan tepat.

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini merupakan pengujian fisik dan tribologi yang bertujuan untuk mengetahui keterkaitan antara karakteristik fisik material dengan performa gesek dan keausan. Beberapa pengujian fisik dilakukan seperti pengukuran densitas untuk mengetahui kepadatan dari spesimen. Data densitas akan menunjukkan tingkat porositas yang akan berpengaruh terhadap *oil absorption*-nya. Dari pengujian *oil absorption* akan diketahui kemampuan material dalam menyerap oli. Selanjutnya beberapa pengujian tribologi dilakukan seperti pengujian koefisien gesek untuk merepresentasikan besarnya gaya gesek relatif terhadap gaya normal yang bekerja pada permukaan kontak. Pengujian ini dilakukan untuk melihat daya cengkram kampas rem terhadap piringan rem. Sedangkan untuk pengujian laju keausan dilakukan dengan mengukur tingkat keausan kampas rem terhadap gesekan. Prosedurnya dilakukan dengan menghitung lebar keausan dari sebuah spesimen [4]. Semakin rendah nilai laju keausan yang didapatkan, maka penggunaan kampas rem akan lebih tahan lama. Umumnya nilai koefisien gesek dan laju keausan dapat mengalami perubahan karena berbagai faktor lingkungan. Kondisi seperti suhu ekstrim, kelembaban, dan keberadaan zat asing seperti oli dapat mempengaruhi performa kampas rem.

Dalam kondisi aktual, terkadang kampas rem ini sering bersinggungan dengan zat asing seperti oli. Sebagaimana kita ketahui, oli sendiri merupakan pelumas yang digunakan untuk mengurangi gesekan pada mesin [5]. Namun ketika oli bersinggungan dengan kampas rem, maka sifat pelumasannya akan menyebabkan gaya gesek antara kampas rem dan cakram berkurang sehingga daya cengkram rem menurun. Hal tersebut akan mengurangi performa kinerja kampas rem dimana kondisi tersebut dapat membahayakan keselamatan. Selain itu, reaksi zat kimia antara oli dengan bahan kampas rem dapat menyebabkan degradasi kimia. Reaksi kimia tersebut dapat melemahkan ikatan antar molekul dalam material kampas rem sehingga mengurangi sifat ketahanan terhadap keausan. Berdasarkan kondisi yang telah dijelaskan, maka perlu dilakukan pengujian tribologi untuk mengetahui pengaruh dari paparan oli terhadap nilai koefisien gesek dan laju keausannya.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Untuk memberikan fokus yang lebih spesifik dan terarah dalam penelitian ini, beberapa pertanyaan permasalahan utama telah dirumuskan sebagai acuan penelitian. Beberapa pertanyaan tersebut sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi fraksi volume antara partikel cangkang telur dan serat bambu terhadap sifat fisik komposit kampas rem?
2. Bagaimana pengaruh dari variasi fraksi volume partikel antara cangkang telur dengan serat bambu dan lama perendaman oli terhadap koefisien gesek statis kampas rem?
3. Bagaimana nilai laju keausan kampas rem setelah dilakukan perendaman pada oli selama 21 hari?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini dilakukan sebagai upaya pengembangan material kampas rem yang ramah lingkungan dengan tujuan-tujuan berikut sebagai dasar penelitian.

1. Menganalisis pengaruh variasi fraksi volume antara cangkang telur dan serat bambu terhadap sifat fisik komposit kampas rem.
2. Menganalisis pengaruh dari variasi fraksi volume cangkang telur dan serbuk bambu serta variasi lama perendaman oli terhadap koefisien gesek statis komposit kampas rem.
3. Menganalisis nilai laju keausan pada setiap kampas rem setelah dilakukan perendaman oli selama 21 hari.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Berdasarkan tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini, diharapkan penelitian ini dapat memberikan manfaat pada bidang material dan otomotif, baik dalam pengembangan teknologi maupun peningkatan performa komponen kendaraan. Adapun beberapa manfaat penelitian terkait kampas rem yaitu sebagai berikut.

1. Sebagai inovasi material ramah lingkungan menggunakan limbah dari bahan-bahan sisa seperti cangkang telur dan serat bambu sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan sintesis dan *non-renewable*.
2. Berkontribusi dalam pengembangan lebih lanjut dalam bidang teknik material dan ilmu tribologi.
3. Mampu mengurangi biaya produksi dengan memanfaatkan limbah yang lebih murah dan mudah didapatkan.

### **1.5 Batasan Masalah**

Agar ruang lingkup yang dibahas tidak terlalu meluas, maka penulis membatasi masalah pada laporan penelitian ini yaitu.

1. Jenis cangkang telur yang digunakan sebagai *filler* merupakan cangkang telur ayam.
2. Lama waktu perendaman spesimen kampas rem pada oli selama 7 hari, 14 hari, dan 21 hari.
3. Jenis pengujian yang dilakukan yaitu pengujian tribologi yaitu uji koefisien gesek dan laju keausan. Sedangkan untuk pengujian fisiknya yaitu uji densitas, porositas, dan *oil absorption*.
4. Komposisi bahan pengikat yaitu alumina sebesar 10%, resin epoksi 50%, ZnO 5%, dan grafit 10%.
5. Digunakan 3 Variasi fraksi volume cangkang telur dengan serbuk bambu yakni 25%-0%, 12,5%-12,5%, dan 0%-25%.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 *State of The Art***

*State of the art* merupakan rancangan penelitian secara detail dan memiliki keunikan dibandingkan penelitian terdahulu. Dengan adanya *state of the art* ini, penelitian yang dibuat akan berbeda dengan penelitian sebelumnya. Penelitian sebelumnya digunakan sebagai bahan analisis serta menambah pengetahuan guna penelitian serta untuk membedakan dengan penelitian yang telah atau sedang dilakukan. Beberapa referensi penelitian sebelumnya berasal dari jurnal-jurnal dan beberapa sumber yang berkaitan dengan penelitian ini.

Fraksi volume dari serat bambu dapat mempengaruhi nilai laju keausan pada kondisi kering maupun pada kondisi basah. Berdasarkan studi Purbooputro [6] menyatakan jika kampas rem dengan komposisi serat bambu 30%, *fiber glass* 15%, aluminium 15%, dan polyester 40% memiliki nilai keausan terendah dengan nilai sebesar 0,00041 mm<sup>2</sup>/kg dimana pengujian dilakukan dengan metode Ogoshi ketika kampas rem dalam kondisi kering. Sedangkan untuk kondisi basah setelah dilakukan perendaman dengan oli, didapatkan kembali nilai keausan terendah pada komposisi yang sama dengan kondisi kering yaitu sebesar 0,0003 mm<sup>2</sup>/kg. Kedua nilai tersebut masih lebih tinggi dibandingkan dengan nilai keausan kampas rem yang umum ditemukan yaitu sebesar 0,00014 mm<sup>2</sup>/kg.

Selanjutnya ukuran partikel dari serbuk bambu dapat mempengaruhi sifat mekanis komposit yaitu kampas rem. Lusiani et al [7] dalam studinya menyatakan jika semakin tinggi mesh maka nilai spesifik abrasif akan semakin rendah. Didapatkan ukuran mesh terbaik yaitu 80 dengan hasil spesifik abrasif sebesar 3,23 (mm<sup>3</sup>/mm) × 10<sup>-6</sup> dimana untuk pengujian keausan dilakukan dengan metode *pin on disc* (ASTM G99) dengan mesin uji Ogoshi. Lalu untuk koefisien gesek didapatkan hasil terbaik pada ukuran mesh 40 dengan nilai koefisien gesek 0,54. Hal tersebut dapat terjadi karena kekasaran permukaan pada sample dengan ukuran mesh 40 lebih kasar dibandingkan yang lainnya.

Maka dapat disimpulkan bahwa sampel kampas rem terbaik yaitu pada ukuran mesh 80.

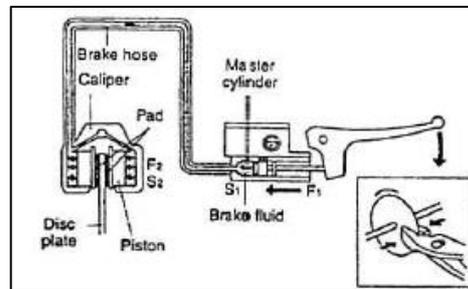
Lalu untuk komposisi kalsium karbonat yang berasal dari cangkang telur ini dapat mempengaruhi kekerasan dan keausan dari *pad* pelapis rem *brass-epoxy*. Hasil pengujian yang dilakukan Nugroho [8] menunjukkan jika semakin tinggi penggunaan kalsium karbonat dalam bahan campuran kampas rem maka akan membuat harga laju keausan semakin besar dimana untuk pengujiannya dilakukan menggunakan metode Ogoshi dengan standar ASTM G99-95. Pada kadar kalsium karbonat 40% didapatkan harga laju keausan sebesar  $0,352 \text{ mm}^2/\text{kg}$ . Sedangkan dengan kadar 30% kalsium karbonat, didapatkan harga laju keausan sebesar  $0,0181 \text{ mm}^2/\text{kg}$ . Sedangkan pada kondisi basah hasil yang didapatkan berbanding terbalik. Pada kadar 40% kalsium karbonat memiliki nilai laju keausan terendah dan pada kadar 20% kalsium karbonat memiliki nilai laju keausan tertinggi.

Kemudian komposisi dari *filler* berpengaruh terhadap sifat tribologi dari kampas rem. Dari pengujian yang dilakukan Alhallaj [9], didapatkan hasil yaitu semakin besar kandungan serbuk cangkang kelapa sawit pada kampas rem maka nilai koefisien gesek akan semakin tinggi. Pada kandungan serbuk cangkang kelapa sawit sebesar 20% dan kandungan serat bambu 5% nilai koefisien geseknya sebesar 0,4920. Sedangkan pada kandungan cangkang kelapa sawit sebesar 5% dan serat bambu 20% nilai koefisien geseknya sebesar 0,4503. Lalu untuk pengujian laju keausan menggunakan mesin uji Ogoshi didapatkan hasil yang menunjukkan sampel dengan kandungan serat bambu 20% dan cangkang kelapa sawit 5% memiliki nilai laju keausan terbaik yaitu sebesar  $4,7288 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Sedangkan pada kandungan serat bambu sebesar 5% dan cangkang kelapa sawit 20% memiliki nilai laju keausan yang cukup tinggi yaitu sebesar  $10,8275 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ .

## 2.2 Sistem Pengereman

Pada sebuah kendaraan, salah satu elemen mesin yang cukup penting untuk mengontrol, menurunkan, dan menghentikan putaran roda adalah rem. Alat ini digunakan untuk mereduksi energi gerak suatu kendaraan agar laju

kecepatannya berkurang hingga kendaraan tersebut berhenti. Prinsip kerja dari rem yaitu dengan mengubah energi kinetik menjadi panas karena gesekan antara kampas rem (*brake pad*) dengan piringan (*disc*). Karena gaya gesek tersebut, maka temperaturnya akan meningkat, menimbulkan keausan, getaran, dan bunyi yang mungkin dapat mengganggu kenyamanan pengendara [10]. Gambar dari sistem pengereman kendaraan ditunjukkan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Sistem pengereman [2]

Pada umumnya cakram terdiri dari piringan yang terbuat dari material logam. Kampas rem akan menjepit piringan logam karena dorongan dari sebuah torak yang terdapat di dalam silinder roda. Dibutuhkan tenaga yang cukup besar untuk menjepit piringan ini. Oleh sebab itu, pada rem cakram digunakan sistem hidraulik agar tenaga yang dibutuhkan cukup [11]. Pada suatu sistem pengereman terdapat beberapa komponen yang saling berkaitan untuk dapat menciptakan gaya gesek sehingga dapat mengurangi kecepatan dari kendaraannya ataupun menghentikannya.

### 2.3 Kampas Rem

Salah satu komponen yang terdapat dalam sistem pengereman adalah kampas rem. Komponen ini bertugas untuk melambatkan dan menghentikan laju kendaraan. Beban kerja pada kampas rem lebih tinggi 90% dibandingkan dengan komponen lainnya [12]. Maka dari itu sifat tahan terhadap temperatur tinggi harus dimiliki oleh material kampas rem. Pada umumnya bahan friksi kampas rem ini terdiri dari 5 penyusun bahan yaitu bahan pengisi, bahan pengikat, pelumas padat, pemodifikasian gesekan, dan bahan serat. Bahan pengisi bertugas untuk mengisi ruang kosong pada komposisi kampas rem dan meningkatkan volume. Bahan pengisi yang biasa digunakan yaitu berupa

serbuk organik dan serbuk mineral. Lalu untuk bahan pengikat bertugas untuk mengikat zat penyusun yang ada di dalam friksi yang membentuk matriks pada temperatur relatif stabil. Untuk pelumas padat berfungsi melindungi permukaan dengan menghasilkan lapisan tipis di temperatur yang tinggi. Digunakan pemodifikasi gesekan untuk meningkatkan gesekan dan menurunkan keausan. Dan untuk bahan serat digunakan agar kekuatan mekanik bahan dan koefisien gesek kampas rem meningkat [13]. Ilustrasi kampas rem dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Kampas rem [14]

SAE J661 merupakan standar internasional yang menjadi acuan untuk menguji karakteristik gesekan dan keausan dari pelapis rem. Standar ini memberikan prosedur pengujian untuk mengetahui karakteristik gesekan dan keausan rem. Pengujian memiliki beberapa tahapan seperti pengukuran koefisien gesek di temperatur normal dan tinggi serta mengukur keausan material. Adapun tabel kode untuk nilai koefisien gesek ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Kode untuk standar SAE J661 [15]

No	Code letter	Koefisien gesek
1	C	$\mu < 0,15$
2	D	$0,15 < \mu < 0,25$
3	E	$0,25 < \mu < 0,35$
4	F	$0,35 < \mu < 0,45$
5	G	$0,45 < \mu < 0,55$
6	H	$\mu > 0,55$
7	Z	<i>Unclassified</i>



## 2.4 Komposit

Gabungan material, baik dua material ataupun lebih disebut sebagai komposit. Tujuan dibuatnya komposit ini yaitu untuk mendapatkan sifat dari setiap material tersebut. Kelebihan dari komposit ini memiliki bobot yang cukup ringan, kekakuan yang tinggi, dan lebih tahan lama. Kekurangan dari komposit ini akan menciptakan masalah bagi lingkungan disebabkan karena alam akan sulit mendegradasinya. Komposit terbentuk dari dua unsur yaitu *filler* atau penguat dan matriks [16]. *Filler* pada komposit berguna untuk menahan beban. Maka dari itu kekuatan komposit ditentukan dari kekuatan serat pembentuknya. Semakin kecil diameter serat hingga mendekati struktur kristal, maka akan semakin meningkat kekuatannya karena cacat hanya sedikit. Penggunaan serat ini akan menguatkan komposit dan sifat mekaniknya akan meningkat seperti kekakuan, ketangguhan, dan lebih kokoh. Selain itu dengan penggunaan serat ini menghemat pemakaian resin. Kemudian untuk matriks merupakan fasa pada komposit dengan fraksi volume yang dominan. Pada umumnya matriks ini memiliki sifat ulet dengan kekuatan dan rigiditasnya rendah. Matriks sendiri bertugas meneruskan tegangan ke serat, membentuk ikatan koheren permukaan, melindungi, dan memisahkan serat [17].

## 2.5 Bahan Penyusun Kampas Rem

Dalam pembuatan kampas rem, terdiri dari beberapa bahan yang memiliki peran penting agar kampas rem dapat bekerja secara optimal. Pemilihan bahan ini disesuaikan agar performa yang dimiliki kampas rem dapat bekerja dengan baik dalam kondisi apapun. Berikut ini merupakan beberapa bahan yang digunakan dalam pembuatan kampas rem.

### 2.5.1 Cangkang Telur

Bagian terluar dari sebuah telur yang kaya akan kandungan protein dan kalsium adalah cangkang telur. Pada cangkang telur ini memiliki komposisi yang 1,6%-nya adalah air dan 98,4% adalah bahan kering. Dari keseluruhan bahan kering tersebut, 95,1% terkandung unsur mineral dan 3,3% protein. Kandungan mineral pada cangkang telur ini mencakup kristal kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) 98,34%, magnesium karbonat ( $\text{MgCO}_3$ )

0,84%, dan kalsium fosfat  $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$  0,75% [18]. Bentuk dari cangkang telur dapat dilihat pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Cangkang telur dan partikel cangkang telur [19]

Hampir keseluruhan kandungan dari cangkang telur ini berupa kalsium karbonat. Kalsium karbonat merupakan mineral inorganik yang dapat diperoleh dengan harga cukup murah dimana dapat meningkatkan kekerasan, mengontrol laju keausan, dan memberikan stabilitas temperatur. Kalsium karbonat pada cangkang telur dapat dihasilkan dengan 2 metode yaitu kalsinasi dengan hasil berupa serbuk abu dan pengeringan dengan hasil berupa serbuk tepung. Sifat fisik dari kalsium karbonat seperti morfologi, fase, ukuran, dan distribusi ukuran perlu dimodifikasi menurut bidang pengaplikasiannya. Untuk bentuk morfologi dan fase dari kalsium karbonat ini berkaitan dengan kondisi sintesis seperti konsentrasi reaktan, temperatur, zat aditif alam, dan waktu *aging* [20].

### 2.5.2 Serat Bambu

Jenis bambu yang umum digunakan sebagai bahan penyusun kampas rem adalah bambu apus (*Gigantochloa asper*). Bambu ini memiliki batang yang lebih kecil dibandingkan bambu lainnya dengan diameter sekitar 6-10 cm. Dalam pembuatan kampas rem, limbah bambu yang digunakan berupa serat. Serat bambu banyak digunakan dalam pengaplikasian ilmu teknik sebagai penguat. Serat bambu mempunyai struktur alami yang kompleks dengan sifat mekanis yang baik. Selain itu berdasarkan pengujian serat bambu memiliki nilai koefisien gesek dan laju keausan lebih baik dibandingkan dengan serat sabut kelapa [21]. Namun serat bambu ini memiliki keterbatasan seperti penyerapan airnya

yang cukup tinggi, daya tahan yang buruk, dan mudah korosi. Gambar 2.4 menunjukkan bentuk dari serat bambu.



**Gambar 2.4** Serat bambu

Pada serat bambu terkandung selulosa yang dapat mempengaruhi kuat tarik, lalu yang kedua mengandung hemiselulosa dengan tingkat polimerisasi rendah, dan yang ketiga mengandung lignin [22]. Dalam produksi seratnya, lignin akan dihilangkan dan di dekomposisi. Untuk menghilangkannya digunakan metode dengan melarutkannya pada NaOH. Namun ini akan berdampak buruk bagi nilai modulus tarik dan kekuatan tariknya. Kemudian diketahui jika panjang serat mempengaruhi sifat mekanik dan *biodegradable* komposit berpati talas. Hasil menunjukkan nilai kuat tarik tertinggi didapatkan saat panjang serat 12 mm dan nilai regangan tertinggi yaitu saat menggunakan serat sepanjang 9 mm [23]. Adapun metode yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kekuatan tarik dari komposit yaitu dengan memberikannya perlakuan alkali dan menggabungkan dua jenis serat.

### **2.5.3 Alumina ( $Al_2O_3$ )**

Dalam beberapa pengaplikasian peralatan teknik, alumina ini banyak digunakan karena sifat fisika dan kimianya yang tinggi seperti dapat menahan temperatur tinggi, dapat menahan kejutan, kekuatan tekan tinggi, isolasi elektrik yang baik dan ketahanan terhadap korosi serta abrasi. Material ini umumnya memiliki warna putih dengan densitas  $3,95 \text{ g/cm}^3$ . Titik leburnya berada pada temperatur  $2072^\circ\text{C}$ . Sedangkan untuk titik didihnya berada pada temperatur  $2977^\circ\text{C}$ . Bentuk dari serbuk alumina dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Serbuk alumina

Dalam pembuatan kanvas rem, bahan alumina ini berfungsi sebagai *filler* dimana pada sebuah penelitian menunjukkan komposisi alumina yang baik pada kanvas rem ini sebanyak 5% fraksi volume. Hasil dari penelitian menunjukkan kanvas rem yang tidak menggunakan alumina dalam pembuatannya memiliki nilai laju keausan dan kekerasannya sangat buruk. Sedangkan jika kandungan alumina ini terlalu tinggi maka nilai kekerasannya akan menurun dan laju keausannya meningkat [24].

#### 2.5.4 Resin Epoksi

Salah satu jenis resin *thermosetting* terbaik adalah epoksi. Resin *thermosetting* ini merupakan sebuah polimer dimana ketika diberikan suhu tinggi akan terjadi pengerasan dan tidak dapat dibentuk kembali. Karena bersifat reaktif, matriks ini banyak digunakan oleh industri komposit. Matriks ini mudah untuk menyatu dengan serat menjadi bentuk kompleks yang mempunyai kekuatan yang tinggi dan kekakuan yang tinggi. Selain itu resin epoksi ini diketahui memiliki ketahanan yang baik terhadap bahan kimia dan kelembaban. Gambar dari resin epoksi dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Resin epoksi

Resin epoksi *ini* merupakan sebuah material dengan yang berbentuk cairan. Resin ini banyak digunakan dalam aplikasi komposit karena memiliki banyak keunggulan seperti memiliki sifat thermal dan mekanik yang baik, memiliki ketahanan terhadap air, usia penggunaan yang relatif lebih panjang, dan tahan temperatur hingga 220°C. Jika resin epoksi ini ditambahkan sebuah hardener atau katalis, maka mampu memadat dan stabil. Resin ini banyak digunakan dalam berbagai jenis pengaplikasian komposit seperti pada interior pesawat terbang. Resin epoksi tidak dapat dibentuk kembali setelah terpolimerisasi dikarenakan molekulnya sulit mengurai walaupun dipanaskan kembali [25]. Untuk mengetahui sifat dari matriks epoksi ini, maka akan dijabarkan pada Tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Spesifikasi matriks epoksi [26]

Sifat-sifat	Satuan	Nilai tipikal
Densitas	gr/cm <sup>3</sup>	1,17
<i>Water absorption</i> (suhu ruangan)	°C	0,2
<i>Tensile strength</i>	kgf/mm <sup>2</sup>	5,95
<i>Compressive strength</i>	kgf/mm <sup>2</sup>	14
<i>Flexural strength</i>	kgf/mm <sup>2</sup>	12
Temperatur pencetakan	°C	90

### 2.5.5 ZnO

Zinc oxide merupakan sebuah material keramik semikonduktor dengan senyawa II-VI bercelah pita langsung (*direct band gap*) dengan lebar 3,3 eV. ZnO memiliki titik lebur hingga 1975°C dimana sebelum mencapai titik leburnya, ZnO ini akan mengalami dekomposisi. Untuk bentuknya sendiri umumnya ZnO ini berupa serbuk berwarna putih yang hampir tidak terlarut oleh air, namun akan larut oleh asam dan basa. Material ini memiliki sifat *piezoelektrik* akibat dari struktur kristal yang disebut sebagai struktur kristal *wurtzite* heksagonal dengan nilai parameter kisi  $a = 3,249 \text{ \AA}$  dan  $c = 5,206 \text{ \AA}$ . Sifat fisik struktur nano ZnO ini dapat menyusut secara bertahap hingga skala nanometer dan terkadang dapat lebih kecil lagi sehingga sifat fisiknya mengalami perubahan yang dikenal sebagai efek ukuran quantum. Efek ukuran quantum mengacu pada perubahan sifat fisik dan kimia material saat

dimensinya mendekati ukuran nanometer yang dapat mempengaruhi kekuatan material [27]. Gambar ZnO ditunjukkan pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7 ZnO**

Dalam dunia industri, ZnO ini dikembangkan karena beberapa keunggulan seperti anti jamur dan bakteri, tidak beracun, memiliki filter UV, fotokimia, dan aktivitas katalitik yang tinggi. Selain itu ZnO ini cukup efektif dalam menghambat pertumbuhan bakteri disebabkan karena ukuran partikelnya yang sangat kecil. ZnO ini banyak diaplikasikan dalam pembuatan komposit sebagai antibakteri. Pada komposit sendiri, penggunaan ZnO ini berfungsi sebagai penguat yang mampu meningkatkan sifat mekanik komposit. Selain itu penggunaan ZnO ini dapat menciptakan material komposit yang tidak terkontaminasi bakteri sehingga cukup steril. Pada penelitian [28] menunjukkan pada penggunaan ZnO sebanyak 5% mendapat nilai kekuatan tarik tertinggi yaitu 16 Mpa. Penggunaan ZnO pada 7,5% menunjukkan nilai kekuatan tarik yang semakin menurun disebabkan karena polyester tidak dapat menyelimuti partikel zinc oxide.

### **2.5.6 Grafit**

Grafit merupakan material dengan bentuk kristal yang merupakan turunan karbon. Material ini merupakan bahan tambang yang tidak dapat diperbaharui. Grafit tersusun atas lapisan atom karbon yang dapat menggelincir dengan mudah [2]. Susunan atomnya membentuk heksagonal berlapis. Gambar grafit ditunjukkan pada Gambar 2.8.

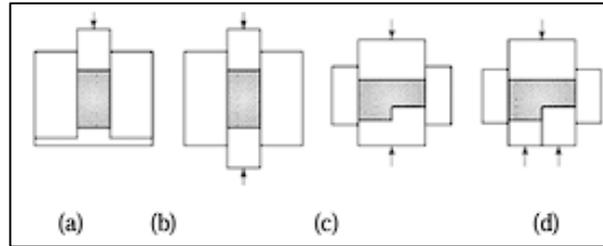


**Gambar 2.8** Grafit

Grafit dikenal tidak beracun, tidak mudah dehidrasi, dan mempunyai stabilitas kimia yang cukup baik di berbagai temperatur. Dalam pembuatan komponen rem, grafit ini merupakan material gesek. Grafit berfungsi sebagai penguat ikatan bahan kampas dan pelumas. Pada sebuah penelitian, didapatkan hasil yaitu semakin banyak kandungan grafit pada sebuah komposit, maka kekerasannya akan semakin meningkat [29]. Selain itu penggunaan grafit pada polimer dapat meningkatkan konduktivitas termal, mengurangi degradasi akibat radiasi UV, dan meningkatkan insulasi pada busa dan papan.

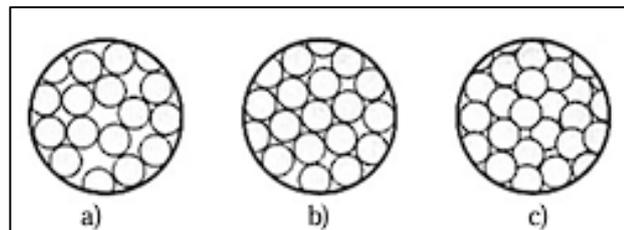
## 2.6 Kompaksi

Pada pembuatan kampas rem, dilakukan tahap kompaksi. Pada proses kompaksi ini serbuk dari material dimampatkan pada *dies* atau cetakan dengan memberikannya gaya tekan dari mesin kompaksi. Proses pemampatan ini dilakukan dengan mesin yang memberikan gaya penekanan secara uniaksial. Dari proses tersebut serbuk tersebut akan bercampur dan rongga udara yang berada diantara partikel akan keluar. Besarnya gaya tekan tersebut disesuaikan dengan ketentuan dari proses pembentukan tersebut. Selain itu kompaksi ini dilakukan agar pada spesimen benda uji tersebut didapatkan *green body* akibat dari pencampuran zat homogen tersebut [30]. Ilustrasi jenis-jenis dari kompaksi ditunjukkan pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Jenis-jenis kompaksi [31]

Dari gambar diatas, untuk gambar (a) menunjukkan tipe *single punch*. Lalu untuk gambar (b) dan (c) merupakan tipe *double punches*. Dan untuk gambar (d) merupakan tipe *multiple punches*. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kinerja dari kompaksi ini diantaranya seperti ukuran dan bentuk dari partikel, susunan partikel, dan distribusi ukuran. Ketika awal pembentukan, serbuk material ini mempunyai densitas yang sama dengan densitas serbuk lepas. Namun ketika tekanan dilakukan, respon pertama kali yaitu penyusunan ulang partikel. Pori-pori yang besar dan berongga akan terisi oleh serbuk sehingga didapatkan kepadatan yang tinggi. Pada Gambar 2.10 ditunjukkan proses pembentukan kepadatan serbuk [31].



**Gambar 2.10** Proses pepadatan serbuk [31]

## 2.7 Pengujian Komposit

Untuk mengetahui kualitas, kinerja, serta keandalan dari sebuah komposit perlu dilakukan sebuah pengujian. Dengan pengujian tersebut maka dapat memastikan bahwa kombinasi material tersebut dapat memberikan kinerja yang lebih unggul. Hasil dari pengujian dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi kelemahan material dan mendukung inovasi pengembangan material yang berkualitas. Pengujian mekanis terbagi menjadi beberapa jenis seperti pengujian mekanis, thermal, tribologi, dan fisik. Standar seperti ASTM, SNI,

dan ISO menjadi pedoman untuk memastikan jika metode pengujian dan hasil yang didapatkan sesuai dengan persyaratan yang berlaku.

### 2.7.1 Pengujian Fisik

Untuk menguji dan mengevaluasi sifat fisik sebuah material komposit dapat dilakukan dengan pengujian fisik. Pengujian ini tidak mengubah struktur kimia dan bentuk asli benda. Dengan pengujian ini, maka karakteristik material dapat diketahui dalam kondisi tertentu. Selain itu dapat juga memastikan jika material tersebut sudah memenuhi standar atau persyaratan. Beberapa parameter pengujian fisik diantaranya.

#### 1. Densitas

Salah satu sifat fisik pada sebuah papan komposit adalah densitas. Densitas merupakan jumlah massa bahan per  $\text{cm}^3$  volume pada sebuah komposit [32]. Densitas dapat ditentukan oleh massa, ukuran atom, dan cara penumpukannya. Jika tingkat massa pada suatu bahan tinggi, maka densitas juga akan semakin tinggi. Peningkatan tersebut bertambah secara teratur seiring meningkatnya nomor atomik di setiap sub kelompok [33]. Untuk pengujian densitas ini dapat ditentukan dengan metode perendaman (basah) maupun kering. Jika menggunakan perendaman, maka standar yang digunakan adalah ASTM D271-99. Dan sedangkan tanpa perendaman menggunakan standar JIS A 5908. Untuk menentukan densitas dilakukan dengan mengukur massa dan volume dari komposit. Untuk persamaannya terbagi menjadi 2 yaitu menghitung secara teoritis dan aktual. Berikut merupakan persamaannya.

$$\rho_{th} = \rho_{al} \times v_{al} + \rho_{gr} \times v_{gr} + \rho_{ZnO} \times v_{ZnO} + \rho_C \times v_C + \rho_s \times v_s + \rho_r \times v_r \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

$\rho_{th}$  = Densitas teoritis ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\rho_n$  = Densitas masing-masing bahan ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$v_n$  = Fraksi volume masing-masing bahan (%)

Sedangkan untuk menghitung densitas aktual menggunakan persamaan berikut.

$$d = \frac{m_1}{V} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

$d$  = Densitas aktual ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$m_1$  = Massa (gram)

$V$  = Volume ( $\text{cm}^3$ )

## 2. Porositas

Porositas merupakan hal yang tak dapat dihindari ketika proses manufaktur, hanya dapat diminimalisir saja. Keberadaannya pada matriks komposit memiliki pengaruh berbahaya disebabkan karena pada bagian tersebut *reinforcement* tidak didukung oleh matriks dimana seperti yang diketahui jika *reinforcement* ini akan selalu mentransfer tegangan ke matriks. Akibatnya akan timbul *crack* yang menyebabkan kegagalan prematur. Timbulnya ruang kosong terjadi karena matriks tidak dapat mengisinya. Ketika pembebanan terjadi pada komposit, daerah tegangan akan mengarah ke daerah yang terdapat rongga sehingga mengurangi kekuatan mekanik komposit. Pada penelitian [34] menunjukkan semakin tinggi fraksi volume serat jerami padi akan menyebabkan kadar porositas meningkat. Hal tersebut dapat terjadi karena terjadi kerusakan ikatan antara serat dengan matriks sehingga daya ikatnya tidak sempurna. Untuk menguji porositas pada komposit dapat menggunakan standar ASTM D 2734-94. Untuk mendapatkan nilai porositas, sebelumnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai densitas teori ( $T_d$ ) dan densitas aktual komposit ( $M_d$ ).

$$V (\%) = 100 \frac{(T_d - M_d)}{T_d} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

$V$  = Porositas (%)

$T_d$  = Densitas teori ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$M_d$  = Densitas aktual ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

## 3. Oil absorption

Untuk mengetahui kemampuan komposit dalam menyerap cairan dapat dilakukan sebuah pengujian yaitu *oil absorption*. Pengujian ini umumnya menggunakan cairan berupa air, minyak,

maupun oli. Pada sebuah kampas rem, parameter ini cukup penting karena akan berhubungan dengan ketahanan struktur material, khususnya ketika terendam pada cairan. Pada komposit kampas rem, nilai *oil absorption* yang rendah menunjukkan kualitas komposit yang baik. Semakin rendah nilai *oil absorption* ini, maka kemampuan komposit untuk menahan penetrasi air lebih baik. Sebaliknya, jika nilai *oil absorption* tinggi maka beberapa efek negatif dapat terjadi seperti dimensi menjadi tidak stabil, terjadi degradasi sifat mekanik, dan rentan terhadap korosi, *crack*, dan delaminasi sehingga umur penggunaannya menjadi lebih rendah. Tingkat *oil absorption* dapat dipengaruhi oleh kandungan serat pada komposit. Pada penelitian [26] menunjukkan jika komposit dengan tingkat kandungan serat yang tinggi memiliki nilai *oil absorption* yang tinggi. Hal tersebut dapat disebabkan karena sifat serat alam yaitu dapat menyerap air dengan baik dibandingkan epoksi. Ikatan matriks dengan serat akan membentuk celah dimana air dapat masuk secara kapilarisasi. Untuk standar pengujian *oil absorption* yaitu ASTM D543 [35]. Adapun persamaan untuk menentukan *oil absorption* komposit ditunjukkan oleh persamaan 2.4.

$$OA = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

OA = *Oil absorption* (%)

$m_1$  = Berat spesimen sebelum direndam (gram)

$m_2$  = Berat spesimen setelah direndam (gram)

### 2.7.2 Pengujian Tribologi

Fenomena yang umum terjadi dalam dunia permesinan adalah fenomena kontak dari setiap komponen mesin. Tribologi merupakan ilmu terapan yang membahas mengenai kontak tersebut seperti fenomena gesekan, keausan, serta pelumasan. Tribologi ini sangat digunakan ketika melakukan desain alat, analisis, dan pemeliharaan permukaan dan sistem yang mengalami gesekan, keausan, dan pelumasan. Kajian tribologi ini dapat meningkatkan efisiensi, pengurangan biaya, dan meningkatkan

*lifetime* sebuah mesin. Berikut ini merupakan 2 bagian penting dalam kajian tribologi yaitu laju keausan dan koefisien gesek [36]. Berikut penjelasannya.

### 1. Laju Keausan

Keausan merupakan kondisi dimana material kehilangan bagiannya secara progresif atau terdapat perpindahan sejumlah material dari sebuah permukaan karena gerak relatif antara permukaan satu dengan permukaan lainnya [4]. Pengujian ini dilakukan dengan menghitung lebar keausan pada sebuah spesimen. Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai laju keausan adalah sebagai berikut.

$$W_s = \frac{B \times b^3}{8 \times r \times P \times X} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

- $W_s$  = Spesifik abrasi ( $\text{mm}^2/\text{kg}$ )
- $B$  = Tebal cincin (mm)
- $b$  = Lebar jejak rata-rata (mm)
- $r$  = Jari-jari cincin (mm)
- $P$  = Beban (kg)
- $X$  = Jarak luncur (mm)

Beberapa peneliti menyebutkan pada kendaraan modern cakram akan aus lebih cepat sehingga kemampuannya menurun walaupun penggunaannya belum sampai 40.000 km. Salah satu solusi untuk meminimalisir kerugian akibat keausan yaitu dengan membuat material alternatif baru dengan memperhatikan beberapa sifat material. Faktor-faktor seperti kecepatan, tekanan, kekerasan material, dan kekasaran permukaan ini menjadi pertimbangan untuk mengatasi fenomena keausan yang terjadi [37].

### 2. Koefisien Gesek

Salah satu fenomena fisika yang sering ditemukan dalam kehidupan sehari-hari yaitu fenomena gesekan. Gaya gesek ini merupakan sebuah gaya yang melawan pergerakan benda di suatu permukaan relative antara satu sama lain. Efek dari gesekan ini dapat

menyebabkan beberapa fenomena seperti keausan, degradasi, dan kerusakan yang cukup signifikan pada objek yang mengalami gesekan tersebut. Sebuah parameter untuk mengukur besarnya gaya gesek di dua permukaan yang bersentuhan adalah koefisien gesek ( $\mu$ ). Nilai koefisien gesek pada kampas rem memiliki batasan dan toleransi berdasarkan SNI 09-0143-1987 yang dapat dilihat pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4** Nilai koefisien gesek dan toleransi [14]

Klasifikasi menurut ciri-ciri	Klasifikasi menurut pengguna	Temperatur permukaan gesek dari cakram					
		100°C	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C
		Koefisien gesek ( $\mu$ )					
	Kelas 1A	0,3-0,6	0,25-0,6				
	Kelas 1B	0,3-0,6	0,25-0,6	0,2-0,6			
Tipe 1, 2, dan 3	Kelas 2	0,3-0,6	0,25-0,6	0,2-0,6			
	Kelas 3	0,3-0,6	0,25-0,6	0,2-0,6	0,15-0,6		
	Kelas 4A	0,3-0,6	0,3-0,6	0,25-0,6	0,20-0,6	0,15-0,6	
	Kelas 4B	0,3-0,6	0,25-0,6	0,25-0,6	0,25-0,6	0,25-0,6	0,2-0,6

Koefisien gesek ini berhubungan langsung dengan gaya normal yang diterapkan ( $N$ ) dan gaya gesek ( $F$ ) melalui hubungan yang dikenal sebagai hukum Amontons. Adapun persamaan untuk menentukan koefisien gesek dinyatakan sebagai berikut.

$$CF = \frac{F}{N} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

CF = Koefisien gesek

F = Gaya gesek (N)

N = Gaya normal (N)

Untuk rentang nilai koefisien gesek yaitu mulai dari nol sampai dengan satu ( $0 \leq \mu \leq 1$ ). Jika suatu bidang memiliki permukaan yang sangat kasar, maka nilai koefisien gesek ( $\mu$ ) = 1. Sedangkan pada bidang yang sangat halus nilai koefisien geseknya ( $\mu$ ) = 0 [38]. Walaupun telah banyak penelitian koefisien gesek ini, namun variasinya dipengaruhi oleh lingkungan, permukaan, dan material. Dari penelitian sebelumnya, diketahui jika banyak faktor yang mempengaruhi koefisien gesek. Pada sebuah penelitian menunjukkan jika modifikasi pada suatu permukaan akan mengurangi nilai

koefisien gesek dan laju keausannya. Sementara itu pada penelitian lain menekankan jika penting untuk memahami interaksi antar molekul di sebuah permukaan untuk pengembangan material selanjutnya. Walaupun sudah banyak penelitian yang dilakukan, tentu masih banyak celah untuk studi lebih lanjut mengenai gesekan ini yang dapat membuat inovasi baru dalam teknologi permukaan dan desain material [39].

## 2.8 Variasi Fraksi Volume

Fraksi volume merupakan rasio volume bahan dalam seluruh campuran. Fraksi volume ini menyatakan unsur penyusun komposit. Istilah fraksi volume umumnya digunakan pada ilmu material, fisika, maupun kimia dimana pada ilmu tersebut biasanya menghitung komposisi campuran [40]. Dengan adanya variasi komposisi unsur-unsur dalam campuran akan mempengaruhi sifat mekanis material, sifat fisik, dan sifat kimianya. Selain itu dengan adanya fraksi volume ini dapat diprediksi sifat komposit yang akan dibuat. Karakteristik sebuah komposit dapat dipengaruhi oleh variasi fraksi volumenya, temperatur sintering, tekanan sintering, dan waktu sintering. Untuk menghitung fraksi volume dapat digunakan persamaan 2.7.

$$\text{Fraksi volume (\%)} = \frac{\text{Volume komponen}}{\text{Total volume campuran}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Satuan dari fraksi volume ini umumnya dinyatakan dalam bentuk persen. Dalam beberapa penelitian kampas rem, fraksi volume ini digunakan untuk mempresentasikan banyaknya komposisi bahan material yang akan digunakan. Dengan menggunakan fraksi volume ini dapat mempermudah penelitian karena diketahui sifatnya seiring dengan komposisinya sehingga memudahkan untuk memodifikasi komposisi bahan.

## 2.9 Pemberian Perlakuan

Pemberian perlakuan yang dilakukan pada material seperti komposit diberikan untuk meningkatkan sifat dari bahan komposit. Proses tersebut akan memperkuat struktur dari komposit, meningkatkan sifat mekanis, dan

meningkatkan daya tahan komposit terhadap kondisi lingkungan. Berikut ini merupakan pemberian perlakuan pada kampas rem yaitu sebagai berikut.

### **2.9.1 Perlakuan Alkali**

Untuk meningkatkan ikatan komposit dapat dilakukan dengan memberikan perlakuan kimia seperti memberikan perlakuan alkali (NaOH). Diketahui jika NaOH ini merupakan sebuah larutan basa yang terasa licin. Pemberian perlakuan ini umumnya digunakan pada serat karena biaya yang cukup terjangkau. Dengan melakukan perlakuan alkali ini, maka serat akan termodifikasi sehingga komabilitas diantara serat dengan matriks meningkat. Kotoran-kotoran yang terdapat pada serat seperti lignin atau pectin, dan hemiselulosa akan berkurang sehingga kekerasan permukaan terjadi peningkatan. Pemberian perlakuan alkali terhadap sifat permukaan serat alam selulosa telah diteliti dimana pengaruhnya yaitu kandungan optimum air dapat tereduksi sehingga sifat alami *hydrophilic* serat (menyerap air) bisa memberikan ikatan *interfacial* dengan matriks secara optimal. Diketahui jika sifat mekanik terbaik dilakukan pada serat dengan perlakuan alkali selama 2 jam. Jika waktu perendaman serat terlalu lama dan juga jika serat tidak diberikan perlakuan alkali, maka dapat menurunkan sifat mekaniknya [17] [41].

### **2.9.2 Perendaman Oli**

Oli merupakan pelumas mesin yang dapat meredam panas dan melindungi mesin dari karat. Terdapat 2 jenis oli yaitu oli 2T dan oli 4T. Oli 2T sendiri digunakan pada kendaraan dengan 2 langkah. Sedangkan oli 4T digunakan pada kendaraan dengan 4 langkah. Pada sebuah oli terdapat lapisan halus yang berguna untuk meminimalisir terjadinya benturan antar logam dari komponen mesin yang menyebabkan goresan atau keausan pada komponen. Kekentalan dari sebuah oli memiliki tingkatan tergantung pada penggunaannya [42]. Pada sebuah penelitian, sebelum dilakukan pengujian mekanik, terlebih dahulu spesimen direndam pada fluida cair yang mengacu pada standar ASTM D5229 dengan waktu 504 jam atau 21 hari. Variasi perendaman yang dilakukan yaitu sample tidak direndam, perendaman dengan air hujan, perendaman

dengan air destilasi, dan perendaman dengan oli bekas mesin. Berdasarkan hasil pengujian impak, sample tanpa perendaman memiliki nilai kekuatan impak tertinggi dan pada perendaman dengan oli memiliki kekuatan impak terendah. Hal tersebut dapat terjadi karena kandungan kimia yang diserap spesimen akan melemahkan ikatan antar muka dan menyebabkan *microcracks* dimana ukuran pori akan semakin besar [43].

### 2.9.3 *Curing*

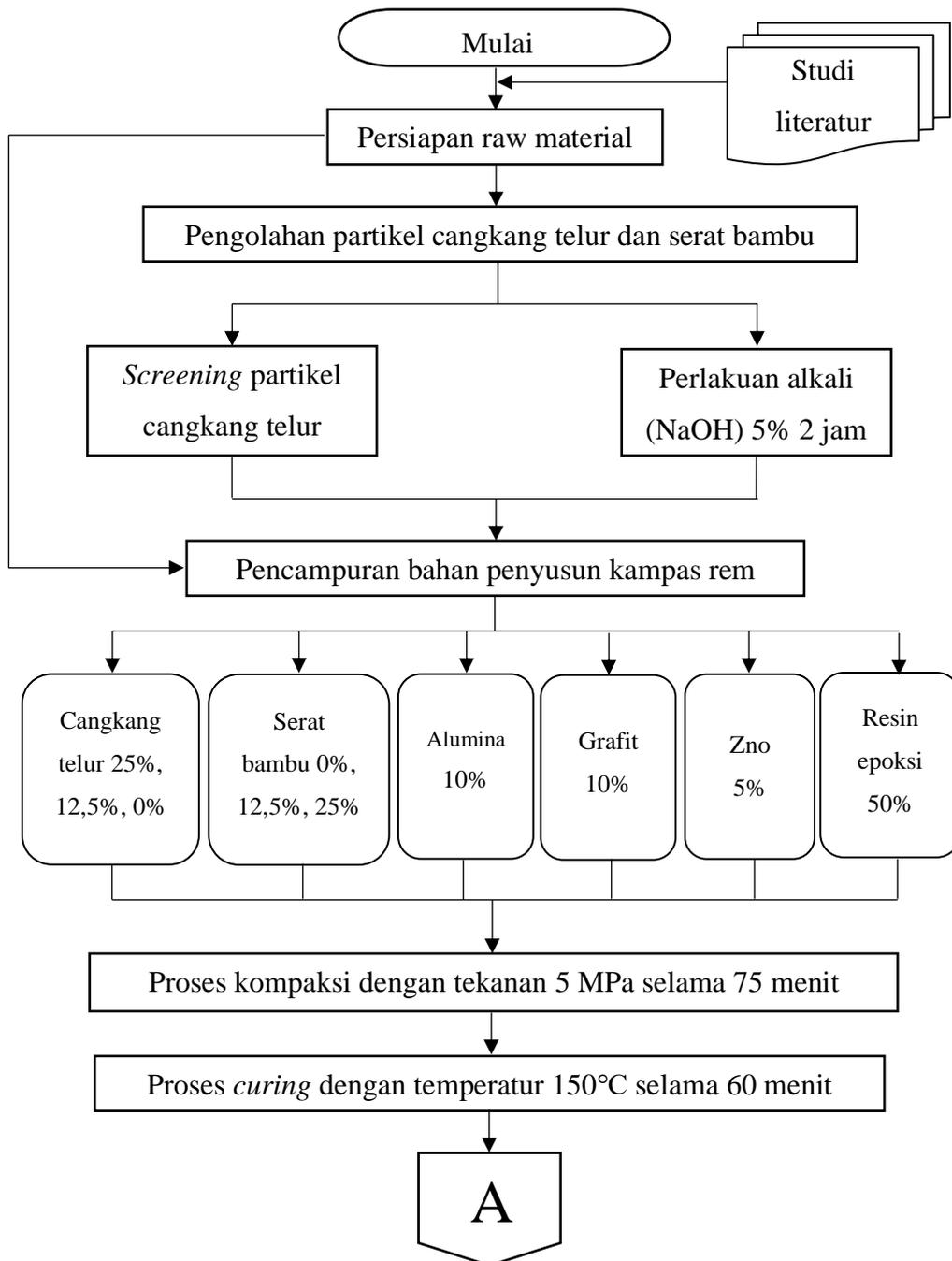
Proses polimerisasi atau proses pemanasan yang dilakukan dengan nilai temperatur diatas temperatur kamar untuk mendapatkan daya ikat tinggi pada serat menggunakan resin disebut sebagai proses *curing*. Proses ini cukup penting dalam pembuatan material yang membutuhkan nilai koefisien gesek tinggi. Untuk proses *curing* umumnya dilakukan dengan menggunakan peralatan seperti oven listrik maupun *furnace* [44]. Pada proses *curing* terjadi peningkatan temperatur yang akan menghasilkan *cross-linking* di material komposit. Hal tersebut akan menurunkan sifat kekakuan materialnya. *Cross-linking* akibat proses *curing* akan menghubungkan molekul-molekul material yang membentuk jaringan tiga dimensi yang lebih kuat dan stabil. Molekul dalam komposit tersebut akan bergerak dan mengatur ulang molekul resin. Hal tersebut dapat mengurangi lubang yang terdapat pada permukaan dan bagian dalam komposit sehingga meningkatkan sifat mekanisnya. Kemudian untuk *post curing* merupakan sebuah proses pemanasan tambahan setelah dilakukan proses *curing* dimana bertujuan agar sifat fisik dan mekanik material dapat diperbaiki. Pada *post curing* ini bahan samping yang tersisa dari proses *curing* awal dapat dihilangkan sehingga dapat memperkuat struktur dari materialnya.

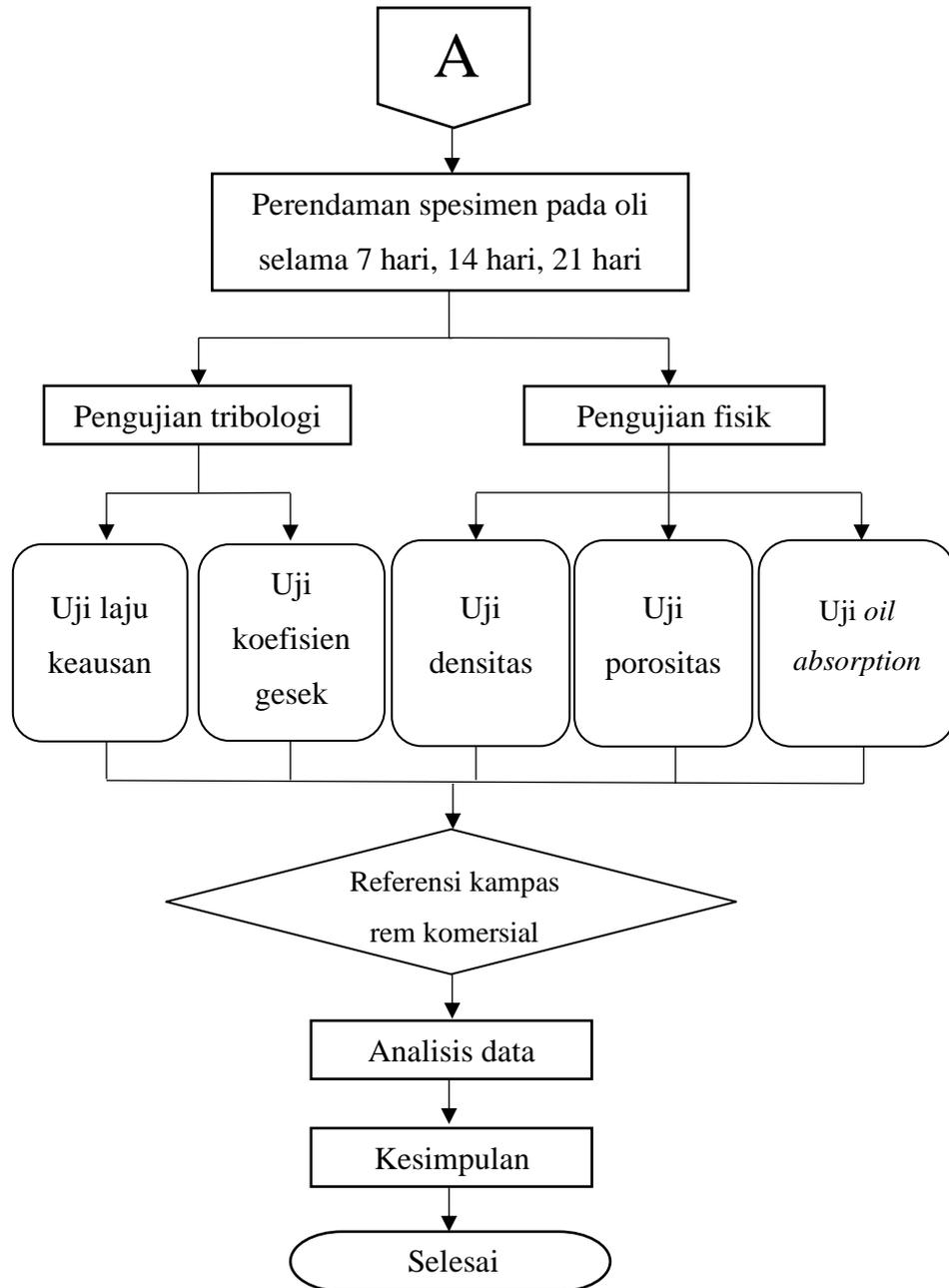
# BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Alur tahapan yang dilakukan pada penelitian ini akan dijabarkan pada diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.





**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian kampas rem

### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Terdapat beberapa alat dan bahan yang menunjang penelitian kampas rem agar penelitian ini dapat berjalan dengan optimal. Untuk beberapa alat dan bahan tersebut diantaranya.

### 3.2.1 Alat yang Digunakan

Beberapa alat yang digunakan dalam pembuatan spesimen dan pengujian spesimen yaitu sebagai berikut.

#### 1. Saringan mesh 120

Saringan mesh 120 ini digunakan untuk memisahkan partikel cangkang telur antara yang kecil dengan yang besar sehingga didapatkan ukuran serbuk yang lebih seragam dan menghilangkan serbuk yang tidak diinginkan. Untuk *frame* dan mesh menggunakan material *stainless steel* dan pada bagian penampangnya memiliki bentuk oval.



**Gambar 3.2** Saringan mesh 120

#### 2. Neraca Digital

Neraca digital digunakan sebagai alat ukur berat bahan-bahan penelitian agar sesuai dengan komposisi yang telah ditentukan. Alat yang digunakan memiliki material *stainless steel* dimana dapat mengukur massa benda maksimal 2000 gram. Timbangan ini beroperasi dengan daya dari 2 buah baterai berukuran AAA. Pada alat ini dilengkapi dengan LCD dan memiliki ketelitian 0,01 gram.



**Gambar 3.3** Neraca digital

### 3. Cetakan

Cetakan digunakan untuk membentuk spesimen dan menjaga bentuk material selama proses pembuatan. Untuk material cetakan yang digunakan yaitu berupa baja dengan bentuk kubus yang terdapat lubang dibagian tengahnya yang memiliki diameter 27 mm dan kedalaman 60 mm. Selain itu untuk penekannya menggunakan 2 buah silinder pejal dengan diameter 27 mm dan tinggi masing-masing yaitu 77 mm dan 20 mm sebagai penahan bawahnya.



**Gambar 3.4** Cetakan

### 4. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi sampel yang telah dibuat. Jenis jangka sorong yang digunakan yaitu *dial caliper* yang diproduksi oleh Mitutoyo. Dimensi maksimal yang dapat diukur oleh jangka sorong ini 150 mm dengan ketelitian mencapai 0,02 mm.



**Gambar 3.5** Penggaris

### 5. Oven

Oven digunakan untuk memanaskan bahan agar kekerasannya meningkat dengan panas yang menyebar rata diseluruh permukaan sampel. Oven yang digunakan yaitu Votre dengan temperatur

maksimal yang dapat dicapai oven yaitu 250°C dan maksimal waktu oven selama 60 menit.



**Gambar 3.6** Oven

#### 6. Mesin *Cold Press*

Mesin *cold press* digunakan dengan menekan campuran bahan kampas rem agar dapat menyatu dengan mengandalkan tekanan hidroliknya. Maksimum tekanan yang dapat dicapai dari *cold press* ini sekitar 250 bar atau 3500 psi. Untuk penggunaannya yaitu dengan memompa hingga mencapai tekanan yang ditentukan dan untuk melepaskannya dengan memutar sekrup yang terhubung dengan *valve* pada bagian depan.



**Gambar 3.7** Mesin *cold press*

#### 7. *Thermocouple*

*Thermocouple* yang digunakan adalah Hioki 3412 dimana ini merupakan *thermocouple* tipe K. Alat ini digunakan untuk mengukur temperatur oven ketika melakukan proses *curing* agar temperatur yang diterima oleh spesimen akurat. Cara penggunaannya yaitu pada bagian ujung *thermocouple* di masukkan melalui lubang yang berada pada

bagian pintu oven dan diberikan *seal* agar temperatur di dalam oven tidak keluar.



**Gambar 3.8** *Thermocouple*

#### 8. Amplas Gerinda

Gerinda yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Maktec MT90. Penggunaan amplas gerinda ini difungsikan sebagai sebagai alat untuk meratakan permukaan spesimen agar kontak antara spesimen dengan mesin uji menjadi optimal. Kecepatan maksimal yang dapat dicapai oleh gerinda ini sebesar 1200 rpm apabila tanpa beban.



**Gambar 3.9** Amplas gerinda

#### 9. Instrument Pengukuran Koefisien Gesek

Untuk pengujian koefisien gesek menggunakan alat rancangan sendiri mengikuti standar yang telah ditetapkan. Alat uji tersusun atas piringan cakram yang diletakkan diatas 2 buah balok dimana pada bagian depannya diberikan semacam *pulley*. Kemudian terdapat gelas ukur untuk wadah air yang dikaitkan dengan benang nilon. Gelas akan terhubung dengan spesimen menggunakan nilon dimana diatas

spesimen tersebut akan diberikan beban. Berikut merupakan bentuk dari alat uji koefisien gesek.



**Gambar 3.10** Instrument pengukuran koefisien gesek

#### 10. *Ogoshi High Speed Universal Wear Testing Machine*

Digunakan alat uji laju keausan berupa *Ogoshi high speed universal wear testing machine* (Type OAT-U) yang tersedia di Universitas Indonesia. Dengan mesin uji ini dapat diketahui tingkat ketahanan keausan dari spesimen komposit kampas rem yang akan digesekkan pada *revolving disc* yang berputar.



**Gambar 3.11** *Ogoshi high speed universal wear testing machine* [45]

### 3.2.2 Bahan yang Digunakan

Beberapa bahan yang digunakan dalam pembuatan spesimen dan pengujian spesimen yaitu sebagai berikut.

#### 1. Natrium Hidroksida

Larutan NaOH 5% merupakan campuran antara aquades dan soda api. Bentuk dari aquades berupa cairan, sedangkan soda api berupa butiran padat berwarna putih. Fungsi dari larutan ini yaitu untuk memberikan perlakuan alkali pada serat bambu yang berfungsi

untuk meningkatkan sifat mekanis komposit dan menghilangkan hemiselulosa dan lignin.



**Gambar 3.12** Aquades dan soda api

## 2. Cangkang Telur

Cangkang telur yang digunakan merupakan cangkang telur ayam. Cangkang telur digunakan sebagai bahan pengisi atau *filler* yang dapat meningkatkan sifat kampas rem. Cangkang telur didapatkan dari pembelian secara online. Untuk ukuran saringan yang digunakan untuk menyaring partikel cangkang telur ini yaitu dengan mesh 120.



**Gambar 3.13** Cangkang telur

## 3. Serat Bambu

Serat bambu digunakan sebagai bahan penguat agar dapat meningkatkan kekuatan mekanik kampas rem. Jenis bambu yang digunakan yaitu bambu apus. Adapun perlakuan yang diberikan yaitu direndam pada larutan alkali dengan kandungan 5% NaOH dan 95% aquades selama 2 jam.



**Gambar 3.14** Serat bambu

#### 4. ZnO

ZnO digunakan sebagai bahan tambahan untuk membuat ikatan antar molekul kanvas rem semakin kuat sehingga densitasnya meningkat. Ukuran mesh untuk ZnO ini yaitu 80 mesh. Untuk ZnO ini didapatkan dari toko kimia di sekitar lokasi penelitian.



**Gambar 3.15** ZnO

#### 5. Resin epoksi

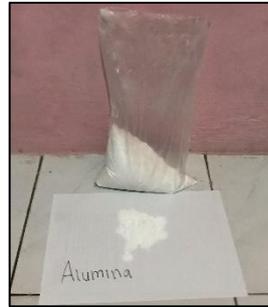
Resin epoksi digunakan sebagai matriks untuk mengikat serat dengan baik sehingga struktur kanvas rem lebih solid. Resin epoksi didapatkan dari toko kimia di sekitar lokasi penelitian. Untuk resin epoksi ini dicampur hardener dengan rasio campuran 2:1.



**Gambar 3.16** Resin epoksi

#### 6. *Alumina Powder*

*Alumina powder* digunakan sebagai bahan pengisi atau *filler* yang dapat meningkatkan sifat mekanik dan termal dari kanvas rem. Ukuran mesh untuk *alumina powder* ini yaitu 325 mesh. Untuk *alumina powder* ini didapatkan dari toko kimia di sekitar lokasi penelitian.



**Gambar 3.17** *Alumina powder*

#### 7. *Graphite Powder*

*Graphite powder* pada kanvas rem digunakan sebagai material gesek dan *friction modifier*. Ukuran mesh untuk *graphite powder* ini yaitu 325 mesh. Untuk *graphite powder* ini didapatkan dari toko kimia di sekitar lokasi penelitian.



**Gambar 3.18** *Graphite powder*

#### 8. Silikon

Silikon digunakan ketika proses kompaksi dimana berfungsi agar spesimen tidak merekat dengan cetakan (*mold release*). Untuk penggunaannya yaitu silikon akan dilumasi diseluruh bagian cetakan yang akan saling bersinggungan dengan campuran komposit seperti pada bagian lubang dan bagian *punch*.



**Gambar 3.19** Silikon

## 9. Oli

Pelumas oli digunakan untuk mensimulasikan spesimen kampas rem jika terpapar oli. Oli yang digunakan merupakan oli motor Federal Ultratec Matic 30 dengan spesifikasi SAE 10W-30. Penggunaannya yaitu dengan menuangkan oli pada gelas dan spesimen akan direndam pada oli yang telah dituangkan. Untuk bahan ini didapatkan dari bengkel di sekitar lokasi penelitian.



**Gambar 3.20** Pelumas oli motor

### 3.3 Prosedur Penelitian

Berikut ini merupakan prosedur yang dilakukan dalam penelitian kampas rem berbahan cangkang telur dan serbuk bambu dengan variasi fraksi volume setelah perendaman oli.

#### 1. Preparasi komposisi sampel

Pada tahap preparasi komposisi sampel dilakukan perhitungan agar didapatkan ukuran massa yang akan digunakan dalam campuran kampas rem. Untuk persamaan menghitungnya digunakan persamaan berikut.

$$V = h \times \pi \times r^2 \dots\dots\dots(3.1)$$

$$m = \rho \times V \times v_f \dots\dots\dots(3.2)$$

Keterangan:

- h : Tinggi cetakan (mm)  
 r : Jari-jari cetakan (mm)  
 $\rho$  : Densitas bahan ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 V : Volume cetakan ( $\text{cm}^3$ )  
 $v_f$  : Fraksi volume (%)

Untuk densitas dari setiap bahan yang digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan kampas rem akan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Nilai densitas bahan penyusun kampas rem

No	Nama bahan	Densitas ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
1	Cangkang telur	2,571
2	Serat bambu	0,60
3	ZnO	5,606
4	Resin epoksi	1,20
5	Alumina	3,93
6	Grafit	2,26

Kemudian dilakukan perhitungan komposisi pada setiap spesimen. Adapun langkah awal yang dilakukan yaitu dengan menghitung volume silinder dengan data dimensi yang dibutuhkan yaitu tebal 15 mm dan diameter 27 mm. Untuk persamaan menghitung volume menggunakan persamaan 3.1. Berikut ini merupakan perhitungannya.

$$V = 15 \times \pi \times 13,5^2 = 85,9 \text{ mm}^3$$

Setelah didapatkan nilai volume, tahap selanjutnya yaitu menghitung komposisi dari setiap variasi sampel dengan menggunakan persamaan 3.2. Adapun komposisi dari setiap sampel ditunjukkan pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Komposisi setiap spesimen (gram)

Bahan	FCT	CTSB	FSB
Cangkang telur	5,521	2,761	0
Serat bambu	0	0,644	1,288
Alumina	3,376	3,376	3,376
Resin epoksi	5,154	5,154	5,154
ZnO	2,408	2,408	2,408
Grafit	1,941	1,941	1,941

## 2. Pengolahan cangkang telur dan serat bambu

Sebelum dilakukan pencampuran, sebelumnya dilakukan pengolahan pada cangkang telur dan bambu. Untuk cangkang telur sendiri merupakan cangkang telur ayam. Berikut ini merupakan prosedur pengolahan cangkang telur ayam:

- A. Partikel cangkang telur yang digunakan diperoleh melalui pembelian dari toko.
- B. Melakukan proses *screening* bubuk cangkang telur menggunakan mesh ukuran 120 agar didapatkan ukuran partikel cangkang telur yang seragam [46].
- C. Untuk memaksimalkan jumlah cangkang telur, serbuk yang tidak tersaring di blender selama 5 menit agar didapatkan serbuk yang halus. Sedangkan untuk pengolahan serat bambu yang dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
  - A. Membersihkan serat bambu dengan menggunakan air agar kotoran pada bambu menghilang.
  - B. Memberikan perlakuan Alkali (NaOH) untuk memisahkan serat bambu ini dari hemiselulosa dan lignin. Pemberian perlakuan ini dapat meningkatkan kekasaran permukaan serat bambu. Pada penelitian yang dilakukan oleh [41] dengan waktu perlakuan Alkali selama 2 jam dengan kandungan 5% didapatkan kekuatan impak tertinggi. Diketahui jika waktu perlakuan Alkali terlalu sebentar maka lignin belum hilang dan jika terlalu lama maka akan merusak serat.
  - C. Setelah proses perendaman selama 2 jam, langkah selanjutnya yaitu membilas serat bambu menggunakan air.
  - D. Serat bambu yang telah dibilas dikeringkan dibawah sinar matahari kurang lebih selama 1 hari.
  - E. Setelah didapatkan serat bambu yang sudah kering, selanjutnya yaitu dipilih serat bambu dengan ketebalan 0,6-0,8 mm dan memotongnya dengan panjang 6-8 mm.

### 3. Pencampuran bahan baku kampas rem

Pada tahap ini dilakukan proses *mixing* pada seluruh bahan baku kampas rem dengan variasi fraksi volume yang telah ditentukan. Pencampuran bahan tersebut dilakukan pada gelas takar dan diaduk dengan menggunakan sendok. Berikut ini merupakan prosedur dalam pencampuran bahan baku ini.

- A. Memasukkan partikel cangkang telur, ZnO, alumina, grafit secara bertahap hingga tercampur semua.
- B. Memasukkan serat bambu secara bertahap serta mengaduknya agar serat bambu tidak menggumpal.
- C. Mencampurkan resin dan hardener dengan komposisi 2:1.
- D. Memasukkan bahan yang sudah tercampur dengan resin dan hardener dan diaduk menggunakan sendok.
- E. Mendinginkan campuran dengan waktu 5 menit agar komposit tidak terjadi kebocoran ketika dilakukan proses kompaksi dan juga udara yang terkandung di dalam campuran keluar [25].

### 4. Proses Kompaksi

Kompaksi ini dilakukan dengan menggunakan mesin *press hydraulic* dimana metode yang digunakan adalah *cold press single punch*. Proses kompaksi dilakukan dengan tekanan kompaksi sebesar 5 MPa selama 75 menit. Pemilihan tekanan sebesar itu berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya dimana semakin tinggi tekanan kompaksi maka nilai kekuatan bending meningkat [47] dan juga apabila terlalu tinggi tekanannya maka tingkat laju keausannya akan tinggi [31].

### 5. Proses *curing*

Tahap *curing* dilakukan dengan menggunakan sebuah oven. Tahap ini dilakukan dengan pemanasan pada temperatur dan waktu tertentu untuk memastikan seluruh bahan memiliki ikatan yang baik. Berdasarkan penelitian [48] yang membahas variasi temperatur *curing* dimana tingkat temperatur mempengaruhi sifat mekanik. Hasil penelitian menunjukkan sifat mekanik terbaik didapatkan ketika temperatur *curing* 150°C selama 60 menit.

## 6. Perendaman sampel pada oli

Proses pemberian perlakuan perendaman oli dilakukan pada beberapa sampel dimana sampel yang direndam oli ini telah dilakukan tahap *curing* sebelumnya. Sampel kanvas akan direndam pada oli Federal Matic Ultratec 30, 10W-30. Sampel akan diuji dengan waktu perendaman selama 7 hari, 14 hari, dan 21 hari.

## 7. Pengujian Spesimen

Jenis pengujian yang dilakukan adalah pengujian tribologi dan pengujian fisik dimana untuk pengujian tribologi parameternya sendiri yaitu koefisien gesek dan laju keausan. Sedangkan untuk pengujian fisik diantaranya pengujian densitas, pengujian porositas, dan pengujian *oil absorption*. Pada pengujian ini, sampel ada yang diberikan perlakuan perendaman oli dan tidak diberikan perlakuan sama sekali. Berikut ini akan dijelaskan mengenai pengujian yang akan dilakukan.

### A. Pengujian Densitas

Pengujian densitas dilakukan berdasarkan penelitian [49] dengan cara mengukur massa dan volume dari spesimen. Kedua data tersebut akan dijadikan dasar untuk menghitung densitas dari material spesimen. Untuk mengukur massa dari spesimen digunakan sebuah alat yakni neraca digital dan untuk menghitung volume digunakan jangka sorong agar data yang didapatkan akurat. Adapun persamaan untuk menentukan volume menggunakan persamaan 3.1.

### B. Pengujian Porositas

Pengujian kadar porositas dilakukan berdasarkan standar ASTM D2734-94. Pemilihan standar ini disebabkan karena terfokus pada porositas internal yang mempengaruhi sifat mekanis komposit. Porositas yang didapatkan akan berbentuk persen. Untuk mendapatkan nilai porositas sebelumnya perlu diketahui densitas teoritis ( $T_d$ ) dari dan densitas aktual ( $M_d$ ) spesimen komposit dan selanjutnya dilakukan perhitungan [50].

### C. Pengujian *oil absorption*

Pada penelitian ini, pengujian *oil absorption* dilakukan pada 3 variasi fraksi volume. Untuk waktu perendaman merujuk pada penelitian [35] yaitu selama 24 jam. Standar yang digunakan dalam penelitian ini yaitu ASTM D543 dimana untuk *oil absorption* ini tidak memiliki persyaratan, namun datanya digunakan sebagai pertimbangan untuk menentukan apakah komposit yang dibuat layak digunakan karena dapat mempengaruhi stabilitas dimensi juga.

### D. Pengujian koefisien gesek

Pengujian koefisien gesek dilakukan berdasarkan standar uji ASTM C1028-96. Pada pengujian ini digunakan beban yang menekan spesimen ke permukaan *disc*. Kemudian massa dari spesimen ditimbang dengan neraca digital dan dicatat sebagai  $m_1$ . Kemudian menyusun skema peralatan sesuai dengan yang ditentukan. Selanjutnya air ditambahkan secara bertahap kedalam pemberat hingga benda uji mulai bergerak. Lalu ditimbang massa pada botol penampung dan mencatatnya sebagai  $m_2$ . Untuk mendapatkan nilai koefisien gesek dilakukan perbandingan nilai  $m_2$  dengan  $m_1$ .

### E. Pengujian laju keausan

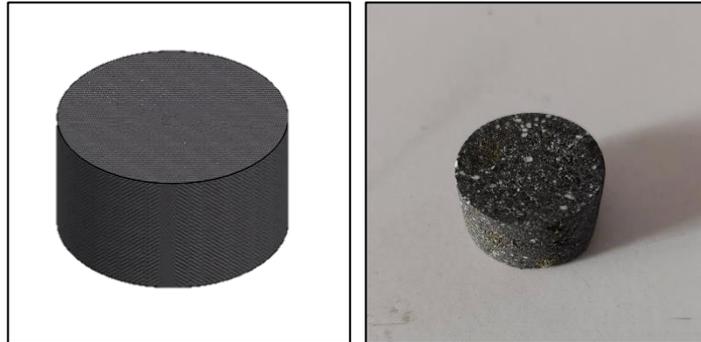
Pengujian laju keausan dilakukan pada sampel yang sebelumnya telah direndam oli. Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode ogoshi. Pengujian ogoshi ini dilakukan dengan standar uji ASTM G99. Pada metode Ogoshi ini sampel yang akan di uji akan diberikan beban gesek dari *revolving disc*. Dari pembebanan gesek tersebut akan menghasilkan kontak antar permukaan secara berulang dimana hal tersebut akan menghilangkan sebagian material pada permukaan sampel. Ukuran jejak hilangnya material itu pada permukaan itu yang dijadikan acuan tingkat keausan pada material. Semakin tinggi nilai keausan material maka semakin tinggi volume material yang hilang dari sampel uji [8].

## BAB IV

### DATA DAN ANALISIS

#### 4.1 Deskripsi Sampel Kampas Rem

Kampas rem ini tersusun dari beberapa bahan diantaranya seperti serat bambu yang digunakan sebagai bahan penguat. Kemudian untuk *filler* atau bahan pengisi digunakanlah alumina serta cangkang telur. Resin epoksi dengan komposisi 2:1 diandalkan sebagai pengikat serta grafit dan ZnO yang berperan sebagai aditif gesekan. Berikut merupakan bentuk spesimen komposit kampas yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Bentuk spesimen kampas rem

Komposit kampas rem dibuat berdasarkan standar pengujian yang berlaku yaitu dengan bentuk silinder dengan ketentuan diameter 27 mm dan ketebalan 15 mm. Terdapat 12 spesimen dengan 3 variasi fraksi volume dimana untuk setiap variasi memiliki 4 buah spesimen. Dari ke-12 spesimen tersebut, 9 spesimen akan dilakukan pengujian koefisien gesek dan 3 spesimen akan di uji laju keausan. Variasi yang dilakukan adalah komposisi antara serat bambu dengan cangkang telur yaitu dengan perbandingan 25%-0%, 12,5%-12,5%, dan 0%-25%. Spesimen dengan komposisi cangkang telur yang lebih mendominasi memiliki struktur yang lebih padat dibandingkan dengan spesimen yang berkomposisi dominasi serat bambu. Untuk memudahkan membedakan setiap spesimen, maka diberikan kode sebagai berikut.

**Tabel 4.1** Kode spesimen kampak rem

Material	Fraksi volume (%)		
	FCT	CTSB	FSB
Cangkang telur	25	12,5	0
Serat bambu	0	12,5	25
Grafit	10	10	10
Alumina	10	10	10
ZnO	5	5	5
Resin epoksi	50	50	50

#### 4.2 Data Hasil Pengujian Densitas

Pengujian densitas dilakukan pada 12 sample dengan 3 variasi fraksi volume. Pengujian dilakukan sebelum direndam pada oli dan setelah dilakukan proses *grinding*. Sebelum diketahui nilai densitas aktual, perlu diketahui nilai densitas teoritis terlebih dahulu. Nilai densitas teoritis digunakan sebagai acuan untuk perbandingan agar diketahui apakah densitas aktual yang didapatkan memiliki penyimpangan yang cukup signifikan dari ketentuannya. Untuk menentukan densitas teoritis digunakan persamaan 2.1. Berdasarkan persamaan tersebut, didapatkan data densitas teoritis sebagai berikut untuk setiap fraksi volume.

**Tabel 4.2** Densitas teoritis setiap fraksi volume

Kode sampel	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )
FCT	2,142
CTSB	1,896
FSB	1,649

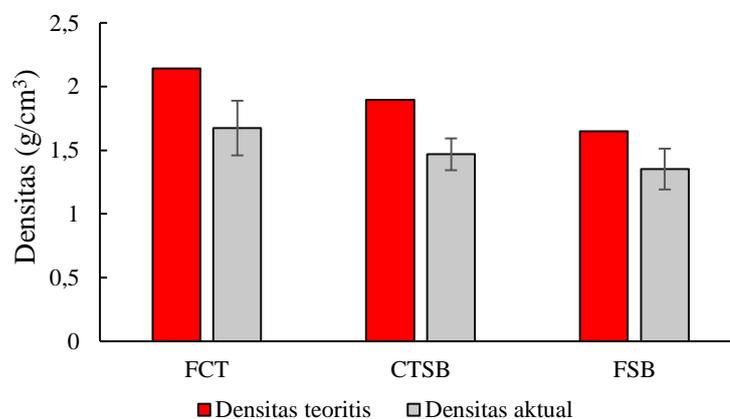
Pada Tabel 4.5 menunjukkan spesimen dengan densitas tertinggi yaitu pada spesimen FCT. Ini menjelaskan jika cangkang telur memiliki kepadatan yang lebih tinggi dibandingkan serat bambu. Ketika fraksi volume seimbang antara partikel cangkang telur dan serat bambu, densitas menjadi turun 0,246 g/cm<sup>3</sup>, ini menunjukkan pengaruh dari campuran antara kedua material tersebut. Dan pada spesimen FSB memiliki nilai densitas terendah yang menunjukkan jika peningkatan fraksi volume serat bambu menurunkan keseluruhan kepadatan material. Berdasarkan data densitas teoritis tersebut, maka dapat disimpulkan jika semakin tinggi kandungan cangkang telur pada komposit maka akan meningkatkan nilai densitas keseluruhan [51].

Penggunaan komposisi antara pada *filler* dan *reinforcement* menjadi pembeda densitas dari spesimen komposit. Berdasarkan persamaan 2.2 didapatkan nilai densitas aktual dari setiap fraksi volume yang ditunjukkan oleh Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Densitas aktual setiap fraksi volume

Kode sampel	Densitas rata-rata (g/cm <sup>3</sup> )	Standar deviasi
FCT	1,674	0,214
CTSB	1,468	0,125
FSB	1,352	0,160

Pada Tabel 4.6 menunjukkan rata-rata densitas aktual dari 3 variasi spesimen. Pada spesimen FCT didapatkan rata-rata densitas sebesar 1,674 g/cm<sup>3</sup>. Jika dibandingkan dengan densitas teori, didapatkan selisih sekitar 0,468 g/cm<sup>3</sup>. Kemudian densitas rata-rata dari spesimen CTSB menunjukkan nilai sebesar 1,468 g/cm<sup>3</sup>. Terdapat selisih sebesar 0,428 g/cm<sup>3</sup> dibandingkan densitas teoritisnya. Lalu untuk densitas rata-rata dari spesimen FSB diketahui sebesar 1,352 g/cm<sup>3</sup>. Didapatkan selisih dari nilai densitas teoritisnya sebesar 0,297 g/cm<sup>3</sup>. Dapat terlihat jika penyimpangan terbesar yaitu pada spesimen FCT kemudian diikuti oleh spesimen CTSB dan yang memiliki penyimpangan terkecil yaitu spesimen FSB. Untuk melihat perbandingan antara densitas teoritis dan densitas aktual dari setiap sampel, maka disajikan grafik yang terdapat pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Perbandingan densitas teoritis dengan densitas aktual

Dari keseluruhan data densitas aktual yang didapatkan, dianalisis rendahnya nilai densitas aktual dibandingkan densitas teoritis disebabkan oleh

2 faktor, diantaranya material penyusun dan proses manufakturnya. Ukuran mesh serbuk pada komposit dapat mempengaruhi densitasnya. Setiap ukuran mesh yang berbeda ini memiliki densitas yang berbeda. Semakin tinggi angka mesh, maka densitas keseluruhan akan meningkat [45]. Hal tersebut dapat terjadi karena *filler* tercampur merata dengan bahan penyusun lainnya sehingga pori-pori kecil yang tersisa dapat tertutup dan menyisakan sedikit rongga. Maka dari itu perlu dilakukan evaluasi pada tahap penyaringan serbuk. Berdasarkan beberapa pernyataan diatas, disimpulkan jika komposit kampas rem ini membutuhkan material dengan densitas yang tinggi. Tingginya densitas menunjukkan jika material semakin padat dan kuat, sebaliknya jika densitas komposit kampas rem rendah maka akan membuat material menjadi mudah hancur dikarenakan terdapat celah antar partikel [9]. Selain itu material dengan densitas yang lebih tinggi cenderung memiliki ketahanan aus yang baik sehingga umur pakai kampas rem lebih lama.

### 4.3 Data Hasil Pengujian Porositas

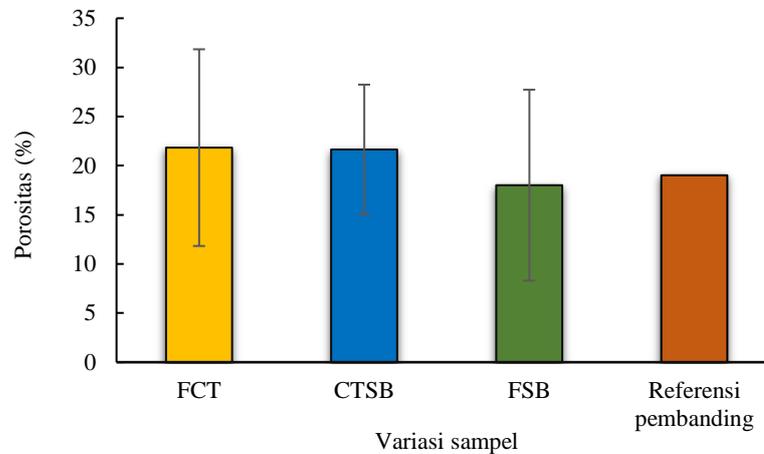
Pengujian porositas pada semua spesimen dilakukan untuk mengetahui persentase rongga yang terdapat pada komposit kampas rem. Untuk menentukan porositas sampel, perlu diketahui densitas teoritis dan densitas aktual dari spesimen. Semakin jauh perbandingan nilai densitas teoritis dengan aktual, maka persen tingkat porositas juga akan semakin tinggi. Tingkat porositas ini akan mempengaruhi performa dari spesimen. Berikut ini merupakan data porositas dari setiap variasi fraksi volume.

**Tabel 4.4** Data porositas komposit kampas rem

Kode sampel	Porositas rata-rata (%)	Standar deviasi
FCT	21,835	10,009
CTSB	21,646	6,597
FSB	18,011	9,716
Referensi pembandingan [52]	19,02	

Pada Tabel 4.4 menunjukkan data rata-rata porositas dari setiap fraksi volume. Pada spesimen FCT menunjukkan nilai porositas yang cukup tinggi dengan persentase rata-rata sebesar 21,835%. Kemudian pada spesimen CTSB menunjukkan rata-rata porositas sebesar 21,646%. Dibandingkan 2 fraksi

volume lainnya, spesimen CTSB ini memiliki persentase porositas tertinggi namun dengan standar deviasi yang rendah. Ini menunjukkan data yang didapatkan lebih konsisten dibandingkan spesimen FCT dan FSB. Sedangkan pada spesimen FSB dengan rata-rata porositas sebesar 18,011% yang menunjukkan tingkat porositas terendah.



**Gambar 4.3** Data porositas komposit kanvas rem

Bersasarkan Gambar 4.3, spesimen FCT menunjukkan nilai porositas tertinggi dibandingkan 2 spesimen lainnya. Fenomena tersebut dapat terjadi akibat dari aglomerasi partikel atau penumpukan partikel yang memiliki ukuran tidak seragam antara partikel cangkang telur dengan bahan penyusun lainnya [52]. Akibatnya partikel tersebut akan menyisakan rongga kecil antar partikel. Sifat dari cangkang telur yang diketahui kaku dan sulit terdeformasi menyebabkan sulitnya penyesuaian bentuk untuk mengisi celah kosong antar partikel. Akibatnya gelembung udara dapat masuk kedalam celah antar partikel dan menyebabkan porositas.

Jika dibandingkan dengan spesimen FCT, porositas spesimen CTSB memiliki persentase yang lebih rendah. Berdasarkan hasil analisis, tingginya porositas spesimen CTSB dapat terjadi akibat interaksi antara dua material (partikel cangkang telur dan serat bambu) yang memiliki morfologi berbeda sehingga tidak kompatibel. Tanpa kompatibilizer seperti *silane coupling agent* menyebabkan serat, *filler*, dan resin epoksi memiliki ikatan adhesi yang rendah dan hanya mengandalkan ikatan mekanis yang cenderung lebih lemah

dibandingkan ikatan kimia. Selain itu, tekanan kompaksi sebesar 5 MPa untuk campuran heterogen dikatakan terlalu rendah. Akibatnya antara partikel cangkang telur dengan serat bambu mengalami hambatan ketika bergerak akibat gesekan internal antar partikel. Terjadi pemadatan secara prematur akibat gesekan dan menciptakan banyak rongga kosong. Maka dari itu untuk mendapatkan porositas rendah dengan kandungan *filler* yang tinggi dibandingkan serat, dibutuhkanlah tekanan kompaksi yang tinggi [53].

Selanjutnya pada spesimen FSB menunjukkan porositas terendah dibandingkan kedua fraksi volume lainnya. Ini mengindikasikan jika serat bambu mempunyai kemampuan cukup baik untuk membentuk struktur dengan resin epoksi. Serat bambu dengan rasio panjang dan diameter yang tinggi lebih mudah terorientasi dan menyusun diri lebih rapat dengan arah yang teratur dalam matriks. Ketika diberikan tekanan kompaksi, serat akan mengikuti arah gaya tekan dan mengikuti pola sejajar satu sama lain. Serat yang mudah terdeformasi dapat menyesuaikan bentuk untuk mengisi ruang kosong. Selain itu, perlakuan alkali pada serat bambu memiliki kontribusi yang cukup efektif pada kemampuan adhesi yang menyebabkan serat menyatu dengan matriks secara optimal. Akibatnya ruang kosong akan semakin berkurang sehingga porositas akan menurun [54].

Faktor lain tingkat porositas yang cukup tinggi dalam penelitian ini dapat diakibatkan dari penggunaan silikon sebagai *mold release* saat proses kompaksi. Silikon yang tidak dapat bereaksi secara kimia dengan resin epoksi dianggap sebagai zat asing apabila masuk ke dalam campuran komposit. Silikon ini dapat menghambat aliran resin masuk ke celah antar partikel komposit sehingga menciptakan rongga. Kemudian, jika data hasil penelitian dibandingkan dengan referensi pembanding, tingkat porositas pada ke-2 spesimen dikatakan masih cukup tinggi, hanya spesimen FSB saja yang memiliki nilai porositas lebih rendah. Karena tidak terdapat standar yang membatasi tingkat porositas, maka evaluasi yang perlu dilakukan untuk meminimalisir porositas yaitu dengan meningkatkan tekanan kompaksi dimana semakin tinggi tekanan kompaksi maka dapat menurunkan tingkat porositas komposit [55].

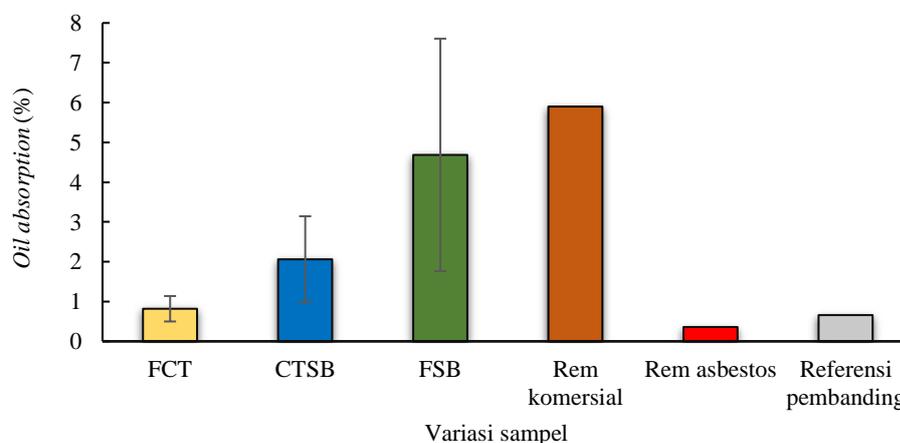
#### 4.4 Data Hasil Pengujian *Oil Absorption*

Pengujian *oil absorption* dilakukan dengan mengukur massa dari setiap spesimen dengan jangka waktu selama 24 jam. Untuk menentukan *oil absorption* setiap spesimen maka digunakan persamaan 2.4 sehingga diperoleh hasil sebagai berikut.

**Tabel 4.5** Data *oil absorption* kanvas rem

Kode sampel	<i>Oil absorption</i> (%)	Standar deviasi
FCT	0,819	0,320
CTSB	2,062	1,081
FSB	4,685	2,919
Kanvas rem komersial [54]	5,9	
Kanvas rem asbestos [56]	0,36	
Referensi pembandingan [57]	0,66	

Tabel 4.5 menunjukkan peningkatan *oil absorption* dengan meningkatnya kandungan serat pada spesimen. Terjadi peningkatan persentase *oil absorption* dari spesimen FCT ke spesimen CTSB sebesar 151,72%. Pada spesimen CTSB ke spesimen FSB sebesar 127,27%. Dengan nilai standar deviasi yang rendah pada spesimen FCT maka dapat disimpulkan jika data *oil absorption* spesimen ini memiliki tingkat konsistensi yang baik dan juga stabil. Sementara pada spesimen CTSB dan FSB memiliki standar deviasi yang lebih tinggi. Ini menunjukkan adanya fluktuasi data antar sampel yang disebabkan karena proses manufaktur, proses pencampuran bahan yang menghasilkan struktur pori tidak seragam sehingga mempengaruhi *oil absorption* spesimen. Untuk grafik *oil absorption* dari setiap spesimen ditunjukkan pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.4** Data *oil absorption* kanvas rem

Pada spesimen FCT terlihat nilai *oil absorption* yang cukup rendah yaitu dengan nilai rata-rata sebesar 0,819%. Jika dibandingkan dengan spesimen CTSB dan FSB, spesimen FCT memiliki nilai *oil absorption* paling rendah. Hal ini dapat disebabkan karena tidak adanya kandungan serat pada campuran komposit dan juga sifat dari cangkang telur yang bersifat hidrofobik sehingga memiliki tingkat penyerapan cairan yang rendah [13] [58]. Kemudian hasil penelitian ini sejalan yaitu dengan peningkatan partikel cangkang telur menurunkan daya penyerapan oli [58]. Selanjutnya pada spesimen CTSB didapatkan nilai *oil absorption* rata-rata yaitu sebesar 2,062%. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen FCT. Pada spesimen CTSB ini terjadi peningkatan nilai *oil absorption* karena keberadaan serat bambu pada campuran komposit dan penurunan fraksi volume pada cangkang telur. Dan yang terakhir yaitu pada spesimen FSB, didapatkan nilai rata-rata *oil absorption* tertinggi dibandingkan 2 variasi fraksi volume lainnya yaitu sebesar 4,685%. Berdasarkan data diatas, peningkatan *oil absorption* pada spesimen CTSB dan FSB sesuai dengan teori yaitu semakin tinggi persentase fraksi volume serat pada komposit, maka *oil absorption* akan meningkat [26]. Fenomena tersebut terjadi karena dinding sel serat terbasahi oleh cairan (oli). Karena serat bambu bersifat hidrofilik (menyerap cairan dengan baik), oli dapat masuk ke celah kosong melewati dinding sel serat sehingga oli mengisi ruang kosong tersebut dan mengakibatkan peningkatan *oil absorption* yang signifikan [59].

Jika data hasil pengujian dibandingkan dengan data kanvas rem komersial, maka ke-3 variasi spesimen memiliki persentase *oil absorption* yang lebih rendah. Ini menunjukkan spesimen hasil penelitian memiliki ketahanan terhadap penyerapan oli yang lebih baik. Namun jika dibandingkan dengan referensi pembanding, nilai *oil absorption* ke-3 spesimen lebih tinggi. Ini dapat disebabkan karena hampir keseluruhan kandungannya memiliki tingkat *oil absorption* yang rendah seperti silika, *iron oxide*, *powdered graphite*,  $C_aCO_3$ , dan resin epoksi. Hanya *maize husk powder* saja yang memiliki daya serap oli tinggi. Sebagai referensi, *oil absorption* tentunya akan lebih rendah dibandingkan daya serap air  $\pm 30\%$  [57]. Jika dibandingkan dengan data kanvas rem asbestos standar United States, ke-3 variasi spesimen memiliki nilai yang

lebih tinggi. Ini disebabkan terdapat komposisinya yakni asbestos 51%, *filler* 31%, dan resin 17% yang diketahui semua komposisi tersebut diketahui memiliki penyerapan cairan sangat rendah [56]. Asbestos yang menjadi pembeda dengan penelitian ini memiliki struktur berupa serat mineral yang tidak mempunyai gugus hidrofilik yang kuat sehingga serapan cairannya sangat sedikit hingga tidak menyerap cairan. Maka dari itu kampas rem asbestos memiliki kelemahan dalam kondisi basah karena akan mengalami efek licin akibat tidak mengikatnya air ke dalam strukturnya sehingga membentuk lapisan air di permukaan [60].

Walaupun kampas rem penelitian memiliki *oil absorption* yang lebih tinggi, namun nilainya masih dapat diterima sebagai kampas rem komposit berbahan alternatif. Maka dapat disimpulkan jika *oil absorption* pada kampas rem nilainya harus berada dalam rentang optimal. Apabila nilainya terlalu tinggi maka berpotensi mengalami degradasi material akibat kelembaban yang berlebihan, namun jika nilainya terlalu rendah maka akan menyebabkan permukaan menjadi licin akibat cairan yang tertahan pada permukaan sehingga dapat menurunkan nilai koefisien geseknya.

#### 4.5 Data Hasil Pengujian Koefisien Gesek

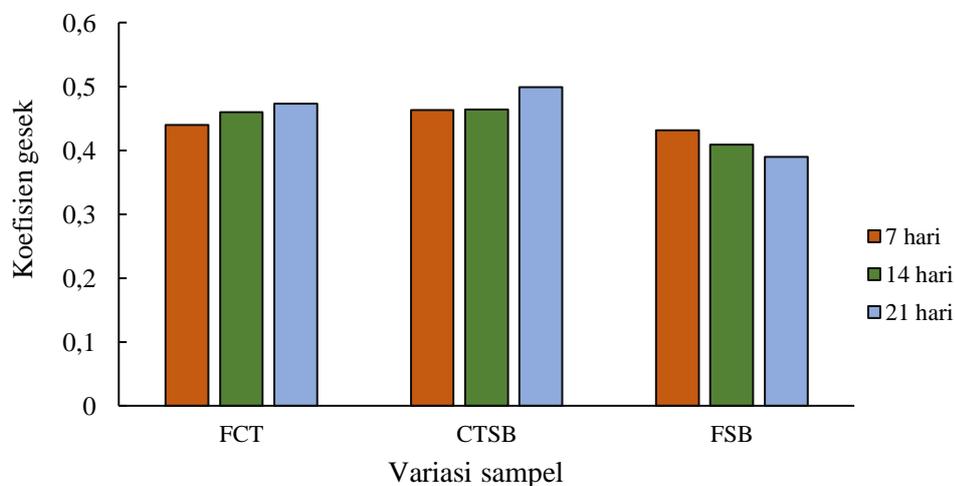
Dilakukan salah satu jenis pengujian tribologi ini untuk mengetahui tingkat koefisien gesek dari permukaan spesimen kampas rem. Berdasarkan data yang didapatkan, maka akan diketahui pengaruh dari lama waktu perendaman oli terhadap nilai koefisien geseknya. Dengan data tersebut akan diketahui juga komposisi material kampas rem yang paling optimal ketika terkena paparan oli. Berikut ini merupakan data hasil pengujian koefisien gesek yang ditunjukkan pada Tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Data koefisien gesek kampas rem

Kode spesimen	Lama perendaman (Hari)	Koefisien gesek ( $\mu$ )
FCT	7	0,440
	14	0,460
	21	0,473

Kode spesimen	Lama perendaman (Hari)	Koefisien gesek ( $\mu$ )
CTSB	7	0,463
	14	0,464
	21	0,499
FSB	7	0,431
	14	0,409
	21	0,390
Referensi 1 [9]		0,45–0,492
Referensi 2 [45]		0,33–0,5
Referensi 3 [57]		0,37-0,44
Standar industri [61]		0,3-0,45

Berdasarkan data hasil pengujian, diketahui jika nilai koefisien gesek dari ke-3 variasi berkisar antara 0,39-0,499. Nilai koefisien gesek spesimen CTSB menunjukkan nilai berkisar antara 0,463-0,499. Kemudian untuk spesimen FCT nilainya berkisar antara 0,440-0,473. Dan nilai koefisien gesek spesimen FSB berkisar antara 0,390-0,431. Agar lebih mudah melihat efek perendaman terhadap nilai koefisien gesek spesimen, maka akan disajikan data dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Data hasil pengujian koefisien gesek

Pada spesimen CTSB menunjukkan tren peningkatan koefisien gesek yang signifikan dimana semakin lama perendaman, semakin tinggi juga nilai koefisien geseknya. Tingginya nilai koefisien gesek akibat kontribusi dari adanya serat bambu yang telah diberikan proses alkali dengan komposisi yang sesuai. Pada 7 dan 14 hari koefisien gesek belum terlihat peningkatan. Namun pada hari ke 21 terjadi peningkatan yang cukup signifikan. Dengan adanya proses alkali pada serat bambu dapat menurunkan laju keausan dan meningkatkan kekasaran permukaan sehingga koefisien geseknya meningkat [21] [26]. Serat bambu inilah yang berkontribusi terhadap peningkatan koefisien gesek secara signifikan. Dengan kombinasi bersama cangkang telur menjadikan spesimen CTSB memiliki ketahanan terhadap paparan oli sehingga tetap mampu memberikan efek gesekan yang baik dan tidak merusak serat walupun terendam cukup lama.

Selanjutnya pada spesimen FCT menunjukkan nilai koefisien gesek yang tidak jauh berbeda dengan spesimen CTSB. Data menunjukkan semakin lama waktu perendaman, nilai koefisien geseknya semakin meningkat. Ini menunjukkan kontribusi dari lama waktu perendaman oli dapat meningkatkan karakteristik gesekan pada permukaan kampas rem. Peningkatan nilai koefisien gesek dapat terjadi akibat tertahannya oli pada permukaan. Lapisan oli yang terbentuk meningkatkan kontak antar permukaan. Ketebalan film oli dikendalikan melalui struktur pori. Dengan adsorpsi oli yang tepat dan adanya pelepasan partikel dari komposit menyebabkan peningkatan koefisien gesek [62]. Mesh pada *filler* yang tidak terlalu tinggi dengan perendaman oli berkontribusi dalam peningkatan koefisien gesek dimana jika terlalu tinggi dapat memperhalus permukaan [63].

Kemudian yang terakhir yaitu spesimen FSB, data menunjukkan nilai koefisien gesek yang paling rendah. Penyebabnya karena serat bambu memiliki *oil absorption* yang cukup tinggi sehingga menyebabkan oli mudah terserap dan permukaan menjadi licin. Zat kimia pada oli menyebabkan material organik (serat bambu) menjadi mudah rapuh yang mengakibatkan kerusakan ikatan antarmuka [43]. Lapisan oli yang terbentuk pada permukaan hanya menjadi pelumas internal yang lebih mendominasi dibandingkan efek gesekan yang

diberikan oleh serat bambu. Argumen ini diperkuat dengan hasil yang menunjukkan semakin lama waktu perendaman, semakin rendah nilai koefisien geseknya.

Jika dibandingkan dengan referensi pembanding dan standar industri, koefisien gesek yang didapatkan tidak jauh berbeda. Maka hasil yang didapatkan ini cukup valid. Jika dilihat nilainya, dapat dikatakan kampas rem yang dikembangkan mempunyai kemampuan sebanding dengan produk industri, namun tidak bisa dikonfirmasi sepenuhnya karena standar tersebut tidak diketahui mengacu pada nilai koefisien gesek statis atau dinamis. Kemudian karena perendaman oli menunjukkan kontribusinya pada nilai koefisien gesek, maka ini juga menjadi pertimbangan karena referensi pembanding tidak melakukan simulasi tersebut. Maka dari itu disimpulkan jika nilai koefisien gesek spesimen CTSB dan FCT sebelum perendaman memiliki nilai koefisien gesek lebih rendah lagi. Berdasarkan analisis, rendahnya nilai koefisien gesek disebabkan karena tekanan kompaksi yang terlalu rendah. Analisis ini didukung oleh tingginya nilai porositas dan selisih yang besar antara densitas teori dan aktual. Maka dari itu tekanan kompaksi perlu ditingkatkan [55] (Sekitar 15-40 MPa) dengan batas standar karena jika terlalu tinggi kekerasan komposit akan meningkat sehingga permukaannya menjadi licin dan menghasilkan koefisien gesek yang rendah [64].

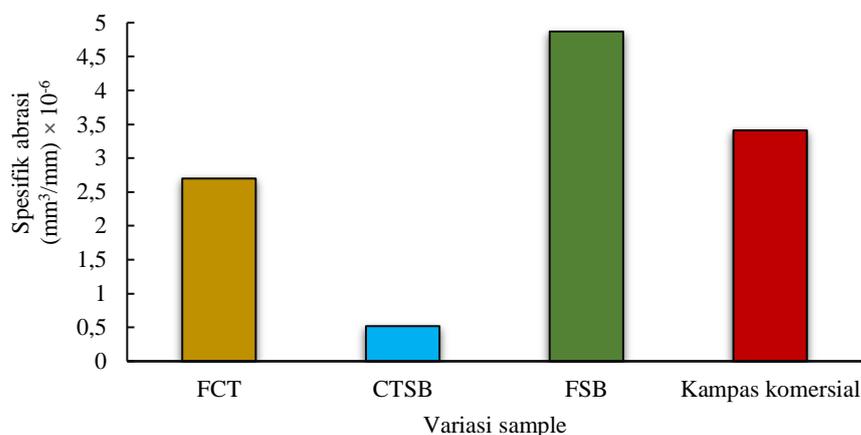
#### 4.6 Pengujian Laju Keausan

Berbeda dengan pengujian lainnya, pengujian laju keausan hanya diterapkan pada 3 spesimen dengan setiap variasi fraksi volume yang direndam selama 21 hari. Hasil pengujian laju keausan dengan metode uji ASTM G99 ditunjukkan pada Tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Data laju keausan kampas rem

Kode sampel	Spesifik abrasi	
	(mm <sup>3</sup> /mm)	(mm <sup>2</sup> /kg)
FCT	$2,699 \times 10^{-6}$	$1,296 \times 10^{-6}$
CTSB	$0,519 \times 10^{-6}$	$2,462 \times 10^{-7}$
FSB	$4,870 \times 10^{-6}$	$2,311 \times 10^{-6}$
Kampas rem komersial [7]	$3,41 \times 10^{-6}$	
Kampas rem Indoparts [65]		$6,748 \times 10^{-7}$

Berdasarkan hasil pengujian laju keausan yang didapatkan, dapat terlihat pada Tabel 4.7 spesimen CTSB memiliki tingkat laju keausan terbaik yakni sebesar  $0,519 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Kemudian diikuti oleh spesimen FCT yang memiliki tingkat laju keausan sebesar  $2,699 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Dan spesimen dengan tingkat laju keausan tertinggi didapatkan oleh spesimen FSB yaitu sebesar  $4,870 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Adapun hasil pengujian disajikan dalam bentuk skala grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6.



**Gambar 4.6** Laju keausan kampas rem

Rendahnya laju keausan pada spesimen CTSB disebabkan karena fraksi volume seimbang antara cangkang telur dan serat bambu. Serat bambu jika tidak dikombinasikan dengan cangkang telur maka meningkatkan porositas yang tinggi sehingga laju keausannya juga akan meningkat [13]. Karena *oil absorption* yang cukup rendah menyebabkan oli tertahan pada permukaan material sehingga terjadi fenomena tergelincirnya 2 permukaan yang menurunkan laju keausan [66]. Pada spesimen FSB menunjukkan porositas yang rendah namun keausan tertinggi dimana berdasarkan analisis akibat dari terpaparnya oli. Penyerapan oli yang berlebih akan meningkatkan keausan. Akibatnya kekuatan akan menurun akibat buruknya adhesi antara serat dan matriks [66]. Ketidaktepatan ikatan antara serat dan matriks inilah yang menyebabkan komposit kehilangan elemen penguatnya secara prematur sehingga laju keausannya besar. Kemudian karena paparan oli menyebabkan serat bambu menjadi rapuh karena terjadi kerusakan antarmuka. Kemudian

pada spesimen FCT memiliki kandungan *filler* yang terlalu tinggi tanpa adanya serat. Fenomena yang terjadi yaitu penumpukan *filler* dimana ini menyebabkan resin tidak dapat terserap ke seluruh bagian *filler*. Akibatnya komposit memiliki sifat getas dan mudah rapuh dan menimbulkan lubang-lubang kecil [67]. Dengan kombinasi fraksi volume yang seimbang antara serat dan *filler* akan menyebabkan pembentukan ikatan partikel yang sempurna pada serat dan *filler*. Selanjutnya ikatan partikel akan tercampur merata dengan matriks sehingga komposit akan memiliki tingkat kekerasan yang tinggi dan tidak mudah terabrasi [45].

Jika hasil pengujian dibandingkan dengan produk industri yang dijual secara komersial, maka tingkat laju keausan pada 2 spesimen diketahui memiliki nilai yang lebih rendah. Adapun 2 variasi spesimen yang memiliki nilai laju keausan yang lebih rendah adalah spesimen FCT dan CTSB. Diketahui jika kampas rem yang komersial memiliki tingkat keausan sebesar  $3,41 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/mm [7]. Sedangkan pada 2 spesimen yang di uji memiliki nilai laju keausan sebesar  $0,519 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/mm (FCT) dan  $2,699 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/mm (CTSB) dan 1 spesimen memiliki nilai laju keausan yang lebih tinggi yaitu sebesar  $4,870 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/mm (FSB). Kemudian perbandingan dengan produk Indoparts, terlihat hanya spesimen CTSB yang memiliki performa spesifik abrasif lebih baik. Sedangkan pada spesimen FCT dan FSB memiliki laju keausan lebih tinggi. Ini menunjukkan spesimen CTSB memiliki performa yang optimal walaupun terkena paparan oli. Berdasarkan perbandingan tersebut, maka spesimen CTSB dan FCT sudah layak digunakan jika didasarkan pada nilai laju keausan namun lebih disarankan menggunakan spesimen CTSB karena memiliki performa yang lebih baik.

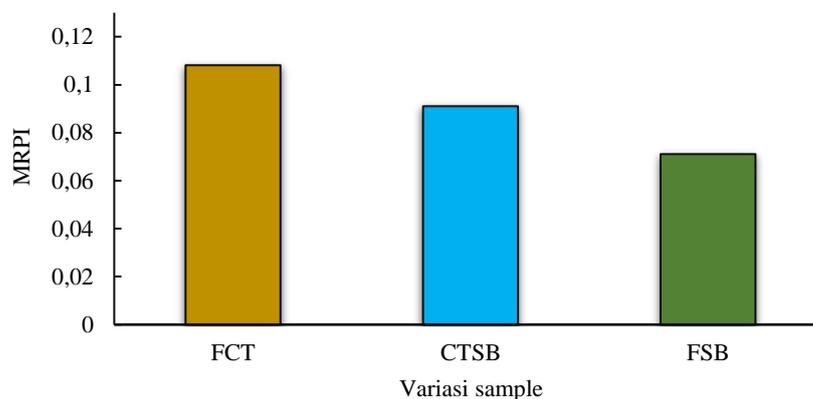
#### **4.7 Multi Response Performance Index**

Untuk memudahkan analisis dengan menggabungkan beberapa respon, maka digunakan *multi performance index*. Beberapa respon akan dikumpulkan dan disatukan menjadi respon tunggal sehingga didapatkan level optimalnya. Dengan metode penetapan bobot, didapatkan respon tunggal yang ditunjukkan pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8** *Multi response performance index* komposit kampas rem

Spesimen	MRPI	Ranking
FCT	0,108	1
CTSB	0,091	2
FSB	0,071	3

Terlihat dari Tabel 4.8 spesimen FCT memiliki MRPI tertinggi yaitu sebesar 0,108. Kemudian untuk urutan kedua yaitu spesimen CTSB dengan MRPI sebesar 0,091. Berdasarkan dua data CTSB dan FCT menunjukkan jika partikel cangkang telur cukup berkontribusi terhadap performa keseluruhan. Sedangkan untuk spesimen FSB menampilkan MRPI terendah sebesar 0,071 dimana ini menunjukkan performa yang kurang baik sebagai kampas rem. Adapun data Tabel 4.8 disajikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.7.

**Gambar 4.7** *Multi response performance index* spesimen kampas rem

Tingginya MRPI pada spesimen FCT menunjukkan performa yang baik berdasarkan pengujian fisik dan pengujian tribologinya. Spesimen FCT memiliki keunggulan pada densitas dan *oil absorption*, namun mengorbankan porositasnya. Untuk laju keausan dan koefisien geseknya, spesimen FCT ini memiliki nilai yang baik namun masih berada dibawah spesimen CTSB. Untuk spesimen CTSB menunjukkan kombinasi antara 2 material yang berbeda memberikan kontribusi terhadap sifat tribologinya dalam kondisi terkena paparan oli. Ini menandakan jika spesimen ini memiliki performa yang baik apabila terpapar zat kimia seperti oli. Kelemahan spesimen CTSB ini yaitu pada tingkat porositasnya yang tinggi sehingga nilai MRPI nya masih dibawah spesimen FCT. Dan untuk spesimen FSB hanya memiliki keunggulan pada

porositas yang rendah, sedangkan densitas, *oil absorption*, koefisien gesek, dan laju keausannya lebih lemah dibandingkan 2 spesimen lainnya. Akibatnya nilai MRPI spesimen FSB ini paling rendah dibandingkan yang lainnya. Berdasarkan data beberapa pernyataan diatas, maka dapat disimpulkan jika spesimen FCT dapat direkomendasikan sebagai alternatif baru material kampas rem yang ramah terhadap lingkungan dengan memanfaatkan limbah cangkang telur.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan beberapa tujuan yang ingin dicapai pada penelitian tugas akhir komposit kanvas rem ini, maka dapat disusun kesimpulan yang didasarkan pada hasil analisis dan pengujian yaitu sebagai berikut.

1. Setelah dilakukan 3 pengujian fisik pada 12 spesimen, dapat diketahui pengaruh dari fraksi volume antara partikel cangkang telur dan serat bambu terhadap sifat fisik. Adapun hasil analisis yang didapatkan sebagai berikut.
  - A. Pada perhitungan densitas aktual menunjukkan jika semakin tinggi kandungan partikel cangkang telur pada campuran, maka nilai densitas keseluruhan akan meningkat. Pada spesimen FCT didapatkan densitas rata-rata sebesar  $1,674 \text{ g/cm}^3$ . Kemudian pada spesimen CTSB didapatkan densitas rata-rata sebesar  $1,468 \text{ g/cm}^3$ , dan pada spesimen FSB didapatkan densitas rata-rata sebesar  $1,352 \text{ g/cm}^3$ . Data densitas aktual yang didapatkan sesuai dengan pernyataan densitas teoritis yaitu semakin tinggi fraksi volume partikel cangkang telur maka akan meningkatkan densitas keseluruhan.
  - B. Setelah dilakukan pengujian porositas, diketahui jika fraksi volume yang seimbang antara cangkang telur dan serat bambu pada komposit menyebabkan porositasnya meningkat dimana didapatkan nilai porositas 24,932%. Sedangkan pada spesimen FCT memiliki nilai porositas yang tinggi juga dengan tingkat porositas 24,785%, namun nilainya berada dibawah spesimen CTSB. Dan untuk spesimen FSB memiliki nilai porositas terendah dengan tingkat porositas 21,986%.
  - C. Pengujian *oil absorption* menunjukkan semakin tinggi fraksi volume serat pada campuran komposit maka akan meningkatkan *oil absorption*-nya. Didapatkan nilai *oil absorption* tertinggi pada spesimen FSB dengan fraksi volume serat bambu 25% yaitu sebesar 4,685%. Kemudian pada spesimen CTSB dengan fraksi volume serat bambu

12,5% didapatkan *oil absorption* sebesar 2,062%. Dan pada spesimen FCT didapatkan *oil absorption* terendah dimana tidak terkandung serat bambu yaitu sebesar 0,819%.

2. Didapatkan nilai koefisien gesek terbaik pada spesimen CTSB dengan nilai antara 0,463-0,499. Data menunjukkan semakin lama perendaman, nilai koefisien gesek semakin meningkat. Sama dengan spesimen CTSB, untuk spesimen FCT tren kenaikan koefisien gesek seiring lama perendaman oli dimana didapatkan nilai koefisien gesek 0,440-0,473. Sedangkan pada spesimen FSB menunjukkan jika semakin lama perendaman spesimen pada oli menurunkan koefisien geseknya. Maka dari itu pada spesimen FSB ini memiliki nilai koefisien gesek terendah sebesar 0,390-0,431.
3. Berdasarkan uji keausan dengan metode Ogoshi, diketahui jika spesimen CTSB memiliki tingkat laju keausan terendah sebesar  $0,519 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Kemudian pada spesimen FCT menunjukkan tingkat keausan yang lebih tinggi dibandingkan dengan CTSB yaitu sebesar  $2,699 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Dan untuk spesimen FSB memiliki tingkat keausan tertinggi dengan nilai  $4,870 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Berdasarkan data tersebut, diketahui jika fraksi volume serat bambu yang seimbang dengan partikel cangkang telur memiliki tingkat keausan yang baik.

## 5.2 Saran

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, terdapat beberapa aspek yang belum terlaksana dengan optimal. Oleh sebab itu, penulis memberikan beberapa saran guna mengoptimalkan penelitian selanjutnya. Adapun saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut.

1. Pengujian koefisien gesek yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode gesek statis. Untuk penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan menerapkan pengujian koefisien gesek kinetis.
2. Variasi tekanan kompaksi dapat dijadikan parameter penelitian selanjutnya agar diketahui tekanan kompaksi yang optimal untuk meminimalisir porositas pada spesimen.

3. Simulasi kondisi pada spesimen kampas rem dapat divariasikan lagi dengan mempertimbangkan faktor lingkungan seperti perubahan cuaca, paparan dari berbagai jenis cairan, dan fluktuasi temperatur tinggi.
4. pH oli sebelum perendaman spesimen dan setelah perendaman sebaiknya diukur terlebih dahulu untuk mengetahui reaksi kimia yang terjadi antara oli dengan material spesimen.
5. Dapat dipertimbangkan penambahan pengujian SEM (*scanning electron microscopy*) dan FTIR (*fourier transform infrared spectroscopy*) agar diketahui morfologi permukaan spesimen dan mengidentifikasi perubahan gugus fungsi kimia akibat perendaman oli.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Dzikrullah, Qomaruddin dan M. Khabib, “Analisis Gesekan Pengereman Hidrolis (Rem Cakram) Dan Tromol Pada Kendaraan Roda Empat Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *Seminar Nasional Teknologi dan Informatika*, p. 667, 2017.
- [2] G. Soebiyakto, “Pengaruh Jenis Kanvas Rem Dan Pembebanan Pedal Terhadap Putaran Output Roda Dan Laju Keausan Kanvas Rem Pada Sepeda Motor,” *Proton*, vol. 3, no. 2, 2011.
- [3] Suhardiman dan M. Syaputra, “Analisis Keausan Kampas Rem Non Asbes Terbuat Dari Komposit Polimer Serbuk Padi Dan Tempurung Kelapa,” *Jurnal Inovtek Polbeng*, vol. 7, no. 1, p. 210, November 2017.
- [4] A. S. Rifa'i dan E. Prayogi, “Analisis Laju Keausan Main Contact Strip Pantograf Kereta Pt Mrt Jakarta,” *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 2, no. 3, pp. 388-398, 2021.
- [5] P. Lumbantoruan dan E. Yulianti, “Pengaruh Suhu Terhadap Viskositas Minyak Pelumas (Oli),” *Sainmatika: Jurnal Ilmiah Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*, vol. 13, no. 2, pp. 26-34, Desember 2016.
- [6] P. I. Purboputro, “Pengembangan Bahan Kampas Rem Sepeda Motor dari Komposit Serat Bambu terhadap Ketahanan Aus Pada Kondisi Kering dan Basah,” *Urecol*, pp. 91-95, 2017.
- [7] R. Lusiani, Sunardi dan N. Purnama, “Studi Eksperimental Pengaruh Ukuran Partikel Serbuk Bambu Terhadap Sifat Mekanis Komposit Untuk Aplikasi Kampas Rem Sepeda Motor,” vol. 2, no. 2, November 2016.
- [8] F. Nugroho, “Effects Of Calsium Carbonat On Hardness And Wear Behaviour Of Brass-Epoxy Brake Lining Pad,” *Senatik*, vol. 5, p. 28, 10 Desember 2019.
- [9] A. A. Alhallaj, “Pemanfaatan Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Filler Kampas Rem Organik Non-Asbestos Menuju Transportasi Hijau,” Cilegon, 2024.

- [10] M. M. Elhafid, D. D. Susilo dan P. J. Widodo, "Pengaruh Bahan Kampas Rem Terhadap Respon Getaran Pada Sistem Rem Cakram," *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, vol. 12, no. 1, pp. 1-3, April 2017.
- [11] E. W. Saragih, M. R. Lubis, A. Wanto, Solikhun dan Jalaludin, "Rancang Bangun Sistem Rem Otomatis pada Kendaraan Menggunakan Sensor Ultrasonik," *Jurnal Penelitian Inovatif*, vol. 1, no. 2, p. 86, 2021.
- [12] F. Yudhanto, S. A. Dhewanto dan S. W. Yakti, "Karakterisasi Bahan Kampas Rem Sepeda Motor Dari Komposit Serbuk Kayu Jati," *Jurnal Quantum Teknika*, vol. 1, no. 1, p. 19, Oktober 2019.
- [13] Sunardi, D. Ariawan, E. Surojo, A. R. Prabowo, H. I. Akbar dan C. H. Wibowo, *Pengembangan Kampas Rem Organik Non-Asbestos dan Tantangan Lingkungan*, Yogyakarta: K-Media, 2024.
- [14] Sumiyanto, Abdunnaser dan A. N. Fajri, "Analisis Pengujian Gesek, Aus Dan Lentur Pada Kampas Rem Tromol Sepeda Motor," *Bina Teknika*, vol. 15, no. 1, pp. 50-52, 28 Juni 2019.
- [15] A. Markel, "Tomorrow's Tech," 1 Oktober 2006. [Online]. Available: <https://www.tomorrowstechnician.com/undercover-the-da-friction-code/>.
- [16] Rodiawan, Suhdi dan F. Rosa, "Analisis Sifat-Sifat Serat Alam Sebagai Penguat Komposit Ditinjau Dari Kekuatan Mekanik," *Turbo*, vol. 5, no. 1, p. 39, 2016.
- [17] J. Oroh, F. P. Sapupu dan R. Lumintang, "Analisis Sifat Mekanik Material Komposit Dari Serat Sabut Kelapa," *Poros*, vol. 1, no. 1, pp. 1-3, 2013.
- [18] F. L. N. Putri dan R. P. Nugroho, "Analisis Kandungan Kalsium Pada Serbuk Cangkang Telur Ayam Hasil Pengeringan dan Kalsinasi," *Docotral Dissertation, Akademi Farmasi Putera Indonesia Malang*, pp. 1-8, 2017.
- [19] R. P. Munirwan, Munirwansyah dan Marwan, "Penambahan Serbuk Cangkang Telur Sebagai Bahan Stabilisasi Pada Tanah Lempung," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 31-32, Mei 2019.

- [20] Noviyanti, Jasruddin dan E. H. Sujiono, "Karakterisasi Kalsium Karbonat (Ca(CO<sub>3</sub>)) Dari Batu Kapur Kelurahan Tellu Limpoe Kecamatan Suppa," *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, vol. 11, no. 2, pp. 169-172, 2015.
- [21] Supriadi, H. Susilo, S. Gunawan dan N. Saputra, "Analisis Pemanfaatan Serat Sabut Kelapa dan Serat Bambu pada Pembuatan Kampas Rem Komposit dengan Uji Mekanis," *Roda*, vol. 2, no. 1, pp. 52-60, Februari 2022.
- [22] C. Chen, H. Li, A. Dauletbek, F. Shen, D. Hui, M. Gaff, R. Lorenzo, I. Corbi, O. Corbi dan M. Ashraf, "Properties and Applications of Bamboo Fiber—A Current-State-of-the Art," *Journal of Renewable Materials*, vol. 10, no. 3, pp. 605-624, 2022.
- [23] F. Paundra, A. D. Setiawan, A. Muhyi dan F. Qalbina, "Analisis Kekuatan Tarik Komposit Hybrid Berpenguat Serat Batang Pisang Kepok dan Serat Pinang," *Nozzle: Journal Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 9-13, Januari 2022.
- [24] Aminur, M. Hasbi dan Y. Gunawan, "Proses Pembuatan Biokomposit Polimer Serat Untuk Aplikasi Kampas Rem," *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, pp. 2-6, November 2015.
- [25] G. Gundara, D. S. Robani dan A. Sambas, "Effect of Fiber Volume Fraction with Epoxy Matrix on Mendong Fiber Composite Material," *Mudima*, vol. 2, no. 7, p. 3009, 2022.
- [26] N. R. G. Pandiangan, A. A. Rosidah, Suheni dan H. Irawan, "Sifat Daya Serap Air dan Kekuatan Tarik Komposit Epoksi Berpenguat Serat Sabut Kelapa," *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan IV (SENASTITAN IV)*, pp. 1-7, 2 Maret 2024.
- [27] A. Doyan dan Humaini, "Sifat Optik Lapisan Tipis ZnO," *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*, vol. 3, no. 1, p. 34, 2017.
- [28] T. A. Sutrisno, I. K. A. Widi dan M. I. F. Rochim, "Analisis Kekuatan Tarik dan Foto Makro Patahan Komposit Serat Eceng Gondok Berpenguat ZnO," *Jurnal Flywheel*, vol. 13, no. 2, pp. 35-40, September 2022.

- [29] E. Widodo, A. Sumarno dan Ismadi, "Pembuatan Blok Rem Komposit Sebagai Pengganti Blok Rem Konvensional Pada Moda Transportasi Kereta Api Indonesia," *Rekayasa Sipil*, vol. 5, no. 1, pp. 30-32, Februari 2016.
- [30] Binyamin, A. S. Nurrokatyati, P. B. Bayu, S. F. Rahman dan B. W. Febriantoko, "Rekayasa Pembuatan Kampas Rem Berbahan Dasar Serbuk Tempurung Kelapa Bermatriks Phenolic Resin Terhadap Performa Gesek Pengereman," *Traksi*, vol. 19, no. 2, pp. 107-108, 2019.
- [31] M. Fawaid, Sunardi dan S. Hamdi, "Pengaruh Variasi Tekanan Kompaksi Terhadap Karakteristik Komposit Bahan Alternatif Kampas Rem Berpenguat Serat Bambu," *Prosiding Seminar Nasional Industrial Services III*, pp. 447-454, 8 Oktober 2013.
- [32] R. Saputra, Kardiman, D. T. Santoso dan A. I. Imran, "Analisis Sifat Mekanis dan Sifat Fisis pada Komposit Serat Sabut Kelapa Serat Bambu Matriks Epoxy sebagai Material Bumper Mobil," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 17, no. 1, pp. 37-48, April 2022.
- [33] A. P. Putra, I. Sujana dan R. A. Wicaksono, "Karakterisasi Pengaruh Ukuran Mesh 10, 20 dan 30 terhadap Sifat Mekanis dan Fisis Material Komposit Partikel Tandan Kosong Kelapa Sawit," *Jtrain : Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 19-26, 2021.
- [34] A. Saidah, S. E. Susilowati dan Y. Nofendri, "Pengaruh Fraksi Volume Serat Terhadap Kekuatan Mekanik Komposit Serat Jerami Padi Epoxy dan Serat Jerami Padi Resin Yukalac 157," *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur UNJ*, vol. 5, no. 2, pp. 96-101, Oktober 2018.
- [35] C. B. Cunha, P. Lopes, M. FD dan R. Hoffman, "Assessment Of Chemical and Mechanical Properties of Polymers Aiming to Replace the Stainless Steel in Distillation Column," *Materials Reseach*, vol. 21, no. 3, p. e20170679, 2018.
- [36] Z. Fuadi dan D. Rahmadiawan, *Tribologi Pelumasan: Pelumas Terbaru*, M. K. Muchamad, Penyunt., Aceh, Banda Aceh: Syiah Kuala University Press, 2023, pp. 1-14.

- [37] E. Gultom dan Y. Kaelani, "Studi Eksperimen dan Analisis Laju Keausan Material Alternatif pada Sepatu Rem Lokomotif," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, p. 911, 2017.
- [38] A. U. Prastyo, Hermawan, Pradika, E. Salsabila, F. C. Sari dan Kurniawanti, "Eksperimen Gaya Gesek Pada Bidang Miring Untuk Menguji Koefisien Gesek Statis Dan Kinetis," *Journal of Industrial Engineering*, vol. 1, no. 1, p. 2, Desember 2021.
- [39] C. D. Munthe, A. L. Syifa dan B. Setiaji, "Analisis Pengaruh Variasi Massa Terhadap Koefisien Gesekan Pada Media Kayu," *Journal of Physics and Science Learning*, vol. 08, no. 1, pp. 21-22, Juni 2024.
- [40] Sunardi, H. L. R. Susanto, I. Saefuloh, N. H. A. Akbar dan M. Fawaid, "Pengaruh perendaman bambu dengan air laut terhadap kekerasan dan laju keausan komposit kanvas rem," *Turbo*, vol. 12, no. 1, pp. 80-86, 2023.
- [41] I. N. P. Kadek Rihendra Dantesl Nugraha, E. Elisa dan I. P. H. Yudistira, "Analisis Pengaruh Variasi Waktu Perlakuan Alkali Terhadap Kekuatan Impactkomposit Polyesteryang Diperkuat Serat Bambu," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 2, pp. 393-399, 2023.
- [42] F. H. Kurniawan, "Pengaruh Tumpahan Bahan Bakar Minyak Dan Oli Terhadap Kinerja Campuran Lataston-Wc Dengan Menggunakan Metode Marshall," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 2, no. 32355-374X, pp. 554-555, September 2014.
- [43] A. Nurhidayat, "Kajian Pengaruh Media Perendaman Terhadap Ketangguhan Impak Komposit Hdpe Limbah-Cantula Sebagai Bahan Panel Ramah Lingkungan," *Prosiding SNST*, pp. 72-74, 2015.
- [44] W. B. Utomo dan N. S. Drastiawati, "Pengaruh Variasi Jenis Core, Temperatur Curing Dan Post-Curing Terhadap Karakteristik Bending Komposit Sandwich Serat Karbon Dengan Metode Vacuum Infusion," *JTM*, vol. 09, no. 2, p. 46, 2021.
- [45] I. Chanra, "Pengaruh Variasi Ukuran Partikel Serbuk Dan Serat Bambu Dengan Serbuk Seng (Zn) Sebagai Penguat Terhadap Karakteristik Komposit

Kampas Rem Sepeda Motor,” Repository Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, 2017.

- [46] D. P. Rangga, Hartono, Priyagung dan M. Basjir, “Analisis Pengaruh Serbuk Cangkang Telur Dan Serat Tebu Sebagai Komposit Terhadap Sifat Mekanis,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 18, no. 5, p. 57, 2023.
- [47] A. Ratmanto, W. W. Raharjo dan T. Triyono, “Pengaruh Tekanan Pengepresan Terhadap Kekuatan Bending Komposit rHDPE Cantula,” *Prosiding Sains Nasional dan Teknologi*, vol. 1, no. 1, pp. 47-49, 2016.
- [48] A. S. Ismail, M. Jawaid, N. H. Hamid, R. Yahaya, A. Hassan, M. Asim dan A. Supian, “Effect of Curing Temperature on Mechanical Properties of Bio-Phenolic/Epoxy Polymer Blends,” *Research Square*, pp. 1-18, 14 May 2021.
- [49] M. Dzulfikar, R. Lumbanraja dan S. B. Respati, “Analisis Kekuatan Fisik Komposit Karbon Sanwich Honeycomb Chasis Mobil Hemat Energi Tipe Prototype,” *Momentum*, vol. 18, no. 1, pp. 80-85, April 2022.
- [50] S. A. Rahmawaty, A. W. Y. P. Parmita dan A. D. Laksono, “Analisis Kekuatan Tarik dan Tekuk pada Komposit Fiberglass-Polyester Berpenguat Serat Gelas dengan Variasi Fraksi Volume Serat,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 5, no. 3, pp. 146-155, Oktober 2021.
- [51] M. A. Adriyanto, “Pengaruh Komposisi Cangkang Kelapa Sawit Dan Serat Bambu Terhadap Sifat Fisik Dan Sifat Termal Kampas Rem Non Asbestos,” UNTIRTA, Cilegon, 2024.
- [52] E. Y. D. Syaputra, “Karakterisasi Komposit Resin Epoksi Berpenguat Serat Ampas Tebu Untuk Aplikasi Kampas Rem Bebas Asbestos,” Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2019.
- [53] Julidas dan S. Ringo, “Pembuatan Kampas Rem Komposit Berbahan Selulosa Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Metode Cetakan (Casting),” Politeknik LPP, Yogyakarta, 2021.
- [54] Sunardi, D. Ariawan, E. Surojo, A. E. Prabowo, T. G. Ghazijahani, C. H. Wibowo dan H. I. Akbar, “Tribological Performance of Polymer Composite Modified with Calcined Eggshell Particles Post High-Temperature Exposure,” *Emerging Science Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1280-1292, 2024.

- [55] Sunardi, S. Hamdi, I. Saefuloh, A. Sudrajad, S. Ula dan M. Fawaid, "Perilaku Laju Keausan dan Kekerasan Komposit Epoksi yang Diperkuat dengan Serat Gelas dan Partikel Bambu," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 21, no. 2, pp. 64-72, Oktober 2024.
- [56] P. Delvaux, L. Desrosiers dan A. Roy, "Organic Friction Material Composition For Use To Produce Friction Linings," *U.S. Patent*, 5 Oktober 1993.
- [57] N. A. Ademoh dan O. I. Adeyemi, "Development and Evaluation of Maize Husks (Asbestos-Free) Based Brake Pad," *Industrial Engineering Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 67-80, 2015.
- [58] Sunardi, D. Ariawan, E. Surojo, A. R. Prabowo, C. H. Wibowo, H. I. Akbar, A. Sudrajad dan H. Seputro, "Dimensional stability of brake pads reinforced with calcined eggshell particles under exposed to engine lubricating oil," *BIO Web of Conferences*, pp. 1-6, 2024.
- [59] T. Vaisanen, O. Das dan L. Tomppo, "A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites," *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 582-596, 15 April 2017.
- [60] Syawaluddin dan I. A. Setiawan, "Perbandingan Pengujian Mekanis Terhadap Kampas Rem Asbes Dan Non-Asbestos Dengan Melakukan Uji Komposisi, Uji Kekerasan, Dan Uji Keausan," *Sintek Jurnal: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 2, no. 2, pp. 1-10, 2008.
- [61] S. G. Amaren, D. Yawas dan S. Aku, "Effect of periwinkles shell particle size on the wear behavior of asbestos free brake pad," *Results in Physics*, vol. 3, pp. 109-114, 2013.
- [62] K. H. Lo, S. Qu dan S. S. Wang, "A Mechanism-Based General Theory for Friction of PTFE/PEEK Composite: Effects of PTFE Morphology and Composite Microstructure," *Journal of Tribology*, vol. 144, no. 8, p. 081702, Februari 2022.
- [63] P. I. N. M. Purboputro, "Pembuatan Kampas Rem Menggunakan Variasi Butiran Mesh Aluminium Silicon (Al-Si) 50, 60, 100 Dengan Serbuk Kayu

- Jati Terhadap Nilai Tingkat Kekerasan, Keausan Dan Koefisien Gesek,” *Media Mesin: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 21, no. 1, pp. 35-45, 2020.
- [64] F. Marentiko, Luqyana, Dhiya, V. Rizkia dan Muslimin, “Karakteristik Sifat Mekanik pada Pembuatan Komposit Terhadap Performa Kampas Rem Non-Asbestos,” *Jurnal Mekanik Terapan*, vol. 05, no. 03, pp. 160-167, 2024.
- [65] M. T. N. Fuad dan H. Yudiono, “Wear Analysis of Motorcycle Brake Pads Composite From Wood Apple,” *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, vol. 10, no. 1, pp. 55-62, Maret 2022.
- [66] O. J. Gbadeyan, T. P. Mohan dan K. Kanny, “Mechanical and the effect of oil absorption on tribological properties of carbon based brake pad material,” *Tribologia*, vol. 38, pp. 22-34, 2021.
- [67] M. D. Ananta, “Analisis Karakteristik Keausan Material Dengan Matriks Resin Menggunakan Filler Serat Bambu Dan Pasir Besi Untuk Aplikasi Kampas Rem,” *Tugas Artikel Ilmiah Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan (STTKD)*, pp. 1-14, 2023.

**LAMPIRAN A**  
**PERHITUNGAN**

## A.1 Perhitungan *Rules of Mixture*

1. Didapatkan data densitas dari setiap material yaitu sebagai berikut:

A. Cangkang telur =  $2,571 \text{ g/cm}^3$

B. Serat bambu =  $0,60 \text{ g/cm}^3$

C. ZnO =  $5,606 \text{ g/cm}^3$

D. Resin epoksi =  $1,20 \text{ g/cm}^3$

E. *Alumina powder* =  $3,93 \text{ g/cm}^3$

F. *Graphite powder* =  $2,26 \text{ g/cm}^3$

2. Menghitung volume silinder

Dimensi spesimen: Tebal (h) = 1,5 cm

Jari-jari (r) = 1,35 cm

Persamaannya  $V = h \times \pi \times r^2$

$$V = 1,5 \times \pi \times 1,35^2 = 8,59 \text{ cm}^3$$

3. Menghitung *rules of mixture*

Persamaan yang digunakan  $m = \rho \times V \times v_f$

A. Spesimen FCT

- Cangkang telur (25%) =  $2,571 \times 8,59 \times \frac{25}{100} = 5,521 \text{ gram}$

- Serat bambu (0%) =  $0,60 \times 8,59 \times \frac{0}{100} = 0 \text{ gram}$

B. Spesimen CTSB

- Cangkang telur (12,5%) =  $2,571 \times 8,59 \times \frac{12,5}{100} = 2,761 \text{ gram}$

- Serat bambu (12,5%) =  $0,60 \times 8,59 \times \frac{12,5}{100} = 0,644 \text{ gram}$

C. Spesimen FSB

- Cangkang telur (0%) =  $2,571 \times 8,59 \times \frac{0}{100} = 0 \text{ gram}$

- Serat bambu (25%) =  $0,60 \times 8,59 \times \frac{25}{100} = 1,288 \text{ gram}$

D. Bahan lainnya

- Alumina (10%) =  $3,93 \times 8,59 \times \frac{10}{100} = 3,376 \text{ gram}$

- Epoksi (50%) =  $1,20 \times 8,59 \times \frac{50}{100} = 5,154 \text{ gram}$

- ZnO (5%) =  $5,606 \times 8,59 \times \frac{5}{100} = 2,408 \text{ gram}$

- Grafit (10%) =  $2,26 \times 8,59 \times \frac{10}{100} = 1,941 \text{ gram}$

## A.2 Perhitungan NaOH 5%

Perbandingan antara serat dengan cairan yaitu 1:13

Diketahui = Serat bambu yang direndam sebanyak 15,5 gram

= Persentase NaOH 5%

- Menghitung berat total cairan yang dibutuhkan

$$13 \times 15,5 \text{ gram} = 201,5 \text{ gram}$$

- Menghitung takaran soda api

$$5\% \times 13 \times 15,5 = 10,075 \text{ gram}$$

- Menghitung takaran aquades

$$95\% \times 13 \times 15,5 = 191,425 \text{ gram}$$

## A.3 Perhitungan Densitas

1. Densitas teoritis

Persamaan untuk menghitung densitas teoritis sebagai berikut.

$$\rho_{th} = \rho_{ct} \times v_{ct} + \rho_{sb} \times v_{sb} + \rho_{ZnO} \times v_{ZnO} + \rho_{al} \times v_{al} + \rho_{gr} \times v_{gr} + \rho_{re} \times v_{re}$$

Contoh menghitung densitas teoritis spesimen CTSB

$$\rho_{th} = 2,571 \times 12,5 + 0,6 \times 12,5 + 5,606 \times 5 + 3,93 \times 10 + 2,26 \times 10 + 1,2 \times 50$$

$$\rho_{th} = 1,896 \text{ g/cm}^3$$

2. Densitas aktual

Persamaan untuk menghitung densitas aktual  $d = \frac{m_1}{V}$

$$d = \frac{12,14}{6,707} = 1,810 \text{ g/cm}^3$$

## A.4 Perhitungan Porositas

Untuk menghitung porositas digunakan persamaan berikut.

$$V(\%) = 100 \frac{(T_d - M_d)}{T_d}$$

Diketahui : Densitas teoritis = 2,226 g/cm<sup>3</sup>

Densitas aktual = 1,810 g/cm<sup>3</sup>

Jawab :  $V(\%) = 100 \frac{(2,226 - 1,810)}{2,226} = 18,684\%$

### A.5 Perhitungan *Oil absorption*

Untuk menghitung persentase *oil absorption* digunakan persamaan berikut.

$$OA = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

$$\text{Diketahui : } m_1 = 12,14$$

$$m_2 = 12,25$$

$$\text{Jawab : } OA = \frac{12,25 - 12,14}{12,14} \times 100$$

$$OA = 0,906\%$$

### A.6 Perhitungan Koefisien Gesek

Untuk menghitung koefisien gesek digunakan persamaan berikut.

$$\mu = \frac{m_2}{m_1}$$

$$\text{Diketahui : } m_1 \text{ (gram)} = 98,1$$

$$m_2 \text{ (gram)} = 43,2$$

$$\text{Jawab : } \mu = \frac{43,2}{98,1}$$

$$\mu = 0,440$$

### A.7 Perhitungan Laju Keausan

Untuk menghitung spesifik abrasi digunakan persamaan berikut.

$$W_S = \frac{B \times b^3}{8 \times r \times P \times x}$$

$$\text{Diketahui : } B \text{ (Tebal cincin)} = 3 \text{ mm}$$

$$b \text{ (Lebar jejak rata-rata)} = 2,54 \text{ mm}$$

$$r \text{ (Jari-jari cincin)} = 15 \text{ mm}$$

$$P \text{ (Beban)} = 3,16 \text{ kg}$$

$$x \text{ (Jarak luncur)} = 100000 \text{ mm}$$

$$\text{Jawab : } W_S = \frac{3 \times 2,54^3}{8 \times 15 \times 3,16 \times 100000}$$

$$W_S = 1,296 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{kg}$$

### A.8 Perhitungan Tekanan Kompaksi

Untuk menghitung tekanan kompaksi yang diterima oleh spesimen digunakan persamaan berikut.

$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = P \times A$$

$$= P_1 \times A_1 = P_2 \times A_2$$

$$P_1 = \frac{P_2 \times A_2}{A_1}$$

Diketahui : A1 (Luas penampang hidrolis) = 4,909 cm<sup>2</sup>

A2 (Luas penampang komposit) = 5,725 cm<sup>2</sup>

P2 (Tekanan kompaksi) = 50.986 kg/cm<sup>2</sup>

Jawab :  $P_1 = \frac{50.986 \text{ kg/cm}^2 \times 5,725 \text{ cm}^2}{4,909 \text{ cm}^2}$

$P_1 = 59,461 \text{ kg/cm}^2 = 58,311 \text{ bar}$

**LAMPIRAN B**  
**DATA HASIL PENELITIAN**

## B.1 Data Hasil Pengujian

**Tabel B.1** Data hasil pengujian densitas

Kode sampel	Diameter (cm)	Tebal (cm)	Volume ( $cm^3$ )	Massa (gr)	Densitas ( $g/cm^3$ )
FCT	2,684	1,186	5,989	12,14	1,810
	2,668	1,4	7,309	14,87	1,901
	2,732	1,522	6,739	13,63	1,528
	2,89	1,584	7,510	15,14	1,458
Rata-rata					1,674
CTSB	2,672	1,33	6,625	12,27	1,646
	2,67	1,682	7,605	14,09	1,497
	2,666	1,598	7,019	12,98	1,456
	2,684	1,632	6,735	12,4	1,344
Rata-rata					1,486
FSB	2,704	1,522	8,266	13,72	1,571
	2,74	1,822	8,187	13,5	1,257
	2,722	1,602	7,702	12,76	1,369
	2,718	1,692	7,208	11,88	1,211
Rata-rata					1,352

**Tabel B.2** Data hasil pengujian porositas

No. sample	Densitas teoritis ( $g/cm^3$ )	Densitas aktual ( $g/cm^3$ )	Porositas (%)
1	2,142	1,810	15,495
2		1,901	11,259
3		1,528	28,644
4		1,458	31,941
Rata-rata			21,835
1	1,896	1,646	13,182
2		1,497	21,050
3		1,456	23,216
4		1,344	29,136
Rata-rata			21,646
1	1,649	1,571	4,756
2		1,257	23,758
3		1,369	16,953
4		1,211	26,578
Rata-rata			18,011

**Tabel B.3** Data hasil pengujian *oil absorption*

Kode sample	Berat awal (gram)	Berat akhir (gram)	<i>Oil absorption</i> (%)
	12,14	12,25	0,906
	14,87	14,93	0,403

FCT	13,63	13,79	1,174
	15,14	15,26	0,793
Rata-rata			0,819
CTSB	12,27	12,46	1,548
	14,09	14,21	0,852
	12,98	13,31	2,542
	12,4	12,81	3,306
Rata-rata			2,062
FSB	13,72	13,9	1,312
	13,5	14,51	7,481
	12,76	13,17	3,213
	11,88	12,68	6,734
Rata-rata			4,685

**Tabel B.4** Data Hasil pengujian koefisien gesek

Fraksi volume	Lama perendaman (hari)	$m_1$ (gram)	$m_2$ (gram)	Koefisien gesek ( $\mu$ )
FCT	7	98,1	43,2	0,440
	14	95,5	43,9	0,460
	21	97,7	46,2	0,473
CTSB	7	90,3	41,8	0,463
	14	93,8	43,5	0,464
	21	93,8	46,8	0,499
FSB	7	93,2	40,2	0,431
	14	95,2	39	0,409
	21	95,3	37,2	0,390

**Tabel B.5** Data hasil perhitungan MRPI

Spesimen	$DT \cdot W_{DT}$ (P)	$PS \cdot W_{PS}$ (Q)	$DSA \cdot W_{DSA}$ (R)	$KG \cdot W_{KG}$ (S)	$LK \cdot W_{LK}$ (T)	MRPI
FCT	0,624	6,777	0,521	0,164	$3,996 \times 10^{-7}$	0,108
CTSB	0,480	6,777	0,521	0,183	$3,996 \times 10^{-7}$	0,091
FSB	0,407	6,777	0,521	0,112	$3,996 \times 10^{-7}$	0,071

**LAMPIRAN 3**  
**DOKUMENTASI PENELITIAN**

		
<p>Kompaksi spesimen sebesar 5 MPa</p>	<p>Penimbangan bahan-bahan</p>	<p>Perlakuan alkali serat bambu</p>
		
<p>Penjemuran serat bambu setelah proses alkali</p>	<p>Penjemuran spesimen setelah proses kompaksi</p>	<p>Perendaman spesimen ke wadah berisi oli</p>
		
<p>Pengujian koefisien gesek</p>	<p><i>Curing</i> spesimen menggunakan oven</p>	