

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 mm²/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 mm²/kg. Kedua nilai tersebut masih lebih tinggi dibandingkan dengan nilai keausan kampas rem yang umum ditemukan yaitu sebesar 0,00014 mm²/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 (mm³/mm) × 10⁻⁶ 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.

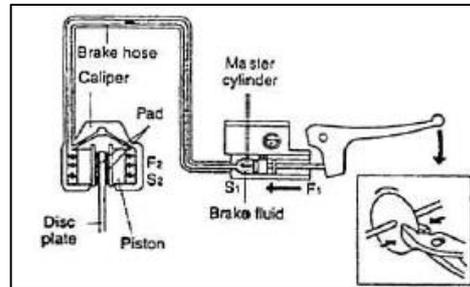
Lalu untuk komposisi kalsium karbonat yang berasal dari cangkang telur ini dapat mempengaruhi kekerasan dan keausan dari *pad* pelapis rem *brass-epoxy*. Hasil pengujian yang dilakukan Nugroho [8] menunjukkan jika semakin tinggi penggunaan kalsium karbonat dalam bahan campuran kampas rem maka akan membuat 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 pengemudi [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 (CaCO_3) 98,34%, magnesium karbonat (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°C . Sedangkan untuk titik didihnya berada pada temperatur 2977°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 ³	1,17
<i>Water absorption</i> (suhu ruangan)	°C	0,2
<i>Tensile strength</i>	kgf/mm ²	5,95
<i>Compressive strength</i>	kgf/mm ²	14
<i>Flexural strength</i>	kgf/mm ²	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.

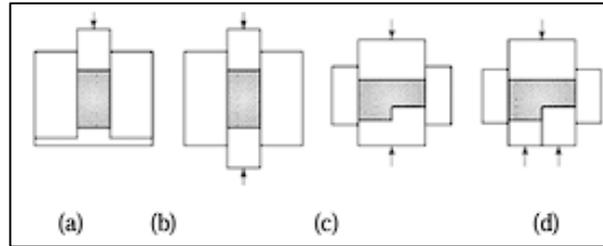


Gambar 2.8 Grafit

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.

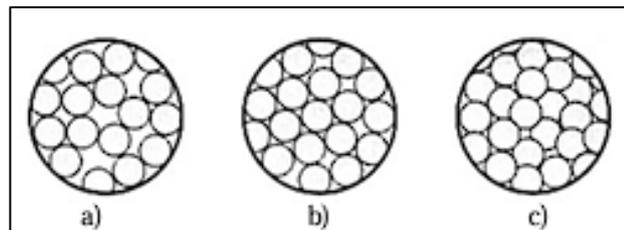
2.6 Kompaksi

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 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:

ρ_{th} = Densitas teoritis (g/cm^3)

ρ_n = Densitas masing-masing bahan (g/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 (g/cm^3)

m_1 = Massa (gram)

V = Volume (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 (g/cm^3)

M_d = Densitas aktual (g/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 (mm^2/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 (μ). 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 (μ)					
	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 (μ) = 1. Sedangkan pada bidang yang sangat halus nilai koefisien geseknya (μ) = 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 kompatibilitas 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.