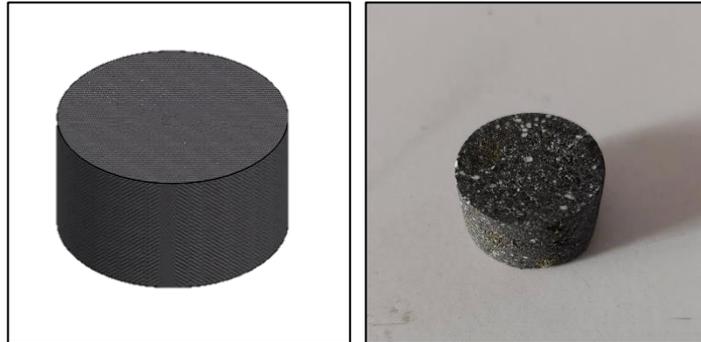


## BAB IV

### 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

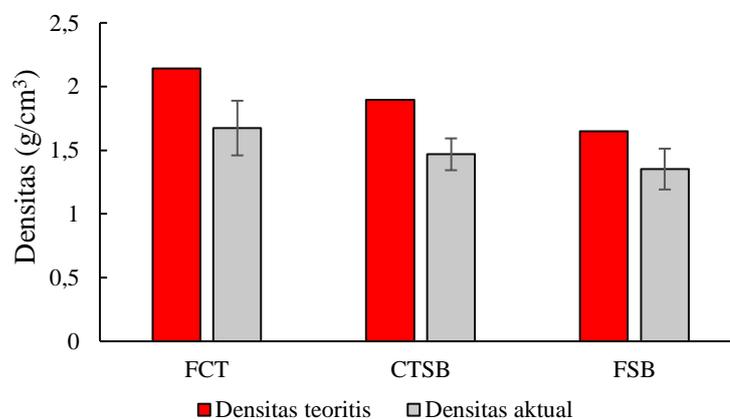
Pada Tabel 4.5 menunjukkan spesimen dengan densitas tertinggi yaitu pada spesimen FCT. Ini menjelaskan jika cangkang telur memiliki kepadatan yang lebih tinggi dibandingkan serat bambu. Ketika fraksi volume seimbang antara partikel cangkang telur dan serat bambu, densitas menjadi turun 0,246 g/cm<sup>3</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

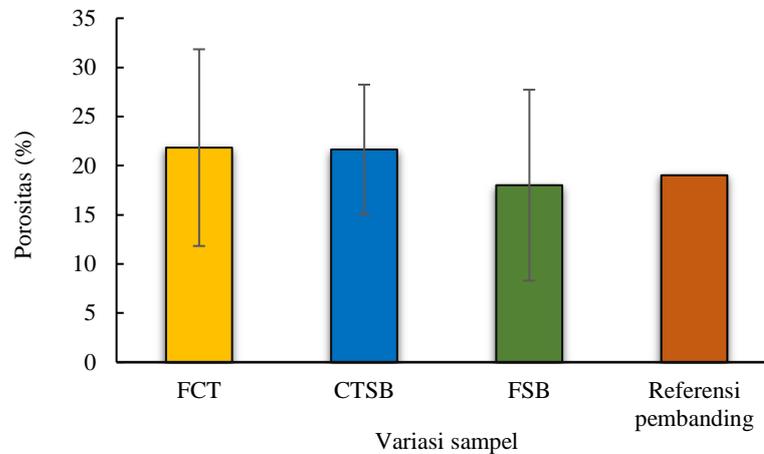
Pengujian porositas pada semua spesimen dilakukan untuk mengetahui persentase rongga yang terdapat pada komposit kampas rem. Untuk menentukan porositas sampel, perlu diketahui densitas teoritis dan densitas aktual dari spesimen. Semakin jauh perbandingan nilai densitas teoritis dengan aktual, maka persen 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].

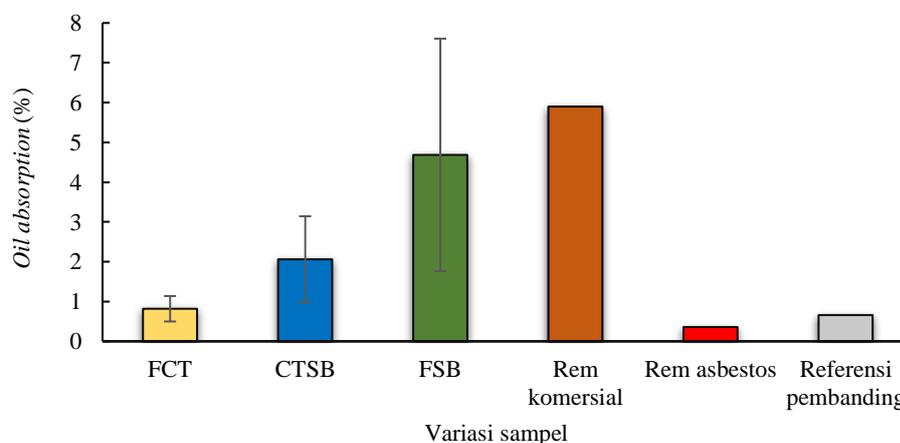
#### 4.4 Data Hasil Pengujian *Oil Absorption*

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

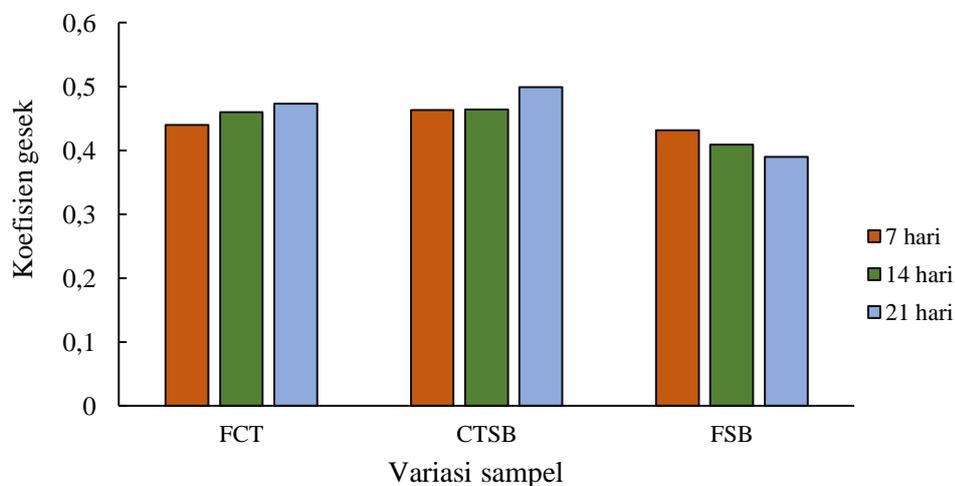
Dilakukan salah satu jenis pengujian tribologi ini untuk mengetahui tingkat koefisien gesek dari permukaan spesimen kampas rem. Berdasarkan data yang didapatkan, maka akan diketahui pengaruh dari lama waktu perendaman oli terhadap nilai koefisien geseknya. Dengan data tersebut akan diketahui juga komposisi 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].

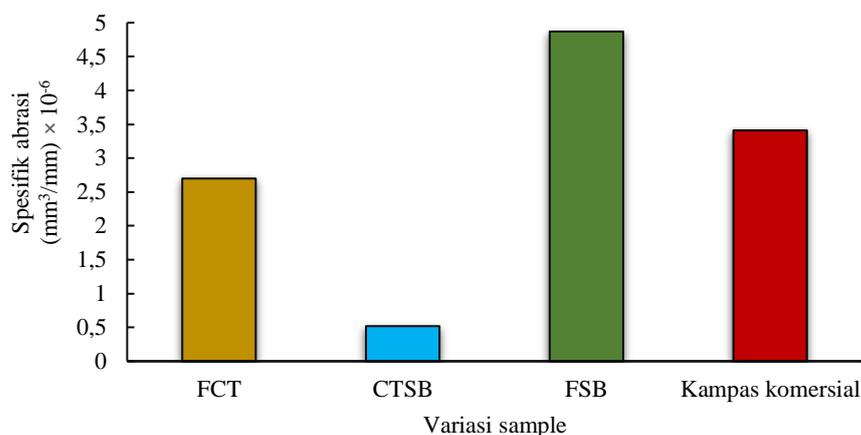
#### 4.6 Pengujian Laju Keausan

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 kanvas 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.

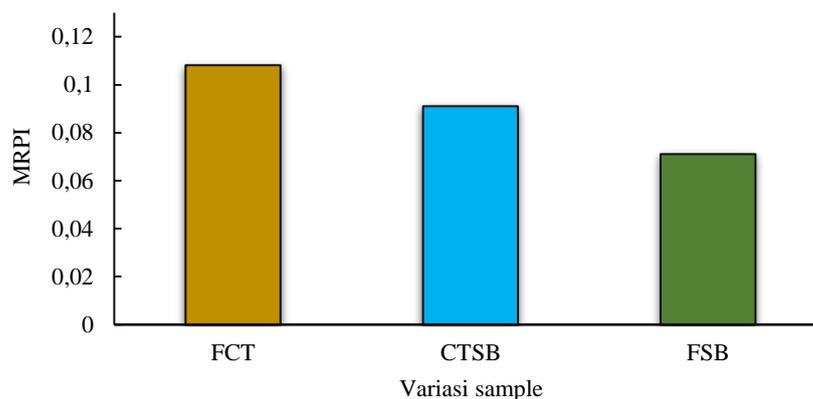
#### **4.7 Multi Response Performance Index**

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.