

PENGARUH UKURAN PARTIKEL DAN KOMPOSISI CANGKANG KELAPA SAWIT TERHADAP PERFORMA KOMPOSIT KAMPAS REM BERBASIS EPOKSI

Putri Pratiwi¹, Nurzal¹, Mastariyanto Perdana^{2*}

¹Program Studi Teknik Mesin Sarjana, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Padang

²Program Studi Teknik Mesin Diploma, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Padang

E-mail : mastariyanto.perdana@gmail.com

Masuk : 3 Februari 2025

Direvisi : 14 Maret 2025

Disetujui : 28 Maret 2025

Abstrak: Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menggunakan serbuk cangkang sawit (PKS) sebagai penguat dalam komposit berbasis bahan alami, untuk menghasilkan material kampas rem yang ramah lingkungan. Serbuk PKS dikombinasikan dengan resin epoksi dalam lima rasio fraksi volume yang berbeda: 70:30, 67,5:32,5, 65:35, 62,5:37,5, dan 60:40 %vol. Setiap kombinasi rasio terdiri dari lima jenis ukuran partikel (250–1190 μm). Sifat fisik yang dievaluasi dalam penelitian ini adalah densitas, sedangkan sifat mekanisnya adalah kekerasan dan kekuatan geser. Hasilnya menunjukkan bahwa perubahan komposisi tidak secara signifikan mempengaruhi densitas, sedangkan ukuran partikel memiliki dampak yang lebih nyata. Secara umum, peningkatan jumlah serbuk PKS dalam material komposit cenderung meningkatkan kekerasan dan kekuatan geser material komposit. Nilai kekerasan dan kekuatan geser tertinggi masing-masing adalah 23,4 Kgf/mm² dan 4,143 MPa, yang dicapai oleh komposit dengan komposisi serbuk PKS tertinggi (70:30%) dan ukuran partikel terbesar (841–1190 μm). Namun, nilai-nilai ini masih dibawah persyaratan standar untuk bantalan rem berdasarkan SAE J661. Oleh karena itu, optimasi lebih lanjut diperlukan untuk mencapai kinerja mekanis yang memenuhi standar industri.

Kata kunci: cangkang kelapa sawit, komposit, kampas rem, densitas, kekerasan, tegangan geser

Abstract: The objective of this research was to use palm kernel shell (PKS) powder as a reinforcement in natural material-based composites, to produce environmentally friendly brake pad materials. PKS powder was combined with epoxy resin in five different volume ratios: 70:30, 67.5:32.5, 65:35, 62.5:37.5, and 60:40 %vol. Each ratio combination consisted of five types of particle sizes (250–1190 μm). The physical properties evaluated in this study were density, while the mechanical properties were hardness and shear strength tests. The results indicated that changes in volume composition did not significantly affect the density, whereas particle size had a more noticeable impact. Generally, an increasing amount of PKS in composite materials tends to increase both the hardness and shear strength of the material. The highest hardness and shear strength values were 23.4 Kgf/mm² and 4.143 MPa, respectively, achieved by the composite with the highest PKS composition (70:30%) and the largest particle size (841–1190 μm). However, these values are still below the standard requirements for brake pads based on SAE J661. Therefore, further optimization is required to achieve mechanical performance meeting industry standards.

Keywords: palm kernel shell, composites, brake pad, density, hardness, shear strength.

PENDAHULUAN

Kendaraan bermotor telah menjadi kebutuhan utama masyarakat dalam beraktivitas harian, dalam kehidupan modern saat ini. Di balik mobilitas yang tinggi, sistem pengereman memegang peran penting dalam menjamin keselamatan para penggunanya. Kampas rem bekerja dengan cara menghasilkan gesekan terhadap cakram untuk mengurangi kecepatan kendaraan [1]. Karakteristik fisis dan mekanik dari material kampas rem, seperti densitas, kekuatan tarik, kekerasan, kekuatan geser dan koefisien gesek, menjadi bagian penting dari parameter utama dalam penentuan kinerja dan keamanan dari kampas rem ini [2].

Kampas rem biasanya dihasilkan dari bahan yang mengandung logam berat, resin sintesis dan bahan abrasif seperti asbes. Penggunaan bahan-bahan ini dalam jangka waktu yang lama diketahui dapat menimbulkan berbagai masalah lingkungan maupun kesehatan. Beberapa penelitian menyatakan, asbes terbukti dapat memicu penyakit pernapasan kronis dan dikenal sebagai material karsinogenik karena dapat memicu kanker [3]. Selain itu, limbah kampas rem yang mengandung logam adalah salah satu faktor penyumbang pencemaran partikel berat yang sulit terurai di lingkungan. Hal ini tentunya sangat mengkhawatirkan karena dapat merusak alam dan membahayakan bagi kelangsungan hidup manusia [4]. Oleh karena itu, material yang lebih aman, berkelanjutan dan mudah terurai sangat dibutuhkan sebagai alternatif pengganti kampas rem berbasis logam berat ini.

Dalam beberapa tahun terakhir, para peneliti berlomba-lomba untuk mencari alternatif material menggantikan material sintesis dengan bahan alami yang berasal dari limbah biomassa dalam berbagai aplikasi keteknikkan, termasuk kampas rem. Salah satu limbah biomassa yang sangat menjanjikan adalah cangkang kelapa sawit (*Palm Kernel Shell/PKS*). Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia. Indonesia menghasilkan lebih dari 45 juta ton tandan buah segar per tahun, dengan limbah cangkang sawit mencapai lebih dari 5 juta ton [5]. Sayangnya, limbah ini sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal, walaupun diketahui memiliki kekerasan tinggi, struktur mikro yang padat, dan ketahanan panas yang baik untuk aplikasi mekanis [6].

Resin epoksi sering digunakan sebagai matriks dalam pembuatan material komposit. Diketahui bahwa material ini memiliki sifat mekanik yang kuat, ketahanan kimia yang baik, dan kemampuan adhesif yang baik terhadap berbagai jenis penguat (*reinforcement*) [7]. Komposit yang dihasilkan dari penggabungan epoksi dan serbuk PKS dianggap dapat menghasilkan material komposit yang kuat, ringan dan ramah lingkungan. Selain itu, penggunaan serbuk PKS sebagai penguat diketahui juga dapat meningkatkan kekasaran bagian permukaan komposit dan meningkatkan sifat-sifat mekanik yang penting untuk aplikasi kampas rem [8].

Penelitian mengenai pemanfaatan PKS pada material komposit sudah mulai berkembang. Perdana et al. (2019) mengkaji karakteristik kekerasan dan keausan kampas rem berbasis PKS dan menunjukkan bahwa peningkatan fraksi volume penguat dapat meningkatkan nilai kekerasan hingga titik optimal tertentu [9]. Otuu (2021) dalam penelitiannya juga menyatakan bahwa ukuran partikel dan distribusinya sangat mempengaruhi densitas dan ketahanan terhadap gaya tarik [10]. Cionita et al. (2022) juga melaporkan bahwa komposit epoksi dengan *filler* alami menunjukkan tegangan geser yang dapat bersaing bila dibandingkan dengan material konvensional [11]. Putri et al. (2020) juga menekankan pentingnya keseimbangan antara kekuatan tarik dan kekuatan geser dalam aplikasi rem, karena kedua gaya tersebut sering bekerja secara bersamaan saat kendaraan diperlambat [12].

Namun, sebagian besar penelitian hanya melihat satu atau dua komposisi *filler*. Mereka tidak mempertimbangkan pengaruh variasi komposisi *filler* atau penguat terhadap gabungan sifat fisis dan mekanik, terutama densitas, kekerasan, dan kekuatan geser. Selain itu, ukuran partikel yang digunakan seringkali terlalu kecil (<500 μm), yang menyebabkan material tidak bekerja dengan baik saat pengereman [13][14].

Penelitian ini mengkaji tiga parameter utama (fisis dan mekanik) yaitu densitas, kekerasan dan tegangan geser, yang memberikan gambaran yang lebih menyeluruh terhadap performa kanvas rem komposit. Pada penelitian ini juga dilakukan variasi ukuran partikel (300 μm hingga 1000 μm) serta variasi komposisi reinforcement–matriks (70:30 % vol hingga 60:40 % vol) dalam satu rangkaian eksperimen untuk mengidentifikasi komposisi yang paling baik untuk menghasilkan material komposit untuk diaplikasikan sebagai material kanvas rem. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah pengembangan kanvas rem yang aman, ekonomis, dan ramah lingkungan bagi industrialisasi material komposit berbasis biomassa di Indonesia.

METODOLOGI

Pada penelitian ini dimulai dengan proses persiapan material, pembuatan spesimen komposit dengan variasi ukuran serbuk PKS dan komposisi antara penguat dan pengikat berupa material PKS dan resin epoksi. Proses penelitian diakhiri dengan pengujian material komposit yang dihasilkan, berupa pengujian sifat fisis yakni densitas pengujian sifat fisis yakni kekerasan dan tegangan geser. Setiap tahapan dilakukan secara sistematis untuk menjamin keakuratan hasil dan konsistensi data eksperimen. Bagian selanjutnya adalah tahapan lengkap dari metodologi yang diterapkan dalam penelitian ini.

2.1 Alat dan Bahan

Adapun bahan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah cangkang kelapa sawit kering, resin epoksi dan *hardener* (dengan rasio 1:1 sesuai petunjuk pabrik) serta alkohol teknis (untuk pembersihan cetakan). Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin penghancur (*crusher*), ayakan standar (*sieve shaker*) dengan ukuran mesh yang sesuai, timbangan digital, cetakan berbentuk standar uji kekerasan dan tegangan geser, mesin press hidrolik dan alat uji densitas, uji kekerasan (Rockwell) dan uji geser (galdani) sesuai standar ASTM.D732.

2.2 Persiapan Bahan Baku

2.2.1 Pengumpulan dan Pembersihan Cangkang Sawit

Pada penelitian ini, PKS yang digunakan dari limbah industri pengolahan kelapa sawit daerah Pesisir Selatan, Sumatera Barat. PKS yang dikumpulkan dibersihkan dengan air mengalir dari kotoran, pasir dan sisa minyak hasil pengolahan kelapa sawit. Kemudian dijemur di bawah sinar matahari selama dua hari sampai kadar air pada PKS yang telah dibersihkan berkurang secara signifikan.

2.2.2 Penghancuran dan Penghalusan

Cangkang sawit yang telah kering dihancurkan terlebih dahulu. Penghancuran dilakukan dengan menggunakan mesin penghancur kasar (*crusher*) untuk mengurangi ukuran pecahan. Setelah itu, proses penghalusan lanjutan dilakukan menggunakan penghalus konvensional hingga partikel dengan ukuran yang lebih kecil dihasilkan.

2.2.3 Pengayakan (*Sieving*)

Serbuk yang telah halus (dengan ukuran partikel yang lebih kecil) kemudian diayak menggunakan alat pengayak otomatis (*sieve shaker*). Alat ini memiliki ayakan dengan berbagai ukuran mesh yang menghasilkan ukuran partikel sekitar 300-1000 mikron (μm). Partikel yang lolos dari mesh pada ukuran tersebut digunakan dalam proses pembuatan komposit kanvas rem.

2.3 Pembuatan Spesimen Komposit

2.3.1 Variasi Komposisi

Spesimen komposit pada penelitian ini dibuat dengan memvariasikan komposisi volume PKS dan ukuran partikel PKS seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi komposisi volume serbuk PKS dan resin epoxy pada spesimen komposit

No	Komposisi PKS:Epoksi (% vol)	Ukuran Partikel (μm)
1	70:30	841-1190
		596-841
		421-595
		296-420
		250-295
2	67,5:32,5	841-1190
		596-841
		421-595
		296-420
		250-295
3	65:35	841-1190
		596-841
		421-595
		296-420
		250-295
4	62,5:37,5	841-1190
		596-841
		421-595
		296-420
		250-295
5	60:40	841-1190
		596-841
		421-595
		296-420
		250-295

2.3.2 Proses Pencampuran

Resin epoxy dan hardener dicampur dengan perbandingan 1:2 dengan menggunakan pengaduk manual. Setelah tercampur secara merata, serbuk PKS ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam larutan resin sambil terus diaduk sampai terbentuk campuran komposit yang homogen.

2.3.3 Pencetakan dan Pengerasan/Pengeringan

Campuran homogen yang dihasilkan pada proses sebelumnya kemudian dituangkan ke dalam cetakan yang dibuat sesuai dengan standar dimensi alat uji yang digunakan pada penelitian ini. Cetakan diberi pelumas (*wax*) terlebih dahulu agar mempermudah proses pelepasan material komposit saat kering sempurna. Proses pencetakan dilakukan pada suhu ruang selama 24 jam dengan bantuan mesin press hidrolik. Proses ini dilakukan di Laboratorium Material, Teknik Mesin, Institut Teknologi Padang.

2.4 Pengujian Material

2.4.1 Uji Densitas

Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui massa jenis komposit yang dihasilkan pada variasi komposisi serbuk PKS dan resin epoksi pada berbagai ukuran partikel PKS seperti yang dijelaskan pada Tabel 1. Metode yang digunakan dalam pengujian ini adalah metode gravimetri. Pada metode ini dilakukan dengan menghitung perbandingan massa terhadap volume spesimen yang dihasilkan. Setiap spesimen ditimbang menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gram, kemudian diukur volumenya dengan bantuan alat pengukur volume yang berlokasi di Laboratorium Material, Teknik Mesin, Institut Teknologi Padang.

2.4.2 Uji Kekerasan

Uji kekerasan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat uji kekerasan tipe *rockwell* dengan menggunakan *indenter* jenis bola baja dengan ukuran 1/16 inch. Pengujian kekerasan ini juga dilakukan di Laboratorium Material, Teknik Mesin, Institut Teknologi Padang. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana kemampuan material komposit dalam menahan beban tekan (penetrasi lokal) pada permukaan material kanvas rem akibat beban indentor yang diberikan sebesar 60 Kgf.

2.4.3 Uji Geser

Uji geser dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) tipe Galdabini dengan metode sesuai standar ASTM D-5379, dengan bentuk spesimen *V-notched beam*. Tujuannya untuk mengetahui kemampuan material komposit kanvas rem berbahan epoksi/serbuk PKS terhadap beban geser yang menyerupai kondisi aktual pada kanvas rem. Spesimen uji geser kanvas rem komposit berbahan epoksi/serbuk PKS sesuai standar ASTM D5379 ditunjukkan pada Gambar 1.



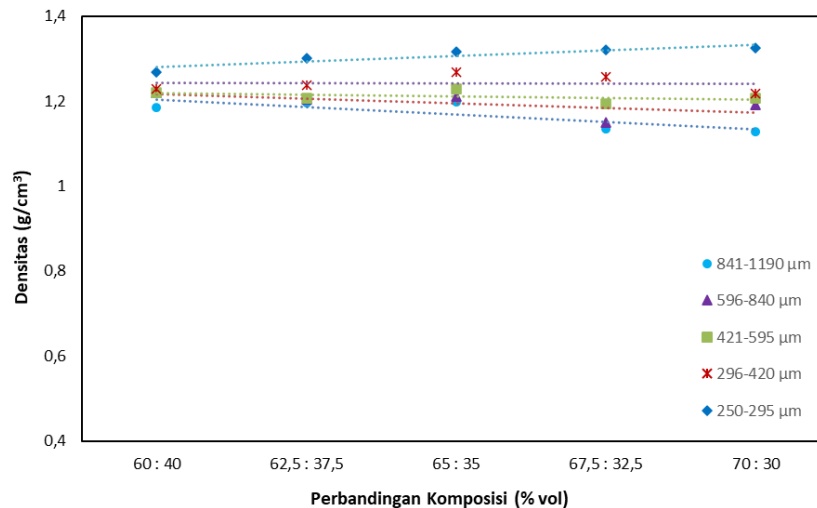
Gambar 1. Spesimen uji geser Komposit kanvas rem berbahan epoksi/serbuk PKS pada berbagai variasi komposisi dan ukuran partikel

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini data hasil pengujian sifat fisis dan mekanik komposit berbasis resin epoksi yang diperkuat dengan serbuk PKS untuk lima variasi komposisi dan masing-masing terdiri dari lima macam ukuran partikel disajikan. Data yang didapatkan berupa data uji densitas, kekerasan dan tegangan geser. Data yang didapatkan kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh komposisi komposit dan ukuran partikel PKS terhadap semua parameter yang diuji tersebut. Fokus pembahasan pada penelitian ini adalah pada interpretasi tren data yang diperoleh dan hubungannya terhadap kedua variasi yang dilakukan. Seluruh analisis dilakukan untuk mengetahui potensi aplikasi komposit ini sebagai material alternatif kanvas rem yang ramah lingkungan dan lebih ekonomis.

4.1 Uji Densitas

Densitas merupakan salah satu parameter yang mencerminkan efisiensi pengemasan partikel di dalam matriks yang dapat menggambarkan tingkat porositas dalam struktur komposit. Densitas sangat berperan dalam menentukan kekuatan mekanik, stabilitas termal, serta performa gesekan saat kanvas rem beroperasi dalam kondisi ekstrem. Pengujian densitas dilakukan pada lima fraksi komposisi (% volume). Masing-masing komposisi terdiri dari lima variasi ukuran partikel, sebagaimana telah dijelaskan pada Bab Metodologi. Hasil uji densitas diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh Variasi Komposisi serbuk cangkang kelapa sawit (PKS) terhadap densitas

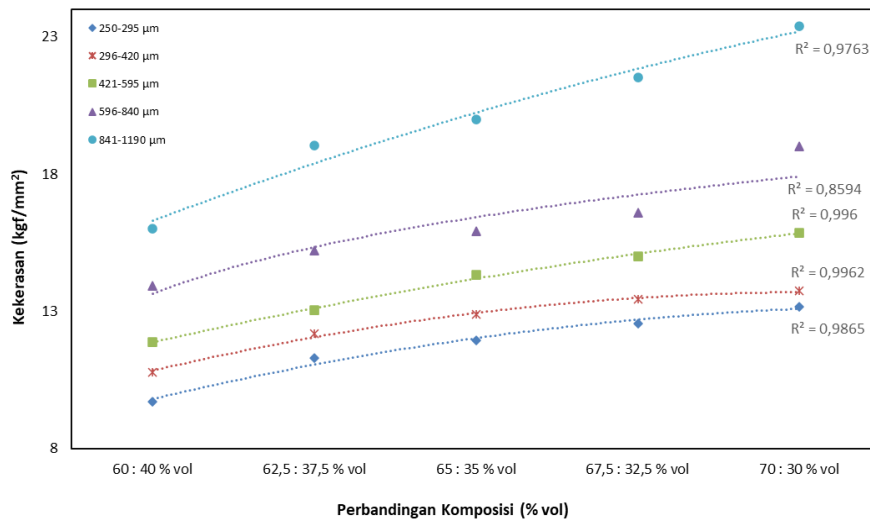
Gambar 2 menunjukkan pengaruh variasi komposisi volume serbuk PKS dan resin epoksi terhadap densitas komposit yang dihasilkan untuk tiap variasi ukuran partikel PKS. Data disajikan untuk lima kategori ukuran partikel, yaitu 250–295 μm, 296–420 μm, 421–595 μm, 596–840 μm, dan 841–1190 μm. Secara umum, perubahan rasio komposisi PKS dan epoksi dari 60:40 % volume hingga 70:30 % volume tidak memberikan perbedaan yang signifikan terhadap nilai densitas. Kurva dari masing-masing ukuran partikel menunjukkan tren yang relatif mendatar, dengan fluktuasi densitas yang cukup kecil antar titik data. Hal ini mengindikasikan bahwa densitas material komposit lebih dipengaruhi oleh karakteristik partikel pengisi, khususnya ukuran daripada proporsi volumenya dalam rentang yang telah diuji tersebut.

Sebaliknya, ukuran partikel menunjukkan pengaruh yang lebih nyata terhadap densitas. Pada gambar terlihat bahwa densitas tertinggi secara konsisten ditunjukkan oleh ukuran partikel paling halus (250–295 μm), sedangkan ukuran terbesar (841–1190 μm) menghasilkan densitas terendah. Fenomena ini sejalan dengan prinsip dasar pengemasan partikel (*packing density*), di mana partikel berukuran lebih kecil dapat mengisi celah antar partikel dengan lebih efisien, sehingga menghasilkan struktur komposit yang lebih rapat dan padat [8][13].

Dalam konteks komposit berbasis matriks polimer, densitas merupakan parameter penting yang mempengaruhi sifat mekanik dan performa akhir komposit tersebut. Ukuran partikel yang kecil cenderung meningkatkan interaksi antar fase dan mengurangi porositas internal. Hal ini akan berdampak pada peningkatan densitas total [6][10]. Di sisi lain, partikel yang lebih besar dapat menciptakan rongga atau *void* akibat kekosongan yang terjadi antar permukaan, sehingga menurunkan nilai densitas akhir meskipun persentase volumenya tetap. Temuan ini juga konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa variasi ukuran pengisi biomassa dapat menghasilkan perbedaan signifikan pada densitas, bahkan ketika komposisi volumenya dijaga konstan [11][12]. Oleh karena itu, dalam perancangan material komposit berbasis limbah biomassa, pengendalian ukuran partikel perlu mendapat perhatian yang sama pentingnya dengan penentuan komposisi volume.

4.2 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan material komposit dalam menahan beban tekan (penetrasi lokal) pada permukaan material komposit yang mengalami deformasi permanen. Kekerasan merupakan salah satu parameter mekanik yang sangat penting dalam pemilihan material kanvas rem, karena berpengaruh langsung terhadap ketahanan aus dan umur pakai komponen saat bekerja dalam kondisi gesekan tinggi. Material dengan tingkat kekerasan yang memadai atau sesuai standar kanvas rem mampu menjaga performa pengereman secara konsisten serta meminimalkan keausan berlebih. Dalam penelitian ini, uji kekerasan dilakukan terhadap lima variasi komposisi serbuk cangkang kelapa sawit dan resin epoksi untuk mengevaluasi pengaruh persentase penguat terhadap nilai kekerasan material komposit kanvas rem berbahan epoksi/serbuk PKS. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali dengan menggunakan tiga titik untuk setiap spesimen. Nilai kekerasan yang didapatkan berupa nilai kekerasan HRB (*Hardness Rockwell tipe B*) atau nilai kekerasan dengan simbol B. Hasil pengujian kekerasan komposit kanvas rem dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh variasi komposisi serbuk PKS terhadap kekerasan komposit kanvas rem

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara perbandingan komposisi volume serbuk PKS terhadap nilai kekerasan material komposit kanvas rem, untuk lima kategori ukuran partikel berbeda. Masing-masing kurva ditampilkan menggunakan model regresi polinomial orde dua (kuadratik) yang secara matematis lebih representatif dalam menggambarkan hubungan non-linier antara kandungan serbuk PKS dan kekerasan material komposit kanvas rem.

Secara umum, grafik pada Gambar 3 memperlihatkan nilai kekerasan meningkat seiring dengan bertambahnya fraksi volume serbuk PKS dalam komposit. Hal ini juga dijelaskan pada penelitian sebelumnya, bahwa komposit berbahan dasar resin poliuretan/serbuk kayu jati memiliki kekerasan tertinggi pada fraksi volume tertinggi pada penelitian ini yaitu 30:70 %vol [15]. Tren ini juga konsisten ditunjukkan oleh semua ukuran partikel, meskipun laju peningkatan bervariasi. Ukuran partikel terbesar (841–1190 μm) menghasilkan nilai kekerasan tertinggi, sebesar 23,4 kgf/mm^2 pada komposisi 70:30 %vol. Hal ini mengindikasikan bahwa partikel berukuran besar lebih efektif dalam meningkatkan kekerasan komposit kanvas rem karena luas bidang kontak yang lebih besar pada komposit dengan ukuran partikel yang lebih besar tersebut. Selain itu, adanya peningkatan efek *interlocking* antar partikel dan matriks pada komposit tersebut [6][7][11].

Model polinomial orde dua dapat digunakan untuk melihat fenomena yang terjadi. Pada Gambar 3, diketahui bahwa hubungan antara komposisi serbuk PKS dan kekerasan tidak sepenuhnya linier. Pada beberapa titik terjadi

percepatan maupun perlambatan kenaikan nilai kekerasan, yang tidak dapat dijelaskan oleh model linier sederhana. Hal ini sangat mungkin terjadi pada sistem komposit karena pada komposit terjadi interaksi kompleks antara distribusi partikel, tingkat ikatan antar fase, dan karakteristik permukaan dari penguat yang digunakan [8][10].

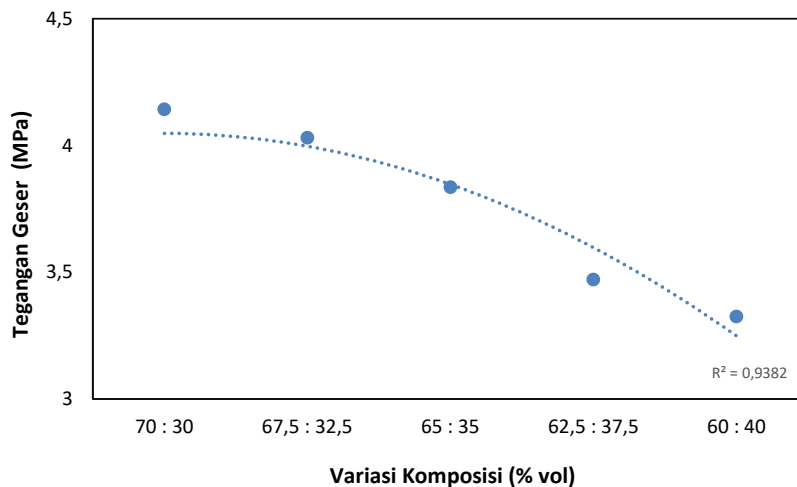
Nilai koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk menilai seberapa baik model polinomial tersebut menjelaskan variasi data eksperimen. R^2 yang tinggi (mendekati 1), seperti yang ditunjukkan oleh ukuran partikel 421–595 μm ($R^2 = 0,9962$) dan 841–1190 μm ($R^2 = 0,9763$), menunjukkan bahwa model tersebut sangat sesuai untuk digunakan pada sebaran data yang didapatkan. sementara, pada ukuran partikel 596–840 μm , nilai R^2 yang didapatkan lebih rendah yaitu 0,8594. Hal ini mengindikasikan kemungkinan adanya dispersi partikel yang tidak merata atau penggumpalan (*agglomeration*). Penggumpalan ini kemudian mengurangi tingkat kekonsistenan dari distribusi beban dalam komposit [6][10].

Hal yang perlu mendapat perhatian adalah ukuran partikel memainkan peran kritis dalam meningkatkan nilai kekerasan dari komposit yang dihasilkan. Partikel yang lebih besar dapat meningkatkan transfer beban dari matriks ke penguat secara lebih efektif jika komposit yang dihasilkan memiliki distribusi partikel yang merata dan tidak membentuk porositas [11][12]. Sementara itu, partikel yang terlalu halus berpotensi untuk menggumpal atau membentuk aglomerat sehingga memerlukan lebih banyak resin untuk melapisi permukaan [7][10].

Secara keseluruhan, kombinasi antara fraksi volume yang lebih tinggi dan ukuran partikel yang lebih besar terbukti memberikan kontribusi paling signifikan terhadap peningkatan kekerasan komposit. Hal ini sejalan dengan temuan sebelumnya pada komposit berbahan dasar alam, bahwa kekerasan meningkat secara optimal pada kombinasi rasio penguat (*filler*) dan ukuran partikel tertentu [8][11][13].

4.3 Uji Geser

Pengujian geser dilakukan menggunakan UTM jenis Galdabini yang dilengkapi dengan perangkat tambahan untuk pengujian geser material. Metode ini mengacu pada standar ASTM D-732, yang secara umum digunakan untuk pengujian geser pada material plastik dan komposit. Pengujian geser dilaksanakan di Laboratorium Politeknik Negeri Padang dengan menggunakan metode pengujian spesimen mengalami beban ganda. Hasil pengujian geser berupa nilai tegangan geser dapat dilihat pada Gambar 4. Pada pengujian geser untuk komposit kanvas rem berbahan epoksi/serbuk PKS ini yang diuji hanya partikel yang berukuran 841-1190 μm , karena dari pengujian yang dilakukan sebelumnya (densitas dan kekerasan), hasil terbaik didapatkan pada ukuran ini. akan tetapi, kelima variasi komposisi tetap dipakai agar dapat membandingkan variasi mana yang lebih baik untuk mendapatkan nilai uji geser terbaik.



Gambar 4. Pengaruh variasi komposisi serbuk PKS terhadap tegangan geser pada ukuran partikel PKS 841-1190 μm

Dari grafik hasil pengujian geser pada Gambar 4, pengaruh perubahan komposisi serbuk cangkang kelapa sawit (PKS) dan resin epoksi terhadap nilai rata-rata tegangan geser dari material komposit yang dihasilkan. Dari hasil pengujian diketahui bahwa terdapat penurunan nilai tegangan geser seiring dengan menurunnya fraksi volume serbuk cangkang sawit dalam komposit. Komposisi dengan fraksi volume serbuk PKS tertinggi (70%) menunjukkan kekuatan geser tertinggi, yaitu sebesar 4,143 MPa. Sementara, komposisi dengan fraksi PKS terendah (60%) menghasilkan nilai kekuatan geser terendah, yaitu 3,326 MPa.

Pola penurunan yang ditunjukkan oleh kurva regresi kuadratik pada grafik, dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,9382$, menunjukkan bahwa terdapat hubungan non-linear yang sangat kuat antara peningkatan kandungan serbuk PKS terhadap penurunan tegangan gesernya. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui dua mekanisme utama yaitu pada komposisi serbuk PKS tertinggi, partikel penguat (serbuk PKS) mampu memberikan efek penguncian mekanik (*mechanical interlocking*) yang lebih baik dalam matriks resin, sehingga meningkatkan kekuatan komposit yang dihasilkan terhadap pembebanan berupa gaya geser. Selanjutnya, semakin tinggi komposisi serbuk PKS, maka semakin besar pula kemungkinan terjadinya aglomerasi partikel dan terjadi kekurangan resin sebagai pengikat. Hal ini kemudian berakibat pada terbentuknya pori-pori mikro dan area lemah (*weak zones*) dalam struktur komposit yang dihasilkan [7][11].

Selain itu, Gambar 4 juga menunjukkan bahwa terdapat batas optimum pemanfaatan komposisi serbuk PKS dalam komposit. Saat komposisi penguat yang digunakan melewati proporsi tertentu, maka performa sifat mekaniknya akan menurun. Oleh karena itu, komposisi 70% PKS dan 30% resin epoksi dapat direkomendasikan sebagai formulasi terbaik dalam konteks performa geser untuk aplikasi komposit kanvas rem berbahan epoksi/serbuk PKS.

Namun demikian, jika dibandingkan dengan standar kekuatan geser kanvas rem kendaraan yang ditetapkan pada SAE J661, yaitu sebesar 13–35 MPa atau 1300–3500 N/cm². Nilai tersebut masih berada di bawah ambang minimum yang disyaratkan. Dengan demikian, meskipun secara komparatif formulasi 70:30 memberikan performa tertinggi di antara variasi yang diuji, komposit epoksi yang diperkuat serbuk cangkang kelapa sawit belum memenuhi standar SAE J661 untuk aplikasi kanvas rem kendaraan. Hasil ini mengindikasikan bahwa diperlukan peningkatan formulasi, baik melalui modifikasi ukuran partikel, penambahan bahan pengikat sekunder, maupun rekayasa permukaan partikel penguat, agar performa mekanik komposit yang dihasilkan dapat ditingkatkan dan dapat sesuai dengan spesifikasi industri dari kanvas rem.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan. Adapun kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perubahan komposisi volume serbuk PKS tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai densitas komposit. Namun, ukuran partikel memiliki pengaruh yang lebih dominan, dimana partikel berukuran lebih kecil (250–295 μm) menghasilkan densitas yang lebih tinggi akibat kemampuan pengisian celah yang lebih baik.
2. Peningkatan fraksi volume serbuk PKS cenderung meningkatkan kekerasan material komposit kanvas rem. Nilai kekerasan tertinggi diketahui sebesar 23,4 kgf/mm² pada komposisi 70:30 dengan ukuran partikel terbesar (841–1190 μm). Hal ini menunjukkan bahwa material menjadi lebih keras seiring bertambahnya jumlah volume serbuk PKS.

3. Kekuatan geser tertinggi sebesar 4,143 MPa juga diperoleh pada komposisi 70:30 dengan ukuran partikel 841–1190 μm . Meskipun demikian, nilai ini belum memenuhi standar minimum kekuatan geser kanvas rem berdasarkan SAE J661.

Secara umum, komposisi 70% PKS dan 30% resin epoksi dengan ukuran partikel besar menunjukkan performa mekanik terbaik, namun optimalisasi lanjutan tetap diperlukan untuk mencapai spesifikasi teknis standar kanvas rem untuk standar industri otomotif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kusumadewi, F., & Priyanto, D., “Sistem pengereman kendaraan dan karakteristik kanvas rem”, *Jurnal Otomotif Indonesia*, 4(1), 12–18, April, 2020.
- [2] Fathoni, M. I., Abdullah, N., & Ridwan, M., “Evaluasi Sifat Mekanik Kanvas Rem Berbasis Serat Alam”, *Jurnal Mesin Nusantara*, 3(2), 77–84, Juli, 2021.
- [3] Rahman, A., Widodo, B., & Mulyadi, S., “Health risks of asbestos in automotive brake systems”, *International Journal of Environmental Health*, 7(2), 45–51, April, 2019.
- [4] Takaishi, M., Sato, Y., & Fujita, H., “Heavy Metal Particle Emission from Braking Systems”, *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121566, Oktober, 2020.
- [5] Badan Pusat Statistik, “Statistik Kelapa Sawit Nasional”, <https://www.bps.go.id>, 2023.
- [6] Akinrinlola, O., & Ogedengbe, T., “Abrasive Potential of Palm Kernel Shell Powder”, *Materials Today: Proceedings*, 59, 2820–2825, Juli, 2022.
- [7] Mufid, A., & Hamdan, A., “Karakteristik Resin Epoksi dalam Penguatan Komposit”, *Jurnal Polimer Indonesia*, 5(3), 55–61, September, 2023.
- [8] Baharuddin, M., et al., “Tribological study of PKS-filled composites”, *Advanced Composites Letters*, 29(1), 15–21, Mei, 2020.
- [9] Perdana, M., Nugroho, A. S., & Fadilah, L., “Pengaruh serbuk cangkang sawit terhadap kekerasan kanvas rem”, *Jurnal Teknik Mesin*, 12(1), 41–47, Juni, 2019.
- [10] Otuu, J. B., “Performance of Palm Kernel Shell in Automotive Brake Pads”, *Ebonyi Journal of Science*, 4(3), 92–100, Agustus, 2021D. Ebehard and E. Voges, “Digital single sideband detection for interferometric sensors,” presented at the 2nd Int. Conf. Optical Fiber Sensors, Stuttgart, Germany, 1984.
- [11] Cionita, T., Gunawan, R., & Rasyid, N., “Epoxy Composites with Agro-Waste Fillers”, *Automotive Experiences*, 5(2), 101–109, Mei, 2022.
- [12] Putri, A. M., Hidayat, R., & Siregar, S., “Analisa Tarik dan Geser pada Material Kanvas Rem”, *Jurnal Material Teknik*, 4(1), 22–29, Februari, 2020.
- [13] Sari, M., Nasution, R. A., & Taufik, H., “Size Optimization of Natural Filler in Polymer Composites”, *Jurnal Sains Material Indonesia*, 9(2), 76–83, Juni, 2021.
- [14] Takaishi, M., Sato, Y., & Fujita, H., “Heavy Metal Particle Emission from Braking Systems”, *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121566, Oktober, 2020.
- [15] Solehuddin, I., Ana, N., M., & Kosjoko., “Pengaruh Fraksi Volume Terhadap Sifat Mekanik Kanvas Rem Berbahan Serbuk Jati”, *Jurnal Teknik Mesin: Cakram*, 7(2), Oktober, 2024.