

## **Pengaruh Variasi Tekanan pada Produksi Komposit *Friction Materials* Kampas Rem terhadap Sifat Mekanik, Fisik dan Tribologi**

**Akhmad Fauzi<sup>1</sup>, Muhammad Errizky Wibowo<sup>1</sup>, Mohammad Rizky Djati Admoko<sup>1</sup>,  
Muhammad Khafidh<sup>1\*</sup>, Deni Fajar Fitriyana<sup>2</sup>, Januar Parlaungan Siregar<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

<sup>3</sup>Faculty of Mechanical & Automotive Engineering Technology, Universiti Malaysia Pahang, Pekan, Malaysia

\*Corresponding Email: khafidh@uii.ac.id

### **ABSTRAK**

Penelitian ini mengembangkan kampas rem ramah lingkungan dari sekam padi dengan resin fenolik sebagai binder. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tekanan kompresi terhadap sifat mekanik, fisik, dan kinerja tribologi. Dalam penelitian ini, material gesek rem dibuat menggunakan metode *compression molding* dengan bahan komposit yang terdiri dari 40% resin fenolik, 20% sekam padi, 15%  $Al_2O_3$ , 15%  $Fe_2O_3$  dan 15% hexamin. Tekanan kompresi pemadatan divariasikan pada 5 MPa, 10 MPa, dan 15 MPa. Pengujian meliputi densitas, kekuatan impak, kekuatan tarik, kekuatan lentur, keausan dan gesekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompresi dari 5 MPa menjadi 10 MPa menghasilkan penurunan densitas, kekuatan impak, kekuatan tarik, kekuatan lentur, dan laju keausan spesifik. Sementara itu, tekanan kompresi pemadatan dari 10 MPa menjadi 15 MPa dapat meningkatkan sifat mekanik, fisik dan ketahanan keausan. Oleh karena itu, hasil akhir material akibat peningkatan tekanan kompresi pemadatan dipengaruhi oleh ukuran partikel, distribusi matriks dan pengisi, porositas, serta ikatan silang resin.

**Keywords:** material gesek, performa tribology, sifat material, tekanan kompresi

### **ABSTRACT**

*This study develops environmentally friendly brake pads from rice husk with phenolic resin as a binder material. This study aims to analyze the influence of compression pressure on the properties of mechanical, physical and tribological performance. In this study, brake friction material was made using the compression molding method with a composition of 40% phenolic resin, 20% rice husk, 15%  $Al_2O_3$ , 15%  $Fe_2O_3$  dan 10% hexamine. The compression pressures are varied, i.e. 5 MPa, 10 MPa and 15 MPa. Testing includes density, impact strength, tensile strength, flexural strength, wear and friction. The results showed that increasing the material compaction compression pressure from 5 MPa to 10 MPa can reduce the density, impact strength, tensile strength, flexural strength, and specific wear rate. Meanwhile, increasing the compaction compression pressure from 10 MPa to 15 MPa can improve properties of mechanical, physical and wear resistance. The final material result due to increased compaction compression pressure is influenced by particle size, matrix and filler distribution, porosity along resin cross-linking.*

**Keywords:** Compacting pressure, friction material, material properties, tribological performance.

## **1. Pendahuluan**

Kampas rem merupakan komponen penting bagi kendaraan untuk mengendalikan kecepatan dan menjamin keselamatan (Elhafid dkk., 2017). Sebagian besar kampas rem yang beredar di pasaran masih berbahan asbes, yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan karena partikel yang dihasilkannya (Christou dkk., 2025). Kampas rem yang berkualitas harus memiliki koefisien gesek tinggi dan ketahanan panas yang baik untuk mendukung kinerja pengereman. Oleh karena itu,

pengembangan kampas rem non asbes yang ramah lingkungan dan berkinerja tinggi menjadi sangat diperlukan.

Perkembangan material komposit gesek yang ramah lingkungan semakin meningkat didorong oleh dampak negatif material asbes yang mengandung zat karsinogenik. Penelitian dari *World Health Organization* (WHO) dan *International Agency for Research on Cancer* (IARC) menunjukkan bahwa partikel asbes dari kampas rem dapat menyebabkan gangguan paru-paru (Imran dkk., 2024). Zat karsinogenik tersebut berasal dari mineral silikat dengan kandungan silika kristal yang dapat dihancurkan oleh tubuh dan berbahaya jika terhirup (Afiefudin dkk., 2023). Oleh karena itu, kampas rem asbes mulai digantikan dengan material non asbes yang lebih aman dan keberlanjutan.

Upaya untuk menghasilkan material gesek yang lebih ramah lingkungan dilakukan dengan penambahan bahan tumbuhan seperti limbah sekam padi. Sekam padi merupakan limbah pertanian yang melimpah di Indonesia, dengan estimasi 20%-30% dari total produksi gabah atau setara dengan jutaan ton per tahun (Ferdiansyah dkk., 2023). Kandungan utamanya adalah silika amorf yang lebih tidak berbahaya bagi kesehatan karena dapat dihancurkan oleh sistem imun manusia, berbeda dengan silika kristal pada asbes yang bersifat karsinogenik (Sellami & Elleuch, 2023). Dengan demikian, pemanfaatan sekam padi tidak hanya mengurangi limbah tetapi juga menyediakan material alternatif yang ramah lingkungan untuk kampas rem.

Penggunaan bahan alam dalam material gesek rem mempengaruhi sifat mekanik, fisik dan tribologi (Surid dkk., 2020). Oleh karena itu, desain kampas rem berbahan limbah sekam padi harus memenuhi kriteria koefisien gesek tinggi, keausan rendah, serta kekuatan mekanik yang tinggi. Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada variasi komposisi dengan bahan epoksi sebagai material pengikat/binder, namun belum mengeksplorasi pengaruh tekanan kompresi, terutama pada bahan sekam padi dengan resin fenolik (Khafidh dkk., 2023). Padahal, parameter tekanan pemadatan sangat penting karena secara langsung mempengaruhi kekuatan material, keausan dan koefisien gesek. Temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa tekanan kompresi berpotensi meningkatkan kekuatan dan mengurangi keausan (Ghazali dkk., 2012). Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan tekanan kompresi pada material gesek berbahan sekam padi dan resin fenolik dengan metode *compression molding* untuk mencapai sifat mekanik dan tribologi yang optimal.

## 2. Metodologi

### 2.1. Material Komposit Gesek Rem

Bahan komposit yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari resin fenolik, sekam padi, aluminium oksida, besi oksida, dan katalis hexamin. Sedangkan komposisi yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Komposisi material gesek rem.

Material	Komposisi (berat%)
Resin fenolik	40
Serbuk sekam padi	20
Aluminium oksida	15
Besi oksida	15
Hexamin	10

### 2.2. Desain Mold Spesimen

Cetakan dirancang sesuai standar *American Standard Testing and Material* (ASTM) dengan bahan aluminium berdimensi 280 mm × 160 mm × 27 mm. Proses desain dilakukan menggunakan software *Computer Aided Design* (CAD), lihat Gambar 1(a). Sementara pembuatan cetakan dilakukan dengan mesin *Computer Numerical Control* (CNC) milling selama 20 jam di Laboratorium Proses Produksi dan Pusat Studi Kreativitas dan Inovasi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia, lihat Gambar 1(b). Cetakan terdiri dari dua segmen utama yaitu core dan cavity.



(a)

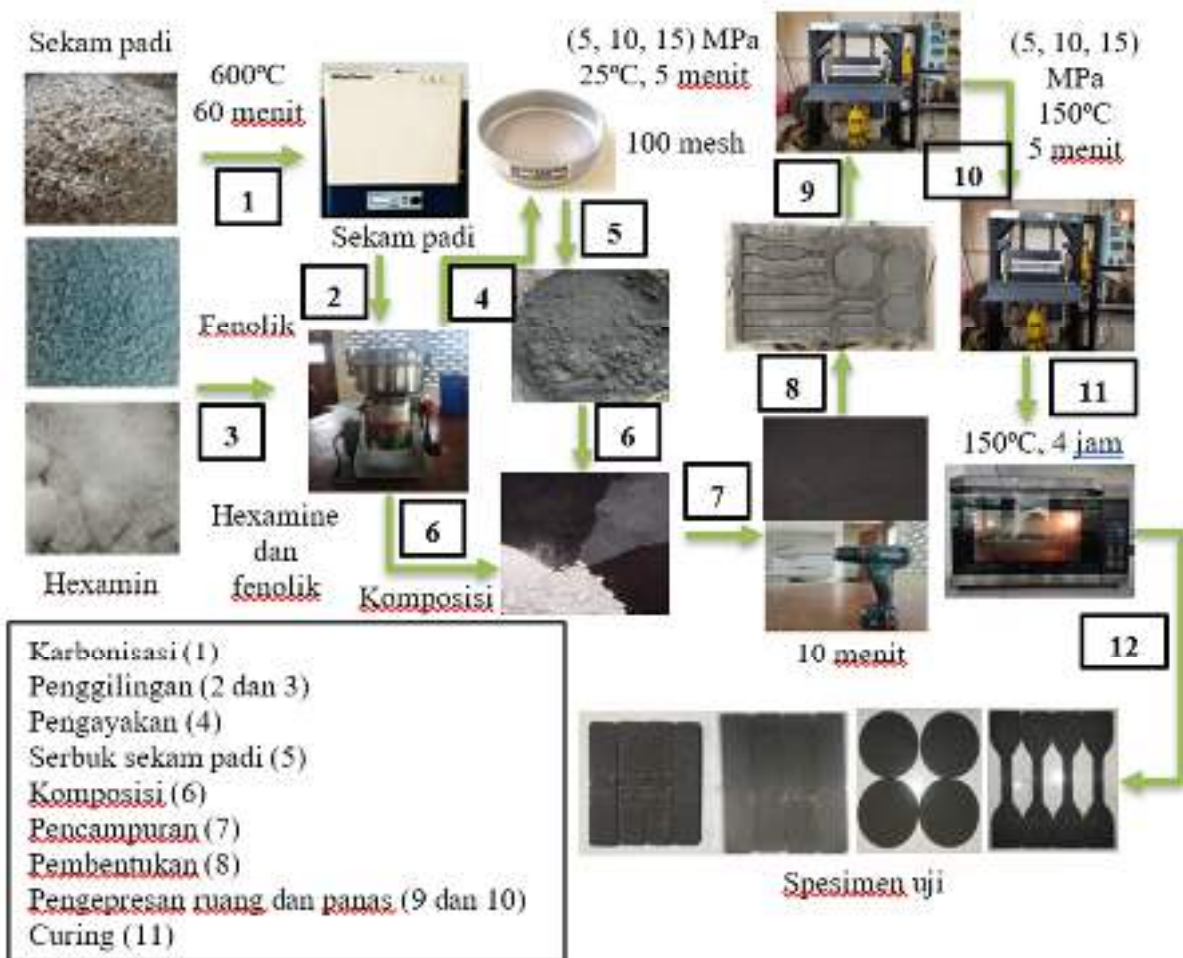


(b)

**Gambar 1.** (a) Desain mold, (b) hasil produksi mold.

### 2.3. Pembuatan dan Pengujian Spesimen

Metode yang digunakan dalam pembuatan spesimen uji adalah teknik manufaktur *compression molding*. Sekam padi dikarbonisasi dalam mesin *furnace* pada suhu 600°C selama 60 menit untuk meningkatkan kandungan silika amorf hingga diatas 90% (Singh & Singh, 2015) (Tong dkk., 2021). Serbuk hasil karbonisasi kemudian digiling dengan *mixer crusher* dan diayak menggunakan saringan *stainless steel* 100 mesh. Resin fenolik dan katalis hexamin yang berbentuk kristal dihaluskan terlebih dahulu dengan mixer crusher untuk memperoleh partikel kecil dan memastikan pencampuran yang homogen. Pencampuran semua komposisi dilakukan menggunakan mesin bor makita. Sebelum pengepresan, cetakan diberikan pelumasan dengan spray WD-40 PTFE untuk mencegah pelekatan material. Terdapat tiga variasi tekanan yaitu 5 MPa (kode spesimen M5), 10 MPa (kode spesimen M10), dan 15 MPa (kode spesimen M15).

**Gambar 2.** Skematik produksi spesimen uji material gesek rem.

Gambar 2 merupakan tahapan pembuatan spesimen komposit secara keseluruhan. Pada spesimen uji impak dibuat takik (notch) berbentuk V 45° dengan kedalaman 2 mm pada bagian tengahnya. Proses pembuatan takik dilakukan menggunakan kikir segitiga. Standar pengujian yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

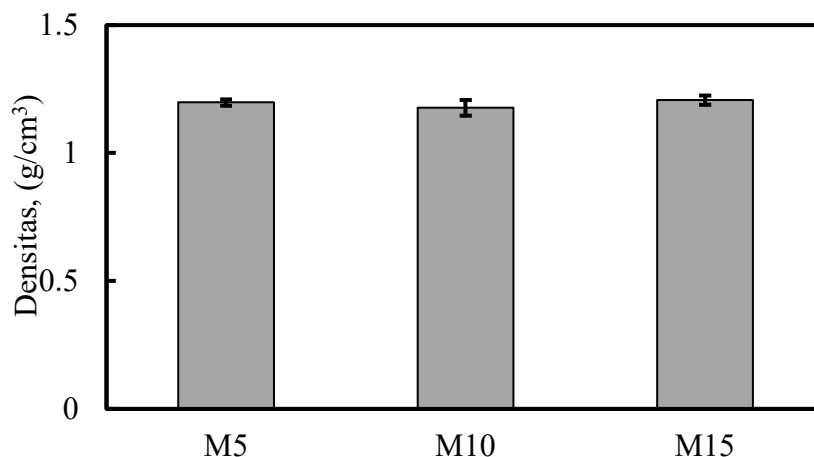
**Tabel 2.** Jenis pengujian dan karakteristik.

Jenis Pengujian	Standar ASTM	Metode
Densitas	D792	Geometri
Impak	E23	Charpy
Tarik	D638 Tipe-IV	UTM
Lentur	D7264	Three Point Bending
Tribologi	G99	Pin on Disc

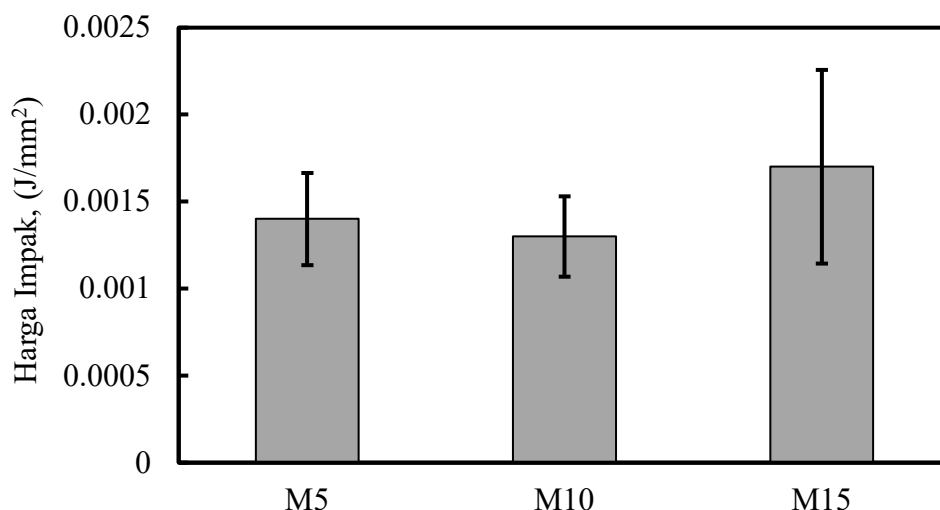
### 3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompresi pemadatan diperoleh nilai densitas secara nonlinear, yaitu masing-masing  $1,1959 \pm 0,0127 \frac{g}{cm^3}$ ,  $1,1763 \pm 0,0308 \frac{g}{cm^3}$  dan  $1,2068 \pm 0,0180 \frac{g}{cm^3}$  pada M5, M10, dan M15. Penelitian oleh Sunardi, dkk., menyatakan bahwa peningkatan tekanan kompresi pada produksi komposit dapat meningkatkan sifat densitas (Sunardi dkk, 2024). Degradasi densitas material disebabkan oleh terjadinya aglomerasi partikel yang berukuran lebih besar yang dapat melemahkan ikatan antar partikel matriks dan penyusunnya. Selain itu, gas dari resin fenolik dan hexamin yang terperangkap dalam cetakan, sehingga dapat memunculkan rongga kosong. Homogenitas partikel antara pengisi dan abrasif dapat mempengaruhi struktur rongga material. Penelitian oleh Melvin, dkk., menunjukkan bahwa sekam padi yang dikarbonisasi pada suhu diatas 500°C memiliki struktur rongga yang lebih terbuka dan luas permukaan yang meningkat, sehingga rongga menjadi lebih besar (Melvin dkk., 2019). Struktur rongga yang lebih terbuka dapat meningkatkan porositas, sehingga menurunkan densitas. Pemadatan pada tekanan rendah sebagian besar memiliki rongga yang relatif berukuran lebih.

Pemadatan tekanan kompresi tinggi memungkinkan partikel kecil seperti aluminium oksida dan besi oksida terdorong masuk ke dalam rongga yang lebih besar, sehingga dapat menurunkan porositas dan densitas meningkat. Sementara itu, kondisi tekanan panas tinggi resin dapat terpolimerisasi lebih baik. Hal ini resin dapat mengalir dan terdistribusi secara merata yang menyebabkan ikatan antar partikel lebih kuat, serta dapat mengecilkan rongga yang lebih besar. Pemadatan tekanan rendah, seperti pada kode M5 dapat mempertahankan nilai densitas, meskipun porositas tinggi dan melemahnya ikatan partikel. Partikel sekam padi yang tidak hancur saat kondisi tekanan rendah yang dapat mempertahankan densitas material. Meningkatkan tekanan menunjukkan efek batas yang jelas akibat struktur serat dan pengurangan rongga (He dkk., 2025).



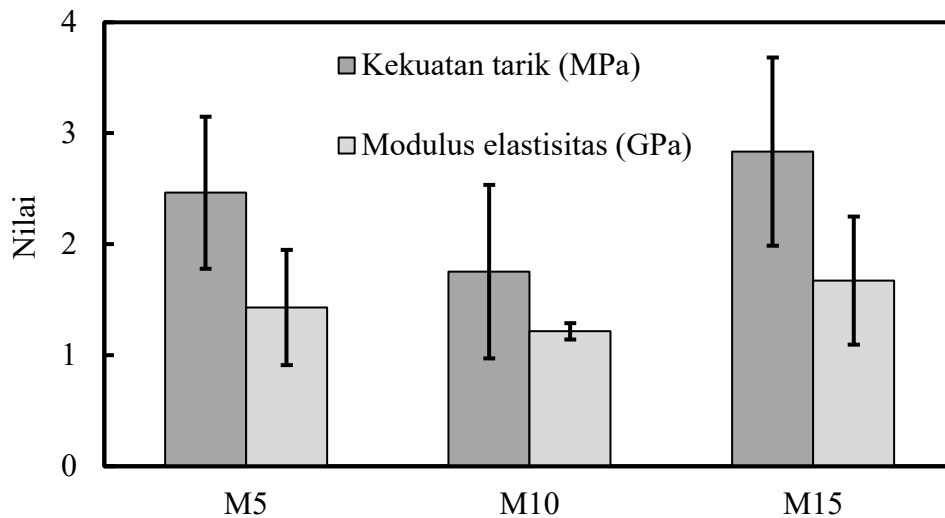
**Gambar 3.** Grafik pengujian densitas pengaruh tekanan pemadatan material.



**Gambar 4.** Grafik pengujian kekuatan impact pengaruh tekanan pemadatan material.

Gambar 4 menunjukkan bahwa peningkatan pemadatan tekanan kompresi diperoleh hasil ketangguhan material secara nonlinear. Hasil pengujian pada harga impact material M5, M10 dan M15 adalah  $0,0014 \pm 0,0002165 \frac{J}{mm^2}$ ,  $0,0013 \pm 0,0002309 \frac{J}{mm^2}$  dan  $0,0017 \pm 0,000557 \frac{J}{mm^2}$ . Hal ini dapat dikaitkan dengan temuan dari penelitian Oladukun, dkk., yang menyatakan bahwa semakin tinggi tekanan kompresi cetak kompresi, maka sifat mekanik pada material komposit semakin meningkat, seperti kekuatan impact (Oladokun dkk., 2019). Peningkatan porositas atau rongga kosong menyebabkan penyerapan energi material menurun, sehingga dapat mengurangi kekuatan. Faktor tersebut pada pemadatan tekanan rendah yang dapat menjadi titik konsentrasi tegangan dan memicu retakan mikro. Terbentuknya rongga kosong pada material dapat membuat energi serap menurun akibat dari tumbukan yang dapat dikaitkan dengan ukuran partikel. Temuan serupa telah disampaikan oleh Mohammad, dkk., yang menyatakan bahwa ukuran partikel dapat mempengaruhi ketangguhan impact suatu material (Mohammed dkk., 2024). Di sisi lain, degradasi harga impact disebabkan oleh distribusi partikel yang tidak merata selama fase pemadatan.

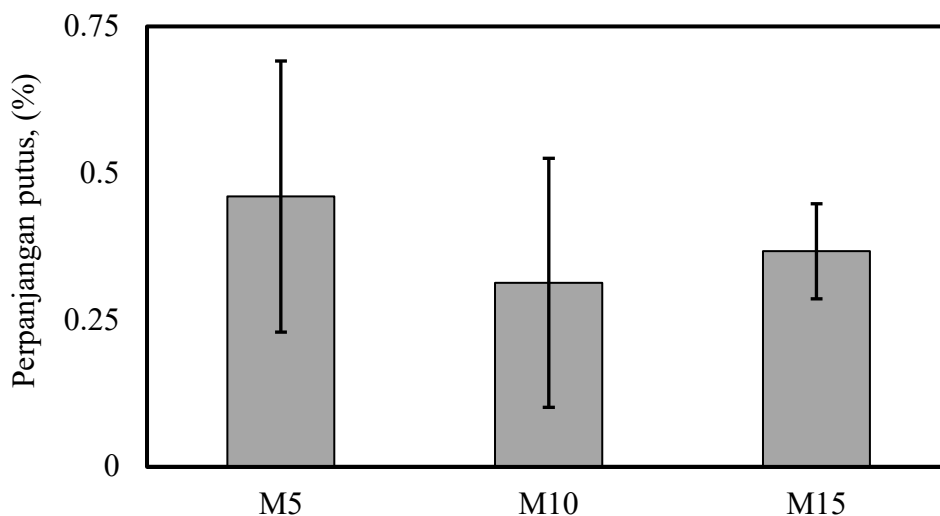
Tekanan kompresi rendah menyebabkan ikatan silang antar partikel menjadi lemah, sehingga tidak dapat menahan beban tumbukan. Peningkatan kandungan silika menyebabkan ketangguhan material menurun karena sifat getas dari silika. Penelitian dari Tong, dkk., yang menyatakan bahwa karbonisasi sekam padi pada suhu  $600^{\circ}C$  selama 60 menit dapat meningkatkan kandungan silika hingga mencapai lebih dari 90% (Tong dkk., 2021). Pemadatan tekanan tinggi pada partikel yang berukuran lebih kecil secara signifikan dapat menghambat perambatan retak, sehingga meningkatkan ketangguhan material. Peningkatan tekanan kompresi pemadatan memperkuat ikatan antara pengisi dan matriks, hingga dapat meningkatkan transfer beban dan ketahanan terhadap beban bentur. Struktur Partikel sekam padi yang tidak hancur mampu menahan beban benturan, seperti pada kode M5 yang dapat mempertahankan harga impact material.



**Gambar 5.** Grafik pengujian kekuatan tarik dan elastisitas pengaruh tekanan pemadatan.

Gambar 5 menunjukkan hasil uji kekuatan tarik dan modulus elastisitas material M5, M10 dan M15. Nilai kekuatan Tarik pada M5, M10, dan M15 adalah  $2,465 \pm 0,685$  MPa,  $1,753 \pm 0,783$  MPa,  $2,835 \pm 0,849$  MPa. Sementara itu, nilai modulus elastisitas pada M5, M10, dan M15 adalah  $1,429 \pm 0,519$  GPa,  $1,215 \pm 0,0724$  GPa dan  $1,672 \pm 0,576$  GPa. Peningkatan rongga kosong dapat menyebabkan meningkatnya porositas, sehingga menurunkan kekuatan tarik dan kekakuan material. Selain itu, ukuran partikel penyusun yang tidak homogen dapat mempengaruhi kekuatan tarik dan modulus elastisitas. Adhesi yang buruk antara matriks dan pengisi, serta aglomerasi partikel menyebabkan konsentrasi tegangan tinggi. Hal ini mengakibatkan degradasi kekuatan dan kekakuan elastisitas. Kelembaban partikel sekam padi dapat menghambat ikatan antara resin dan pengisi yang membuat adhesi partikel melemah. Ukuran partikel yang lebih besar dari bahan alam, seperti sekam padi berpengaruh saat proses pemadatan tekanan kompresi tinggi. Tekanan kompresi cetak dapat mempengaruhi terbentuknya *void*, yaitu ruang kosong akibat udara yang terperangkap dalam cetakan.

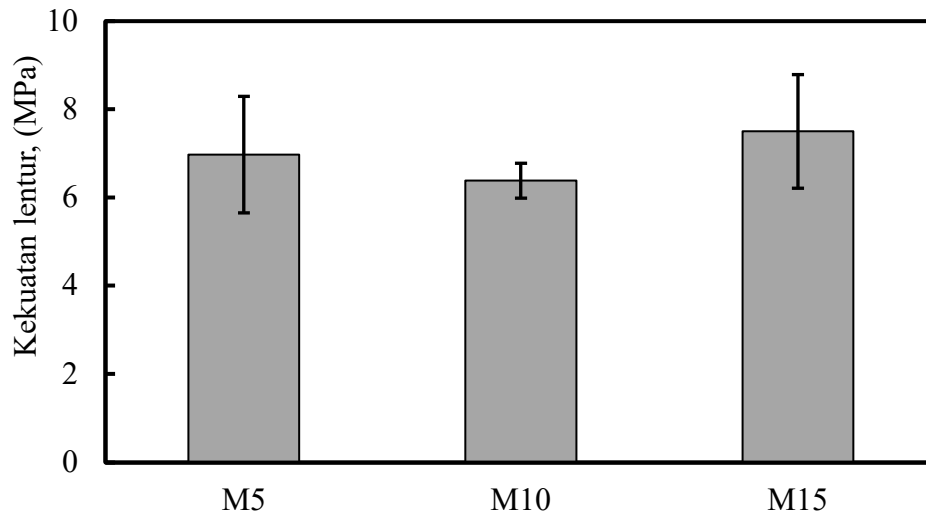
Matriks berfungsi sebagai pengikat, mentransfer beban dan memberikan kekuatan, kekakuan dan bentuk struktur komposit. Jika peran matriks tidak optimal, maka sifat mekanik material dapat menurun (Mohammed dkk., 2024). Material yang mengalami pemadatan pada tekanan tinggi menyebabkan partikel matriks dan penyusunnya saling berdekatan, sehingga dapat membentuk ikatan silang partikel yang lebih kuat, seperti pada kode M15. Dalam kondisi tekanan tinggi, nilai modulus elastisitas menjadi lebih sensitif terhadap cacat lokal, seperti retakan dan aglomerasi. Struktur partikel sekam padi yang tidak hancur dapat menahan beban tarik material.



**Gambar 6.** Grafik pengujian perpanjangan putus pengaruh tekanan pemadatan material.

Gambar 6 menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pemadatan kompresi diperoleh hasil perpanjangan putus secara fluktuasi. Perpanjangan putus adalah seberapa besar pertambahan panjang

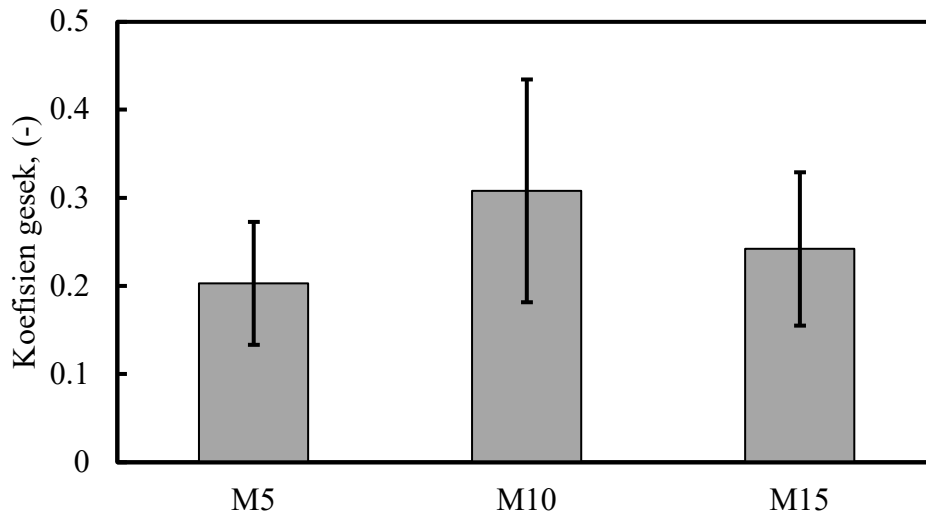
suatu spesimen uji material saat ditarik sampai putus. Pemadatan tekanan kompresi panas yang rendah yang membuat nilai perpanjangan putus tertinggi. Hal ini disebabkan oleh struktur partikel sekam padi, perpindahan panas dari cetakan ke material yang lebih lama sehingga dapat mempertahankan perpanjangan putus material. Temuan dari Li, dkk., yang menyatakan bahwa nilai perpanjangan putus sangat sensitif terhadap tekanan kompresi panas (Li dkk., 2022). Pemadatan tekanan panas rendah dengan durasi lama dapat memberikan waktu yang cukup lama untuk pelepasan gas yang dihasilkan dari sisa volatil. Gas yang dihasilkan dari resin yang memungkinkan mempengaruhi perpanjangan putus material.



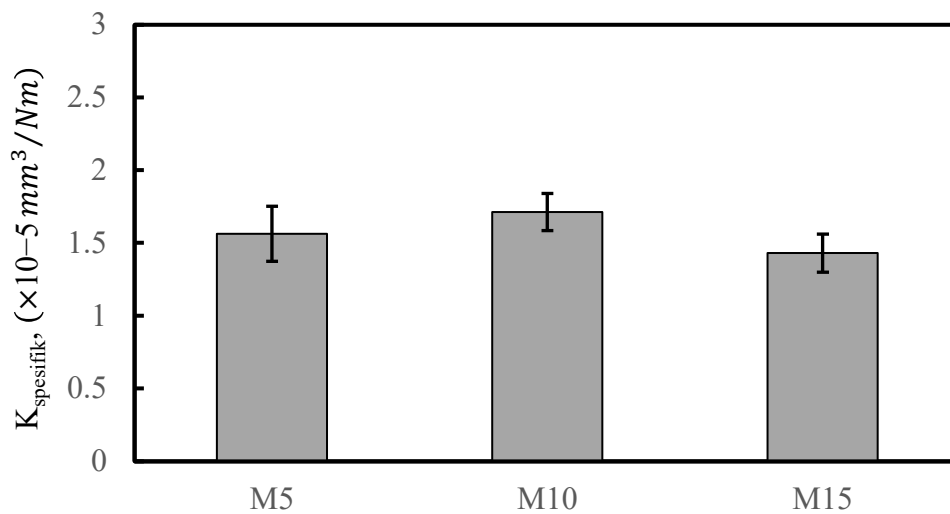
**Gambar 7.** Grafik pengujian kekuatan lentur pengaruh tekanan pemadatan material.

Gambar 7 menunjukkan bahwa hasil kekuatan lentur diperoleh secara non-linear dengan peningkatan tekanan kompresi. Nilai kekuatan lentur yang diperoleh pada material M5, M10 dan M15 adalah  $6,97 \pm 0,6809$  MPa,  $6,38 \pm 0,4644$  MPa,  $7,50 \pm 1,0357$  MPa. Degradasi kekuatan lentur disebabkan oleh aglomerasi partikel, struktur partikel sekam padi hancur, serta aliran resin yang tidak terdistribusi secara merata yang membuat ikatan antar partikel kurang optimal. Oleh karena itu, ukuran partikel dalam pencampuran material sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi kekuatan lentur secara keseluruhan (Sallal dkk., 2020). Pemadatan dengan tekanan rendah dapat menimbulkan kelemahan antarpartikel antara sekam padi dan bahan abrasif oksida seperti aluminium oksida dan besi oksida. Kondisi ini yang menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan dan mengurangi kekuatan lentur.

Tekanan kompresi yang tidak optimal dapat menyebabkan terbentuknya *void* yang dapat mengurangi kekuatan lentur material. Pemadatan tekanan tinggi dapat mengisi partikel aluminium oksida dan besi oksida ke dalam rongga kosong. Selain itu, partikel yang berukuran kecil yang terdistribusi secara merata dapat menghambat retakan mikro akibat beban lentur, sehingga dapat meningkatkan kekuatan lentur. Struktur partikel sekam padi yang tidak hancur dapat mempertahankan kekuatan lentur. Perubahan kekuatan lentur dipengaruhi oleh ukuran partikel, distribusi partikel pengisi dan matriks, ikatan antarmuka, serta porositas.



**Gambar 8.** Grafik pengujian koefisien gesek pengaruh pemadatan tekanan kompresi.



**Gambar 9.** Grafik pengujian laju keausan spesifik pengaruh pemadatan tekanan kompresi.

Gambar 8 menunjukkan bahwa peningkatan pemadatan tekanan kompresi dapat meningkatkan koefisien gesek. Hasil pengujian koefisien gesek pada material M5, M10 dan M15 adalah  $0,203 \pm 0,0697$ ,  $0,308 \pm 0,1265$  dan  $0,242 \pm 0,0871$ . Gambar 9 menunjukkan hasil pengujian nilai keausan spesifik dengan peningkatan pemadatan tekanan kompresi. Nilai laju keausan spesifik material pada M5, M10 dan M15 adalah  $1,563 \pm 0,1898 \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}$ ,  $1,713 \pm 0,1285 \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}$  dan  $1,430 \pm 0,1313 \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}}$ . Pada kode M10, terjadi peningkatan keausan akibat aglomerasi partikel dan porositas yang tinggi. Hal ini yang menghambat distribusi panas dan menurunkan kinerja gesekan. Sebaliknya, tekanan kompresi tinggi memfasilitasi pengisian rongga oleh partikel abrasif, mengurangi porositas, meningkatkan ketahanan aus dan menghasilkan distribusi, serta stabilitas gesekan lebih optimal (Darmawan dkk., 2020). Tekanan kompresi cetak juga berpengaruh terhadap laju keausan spesifik dan koefisien gesek. Material gesek rem dengan partikel berukuran berbeda dapat mempengaruhi laju keausan spesifik dan koefisien gesek (Lv dkk., 2024). Pada tekanan pemadatan rendah, terbentuknya alur pengikisan yang besar akibat keausan abrasif yang meningkat. Sebaliknya, pemadatan tinggi seperti 15 MPa menghasilkan alur permukaan yang lebih stabil, yang mengindikasikan penurunan laju keausan. Hal ini sejalan dengan temuan Sunardi dkk., menyatakan bahwa tekanan cetak yang tinggi pada material komposit dapat menurunkan laju keausan spesifik (Sunardi dkk., 2024). Stabilitas ini dicapai karena tekanan tinggi mengurangi pelepasan partikel abrasif, sehingga meningkatkan kinerja gesekan.



#### 4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa variasi tekanan kompresi memiliki pengaruh kompleks dan non-linear terhadap sifat fisik, mekanik, dan tribologi komposit material gesek. Pada pengujian densitas, peningkatan tekanan kompresi dari 5 MPa ke 10 MPa justru menurunkan densitas material, sementara peningkatan ke 15 MPa berhasil meningkatkan densitas. Fenomena non-linear ini menunjukkan bahwa densitas tidak hanya ditentukan oleh tekanan, tetapi juga oleh interaksi kompleks antar faktor seperti ukuran partikel, distribusi resin, komposisi penyusun, dan porositas internal. Secara mekanik, tekanan 15 MPa menghasilkan kondisi optimal karena mampu meningkatkan kekuatan impak, tarik, dan lentur, sedangkan tekanan 10 MPa menghasilkan sifat mekanik yang paling rendah. Terkait sifat tribologi, peningkatan tekanan kompresi secara keseluruhan cenderung meningkatkan koefisien gesek (CoF) sekaligus laju keausan spesifik.

#### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Islam Indonesia yang telah mendanai penelitian ini dengan nomor kontrak 002/Dir/DPPM/70/Pen.Kerjasama/IV/2024.

#### Daftar Pustaka

- Afiefudin, M., Widodo, R., & Rusiyanto, R. (2023). Fabrication and Characterization of Asbestos Free Brake Pads Composite using *Elaeocarpus Ganitrus* as Reinforcement. *Automotive Experiences*, 6, 359–371. <https://doi.org/10.31603/ae.9367>
- Christou, A., Giechaskiel, B., Olofsson, U., & Grigoratos, T. (2025). Review of Health Effects of Automotive Brake and Tyre Wear Particles. *Toxics*, 13(4), 301.
- Darmawan, A., Purboputro, P., & Febriantoko, B. (2020). The aluminum powder size' effect on rice plant fiber reinforced composite to hardness, wear and coefficient of friction of brake lining. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 722, 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/722/1/012002>
- Elhafid, M. M., Susilo, D. D., & Widodo, P. J. (2017). Pengaruh bahan kampas rem terhadap respon getaran pada sistem rem cakram. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 12(1), 1–7.
- Ferdiansyah, F., Premesti, A. S. A., Fathichin, A. R., Ariani, B. M. G., Fahmi, A. H., & Mirzayanti, Y. W. (2023). *Review Studi: Analisa Pemanfaatan Limbah Sekam Padi sebagai Bahan Material Maju*. 3.
- Ghazali, C. M. R., Kamarudin, H., Shamsul, J., Abdullah, M. M. A. B., & Rafiza, A. (2012). Mechanical properties and wear behavior of brake pads produced from palm slag. *Advanced Materials Research*, 341, 26–30.
- He, X., Pan, Z., & Li, H. (2025). A Study on the Compaction Behavior and Parameter Sensitivity of Curing Phenolic Thermal Protection Material Strips. *Polymers*, 17, 1045. <https://doi.org/10.3390/polym17081045>
- Imran, A., Siregar, J., Rejab, M., Cionita, T., Hadi, A., Jaafar, J., Fitriyana, D., & Dewi, R. (2024). Opportunities and challenges in the sustainable integration of natural fibers and particles in friction materials for eco-friendly brake pads. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 4, 337–367. <https://doi.org/10.31603/mesi.12271>
- Singh, J., & Singh, H. (2015). A Review on Utilization of Rice Husk Ash in Concrete. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 2(11), 1–7.
- Khafidh, M., Putera, F. P., Yotenka, R., Fitriyana, D. F., Widodo, R. D., Ismail, R., Irawan, A. P., Cionita, T., Siregar, J. P., & Ismail, N. H. (2023). A study on characteristics of brake pad composite materials by varying the composition of epoxy, rice husk, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Automotive Experiences*, 6(2), 303–319. <https://doi.org/10.31603/ae.9121>
- Li, T., Song, Z., Yang, X., & Du, J. (2022). Influence of processing parameters on the mechanical properties of peek plates by hot compression molding. *Materials*, 16(1), 36.

- Lv, W., Wang, T., Wang, Q., Yap, K. K., Song, F., & Wang, C. (2024). Tribological and Mechanochemical properties of nanoparticle-filled polytetrafluoroethylene composites under different loads. *Polymers*, 16(7), 894.
- Melvin, G., Chai, K. F., & Tamiri, F. M. (2019). *Characterization of carbonized waste materials: Rice husk and saw dust*. 606(1), 012002.
- Mohammed, K., Zulkifli, R., Tahir, M. F. M., & Gaaz, T. S. (2024). A study of mechanical properties and performance of bamboo fiber/polymer composites. *Results in Engineering*, 23, 102396.
- Oladokun, T., Stephen, J. T., Adebayo, A., & Adeyemi, D. (2019). Effect of Moulding Pressure on Brake Lining Produced from Industrial Waste Material: Sawdust. *European Journal of Engineering Research and Science*, 4, 62–68. <https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.6.1368>
- Sallal, H. A., Abdul-Hamead, A. A., & Othman, F. M. (2020). Effect of nano powder (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO) addition on the mechanical properties of the polymer blend matrix composite. *Defence Technology*, 16(2), 425–431.
- Sellami, A., & Elleuch, R. (2023). Green composite friction materials: A review of a new generation of eco-friendly brake materials for sustainability. *Environmental Engineering Research*, 29. <https://doi.org/10.4491/eer.2023.226>
- Sunardi, S., Hamdi, S., Saefuloh, I., Sudrajad, A., Ula, S., & Fawaid, M. (2024). Perilaku Laju Keausan dan Kekerasan Komposit Epoksi yang Diperkuat dengan Serat Gelas dan Partikel Bambu. *Jurnal Teknik Mesin*, 21(2), 64–72.
- Surid, S., Patwary, M. A., & Gafur, M. (2020). A Review on Fabrication and Physico-Mechanical Characterizations of Fiber Reinforced Biocomposites. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9, 399–412.
- Tong, H., Qian, L., Leng, F.-G., & Qiao, T.-L. (2021). *Research progress of rice husk ash in solidified soil*. 293, 02018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129302018>