

Pengaruh Variasi Suhu pada Produksi Komposit *Eco-Friendly Friction Material* terhadap Sifat Mekanik dan Tribologi

Muhammad Alfaarisi Maulana Kasim^{1,2}, Mohamad Rizky Djati Admoko², Muhammad Errizky Wibowo², Akhmad Fauzi², Muhammad Khafidh^{1,2*}

¹Program Studi Magister Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman, Yogyakarta, 55501, Indonesia

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang Km 14.5, Sleman, Yogyakarta, 55501, Indonesia

*E-mail: khafidh@uii.ac.id

Abstract

This research aims to investigate the effect of temperature variations during the fabrication process of brake pad composite materials on their mechanical and tribological characteristics. The developed composite utilizes rice husk waste as the reinforcing filler, with phenolic resin serving as the binder/matrix. Specimen preparation was conducted using the hot compression molding method at three temperature variations: 120°C, 150°C, and 180°C. Each specimen was subjected to comprehensive testing, including density, tensile strength, impact strength, flexural strength, coefficient of friction, and specific wear rate measurements. The results consistently indicate that the processing temperature of 180°C represents the optimal condition. At this temperature, significant improvements were observed in all measured properties, including higher density, tensile, impact, and flexural strengths, along with a higher coefficient of friction and lower specific wear rate. These improvements are attributed to the formation of a denser composite structure and stronger inter-particle bonding resulting from the more complete curing of the phenolic resin. Conversely, the specimens processed at 120°C and 150°C exhibited less optimal curing behavior, resulting in a less dense composite structure and lower mechanical and tribological performance.

Keywords: composite, brake pad, rice husk, hot compression, tribological characteristics

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi suhu selama proses fabrikasi material komposit kampas rem terhadap karakteristik mekanik dan tribologinya. Komposit yang dikembangkan menggunakan limbah sekam padi sebagai bahan penguat dengan resin fenolik sebagai matriks pengikat. Pembuatan spesimen dilakukan menggunakan metode *hot compression molding* dengan tiga variasi suhu, yaitu 120°C, 150°C, dan 180°C. Setiap spesimen kemudian dikarakterisasi melalui pengujian densitas, kekuatan tarik, kekuatan impak, kekuatan lentur (*flexural strength*), koefisien gesek, dan laju keausan spesifik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu pemrosesan 180°C merupakan kondisi yang paling optimal. Pada suhu tersebut, terjadi peningkatan seluruh karakteristik yang diuji, meliputi peningkatan densitas, kekuatan tarik, impak, dan lentur, disertai dengan meningkatnya koefisien gesek serta menurunnya laju keausan spesifik. Peningkatan sifat tersebut dikaitkan dengan terbentuknya struktur komposit yang lebih padat dan ikatan antarpartikel yang lebih kuat akibat proses pematangan (*curing*) resin fenolik yang lebih sempurna. Sebaliknya, spesimen yang diproses pada suhu 120°C dan 150°C menunjukkan proses pematangan resin yang kurang optimal, sehingga menghasilkan struktur komposit yang kurang padat serta performa mekanik dan tribologi yang lebih rendah.

Kata kunci: komposit, kampas rem, sekam padi, hot compression, karakter tribologi

1. Pendahuluan

Pertumbuhan industri otomotif di Indonesia menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam beberapa dasawarsa terakhir, didorong oleh peningkatan taraf hidup dan daya beli masyarakat [1]. Tingginya angka penjualan kendaraan baru, baik sepeda motor maupun mobil, secara langsung memacu perkembangan industri manufaktur komponen otomotif dalam negeri untuk memenuhi kebutuhan rantai pasok yang beragam. Salah satu komponen vital dengan permintaan pasar yang tinggi adalah kampas rem. Kampas rem merupakan komponen yang harus diganti dalam rentang waktu tertentu sehingga kebutuhan terhadap komponen ini sangat tinggi.

Kampas rem, atau *brake pad*, berfungsi memperlambat dan menghentikan laju kendaraan melalui mekanisme gesekan antara material kampas dengan piringan rem atau tromol. Sifat mekanik yang diharapkan pada produk kampas rem antara lain ketahanan korosi, kekerasan, kekuatan tarik, dan ketahanan panas. Sedangkan sifat tribologinya yang diinginkan yaitu memiliki keausan yang kecil dan koefisien gesek yang tinggi [2]. Beban kerja termal dan mekanik pada

kampas rem sangatlah tinggi, bahkan dapat mencapai 90% dari seluruh komponen kendaraan saat pengereman pada kecepatan tinggi. Secara tradisional, kampas rem umum dibuat dari bahan dasar asbes yang dicampur dengan unsur penguat seperti SiC, Mn, atau Co. Material asbes banyak digunakan karena pertimbangan biaya yang relatif murah serta memiliki sifat mekanik dan tribologi yang memadai. Namun, kampas rem berbasis asbes rentan mengalami penurunan performa atau fading pada suhu kerja di atas 200°C. Penggunaan asbes secara berkelanjutan juga terbukti menimbulkan risiko kesehatan serius, termasuk kanker paru-paru dan kanker saluran pernapasan [3]. Oleh karena itu, pengembangan material kampas rem non-asbes (*non-asbestos organic* atau NAO) menjadi keharusan, tidak hanya untuk meningkatkan kualitas performa pada suhu tinggi, tetapi juga untuk menghilangkan risiko bahaya kesehatan yang ditimbulkan oleh asbes. Kajian terhadap cakram rem baru dan bekas juga menunjukkan pentingnya karakteristik mekanik dan tribologi komponen yang saling bergesekan dalam sistem pengereman [4].

Upaya untuk mengembangkan kampas rem yang lebih ramah lingkungan dilakukan dengan mengintegrasikan bahan berbasis tumbuhan, seperti limbah sekam padi [5, 6]. Sekam padi merupakan sumber daya limbah pertanian yang sangat melimpah di Indonesia, dengan volume produksi diperkirakan mencapai 20% hingga 30% dari total gabah yang dihasilkan per tahun, atau setara dengan jutaan ton [7]. Kandungan silika pada sekam padi mendukung pemanfaatannya sebagai bahan pengisi komposit. Abu sekam padi mengandung kadar silika yang tinggi yaitu 89,17% [8]. Kandungan silika yang tinggi dan lignin yang rendah dapat menghasilkan bahan kampas rem yang memiliki sifat mekanik dan ketahanan aus seperti bahan keramik [9]. Kajian Sellami dan Elleuch [10] membahas pengembangan material gesek hijau sebagai alternatif bahan kampas rem yang lebih berkelanjutan. Oleh karena itu, pemanfaatan sekam padi tidak hanya berkontribusi pada pengurangan limbah, tetapi juga menyediakan alternatif material non-asbes yang lebih berkelanjutan untuk aplikasi kampas rem. Penelitian Novianto dkk. [11] juga menunjukkan potensi penggunaan limbah arang tempurung kelapa dan serbuk tulang sapi sebagai bahan komposit kampas rem melalui proses hot pressing.

Di sisi lain, studi-studi terdahulu telah mengindikasikan bahwa parameter proses manufaktur, terutama suhu *sintering* atau *hot pressing*, memiliki pengaruh krusial terhadap karakteristik mekanik dan tribologi material komposit kampas rem [12, 13]. Penelitian sebelumnya yang menggunakan metode *hand lay-up* dengan resin epoksi sebagai binder menunjukkan keterbatasan, terutama dalam hal pencapaian densitas material yang optimal. Selain itu, resin epoksi diketahui rentan terhadap fenomena *fading* pada eksposur suhu tinggi, menjadikannya kurang ideal untuk aplikasi kampas rem yang beroperasi di bawah kondisi termal ekstrem. Resin fenolik menjadi salah satu opsi solusi karena menawarkan ketahanan termal dan stabilitas struktural yang lebih tinggi. Selain itu, metode *hot compression* juga menjadi opsi untuk menghasilkan material dengan densitas yang lebih tinggi dan struktur yang lebih homogen dibandingkan metode *hand lay-up*. Meskipun telah terdapat literatur yang menginvestigasi komposit kampas rem dengan variasi suhu, penelitian yang secara spesifik berfokus pada optimasi variasi suhu melalui metode hot compression pada komposit yang diformulasikan dari kombinasi resin fenolik dan serbuk sekam padi masih sangat terbatas. Studi terbaru oleh Carlevaris dkk. [14] menunjukkan bahwa sekam padi berpotensi digunakan sebagai bahan komposit gesek rem, meskipun pemakaian pada kondisi pengereman berat dapat meningkatkan keausan. Temuan tersebut menegaskan pentingnya pengendalian formulasi serta kondisi pemrosesan komposit.

Penelitian ini dirancang untuk memproduksi komposit berbahan dasar resin fenolik (dalam bentuk serbuk), serbuk sekam padi, dengan penambahan aditif fungsional berupa katalis hexamine, oksida besi, dan oksida aluminium. Metode *hot compression molding* akan diterapkan dengan mengendalikan variasi suhu sebagai parameter kunci untuk mengoptimalkan proses fabrikasi spesimen komposit kampas rem. Komposit yang dihasilkan selanjutnya akan dikarakterisasi secara komprehensif, mencakup evaluasi karakteristik mekanik dan tribologi.

2. Material dan metode penelitian

2.1. Material

Bahan komposit yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari resin fenolik, sekam padi, aluminium oksida, besi oksida, dan katalis hexamin. Sekam padi dikarbonisasi dalam mesin furnace pada suhu 600°C selama 60 menit untuk meningkatkan kandungan silika amorf hingga di atas 90% [15]. Serbuk hasil karbonisasi kemudian digiling dengan mixer crusher dan diayak menggunakan saringan stainless steel dengan ukuran mesh 100. Resin fenolik dan katalis hexamin yang berbentuk kristal dihaluskan terlebih dahulu dengan mixer crusher untuk memperoleh partikel kecil dan memastikan pencampuran yang homogen. Detail komposisi yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi material gesek rem

Material	Komposisi (berat%)
Resin fenolik (C ₈ H ₆ O ₂)	40
Serbuk sekam padi	20
Aluminium oksida (Al ₂ O ₃)	15
Besi oksida (Fe ₂ O ₃)	15
Hexamin	10

2.2. Metode Pembuatan Spesimen

Pada penelitian ini, pembuatan spesimen komposit kampas rem dilakukan menggunakan metode *hot compression molding* dengan komposisi material penyusun yang telah ditetapkan dan diuraikan dalam Tabel 1. Proses dimulai dengan memasukkan seluruh bahan penyusun ke dalam wadah dan mencampurkannya secara homogen menggunakan mixer selama 5 menit. Setelah pencampuran, bahan tersebut dimasukkan ke dalam cetakan untuk dilakukan tahap pra-kompresi pada suhu ruang selama 5 menit guna memadatkan spesimen awal. Selanjutnya, dilakukan kompresi utama dengan tekanan sebesar 10 MPa selama durasi 30 menit menggunakan mesin *hot press*, di mana proses ini divariasikan pada tiga suhu perlakuan panas yang telah ditentukan, yaitu 120°C, 150°C, dan 180°C. Setelah spesimen dilepaskan dari cetakan, proses dilanjutkan dengan perlakuan post-curing di dalam oven pada suhu 150°C selama 4 jam untuk memastikan ikatan matriks resin yang optimal. Detail parameter pengujian dan kode spesimen disajikan pada Tabel 2, dan setiap pengujian dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali untuk memverifikasi keberulangan (*repeatability*) hasil.

Tabel 2. Parameter pengujian

Kode Spesimen	Variabel bebas	Variabel Terikat	Variabel Kontrol
A120	Suhu 120°C	Uji densitas, uji tarik, uji impak, uji bending, uji keausan, dan uji gesekan	• Komposisi: Resin fenolik 40%, katalis <i>hexamine</i> 10%, sekam padi 20%, aluminium oksida 15% dan besi oksida 15%, • Tekanan 10 MPa • Waktu pengepresan 30 menit • Suhu curing 150°C • Waktu curing 4 jam
A150	Suhu 150°C		
A180	Suhu 180°C		

2.3. Pengujian dan karakterisasi

Spesimen yang telah dicetak akan diuji dengan beberapa jenis pengujian yaitu adalah uji densitas, uji keausan, uji tarik, uji impak, dan uji bending. Standar pengujian yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.

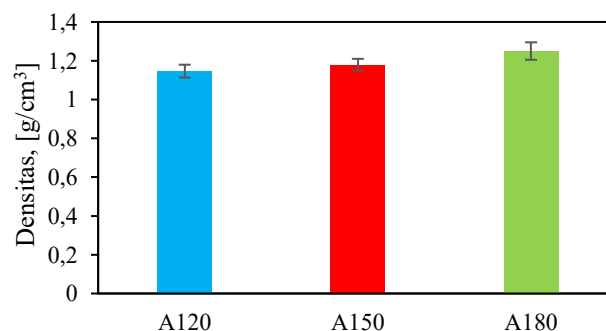
Tabel 3. Jenis pengujian dan karakteristik

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

3.1. Pengujian Densitas

Gambar 1 menyajikan nilai rata-rata densitas, yang diperoleh dari tiga kali pengujian untuk setiap variasi spesimen. Hasil pengujian densitas menunjukkan adanya korelasi antara variasi suhu dengan densitas spesimen. Secara umum, densitas cenderung meningkat seiring dengan kenaikan suhu pemrosesan. Spesimen yang diproses pada suhu 120°C memiliki densitas terkecil dengan nilai rata-rata 1,15 g/cm³. Kenaikan suhu lebih lanjut (150°C dan 180°C) menghasilkan peningkatan densitas. Nilai rata-rata densitas spesimen pada suhu 150°C adalah 1,18 g/cm³, sementara spesimen dengan suhu pemrosesan tertinggi (180°C) mencapai densitas rata-rata 1,25 g/cm³. Peningkatan densitas ini mengindikasikan bahwa suhu yang lebih tinggi memfasilitasi pemadatan material spesimen yang lebih baik.

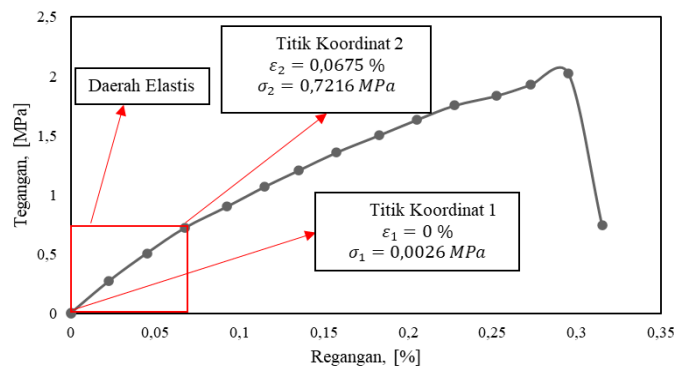


Gambar 1. Densitas pada semua spesimen

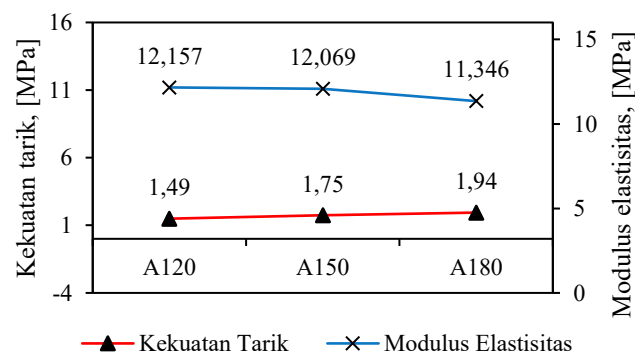
Menurut penelitian yang dilakukan oleh Anggreni, setiap kenaikan variasi suhu pada komposit umumnya menghasilkan nilai densitas yang lebih tinggi [16]. Hal ini menyebabkan komposit menjadi lebih padat, mengurangi porositas, dan meningkatkan kerapatan struktural. Peningkatan ini terjadi karena proses pemanasan yang lebih optimal menyebabkan spesimen mengalami pemadatan ulang. Selain itu, matriks resin mencair dan mengisi rongga kosong di antara serat atau partikel, sehingga porositas menurun, nilai densitas kembali naik, dan ikatan antar komponen menjadi lebih baik.

3.2. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan mengikuti standar ASTM D638-14 tipe IV dengan mesin *Universal Tensile Machine* (UTM). Pada setiap pengujian didapatkan grafik tegangan regangan yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kekuatan tarik merupakan tegangan maksimal yang dicapai oleh spesimen sebelum terjadi kegagalan. Sedangkan modulus elastisitas didapatkan dengan membandingkan tegangan dan regangan saat fase elastis. Sebagai contoh, modulus elastisitas pada material A120-1 didapatkan dari selisih nilai tegangan dan regangan pada titik koordinat kedua dan koordinat pertama, lihat Gambar 2. Hasil kekuatan tarik dan modulus elastisitas dari semua pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Grafik tegangan-regangan pada spesimen A120-1

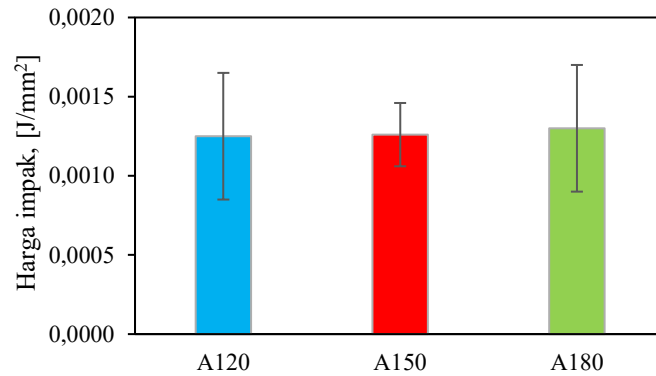


Gambar 3. Kekuatan tarik dan modulus elastisitas pada semua spesimen

Pada Gambar 3 terlihat bahwa variasi suhu mempengaruhi kekuatan tarik spesimen yang diuji. Spesimen pada suhu 120°C memiliki kekuatan tarik terkecil dengan nilai rata-rata 1,49 MPa. Sedangkan spesimen dengan variasi suhu 150°C mengalami kenaikan nilai kekuatan tarik menjadi 1,75 MPa. Pada variasi 180°C, nilai kekuatan tarik mencapai nilai yang tertinggi, yaitu 1,94 MPa. Nilai modulus elastisitas menunjukkan tren yang sebaliknya, semakin tinggi suhu pemrosesan menghasilkan nilai modulus elastisitas yang lebih kecil. Modulus elastisitas pada spesimen dengan variasi suhu 120°C, 150°C, dan 180°C adalah 12,157 MPa, 12,069 MPa, dan 11,346 MPa. Pada suhu 180°C, proses *hot compression* dapat meningkatkan kekuatan tarik dari komposit kampas rem dengan memperbaiki struktur mikro dan ikatan antar partikel sehingga membuat spesimen memiliki kepadatan tinggi dan memiliki porositas yang rendah, akan tetapi juga dapat menurunkan modulus elastisitas karena mengalami degradasi elastisitas pada material kampas rem.

3.3. Pengujian Impak

Pengujian impak (impact test) dilakukan dengan metode Charpy sesuai dengan standar ASTM E23. Dalam prosedur ini, spesimen diuji dengan cara dihantam menggunakan pendulum berenergi tinggi yang dilepaskan dari ketinggian, sudut, dan massa yang sudah ditentukan. Data utama yang diperoleh dari pengujian ini adalah sudut ayunan pendulum setelah menghantam spesimen. Sudut tersebut kemudian digunakan untuk menghitung energi yang diserap oleh spesimen selama fraktur. Nilai energi yang diserap ini, yang sering disebut sebagai nilai impak atau ketangguhan impak, merupakan indikator kuantitatif kemampuan material untuk menahan beban kejutan sebelum mengalami kegagalan.

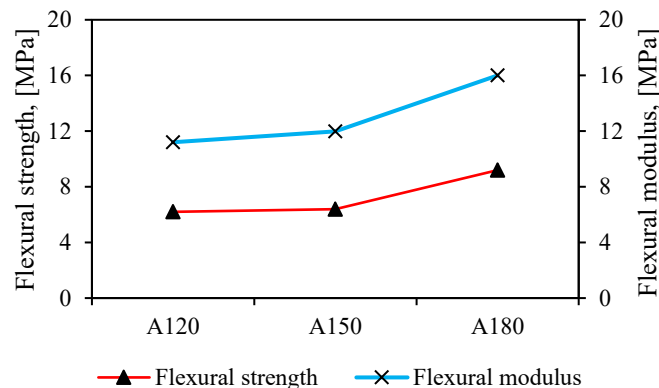


Gambar 4. Harga impact pada semua spesimen

Gambar 4 menunjukkan variasi suhu pada proses pembuatan spesimen memiliki pengaruh terhadap nilai harga impact yang tidak signifikan. Harga impact pada spesimen pada variasi suhu 120°C, 150°C, dan 180°C adalah 0,00125 J/mm², 0,00126 J/mm², dan 0,00132 J/mm². Pada penelitian ini didapatkan tren kenaikan harga impact walaupun tidak signifikan, dimana nilai harga impact tertinggi didapatkan pada spesimen dengan suhu 180°C. Hal ini dapat disebabkan oleh resin mengalami proses pencairan yang optimal sehingga menghasilkan kepadatan pada spesimen dan memiliki porositas rendah.

3.4. Pengujian Bending

Hasil pengujian bending menggunakan standar pengujian ASTM D790-17, pada pengujian spesimen dikenai oleh beban secara bertahap dan terus menerus hingga mencapai nilai P_{max} yang ditunjukkan oleh mesin UTM. Sifat mekanik yang didapat dalam pengujian ini adalah modulus lentur (*Flexural modulus*) dan kekuatan lentur (*Flexural strength*). Modulus lentur adalah kekakuan material yang menunjukkan respon material pada awal, sedangkan kekuatan lentur adalah batas kegagalan dimana material merespons beban maksimal.

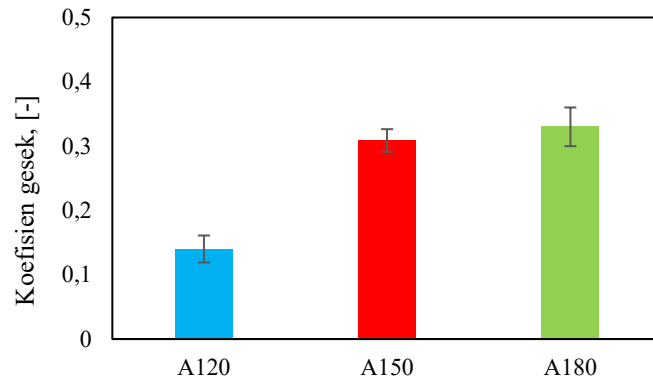


Gambar 5. Flexural strength dan flexural modulus pada semua spesimen

Gambar 5 menunjukkan bahwa variasi suhu pada proses pembuatan spesimen memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai *flexural strength* dan *flexural modulus*. Semakin tinggi suhu akan menghasilkan nilai *flexural strength* dan *flexural modulus* yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan resin mengalami proses pematangan yang lebih optimal. Dari hasil tersebut membuat resin mengikat serat dan bahan pengisi sehingga meningkatkan sifat mekanik spesimen komposit kanvas rem. Ditunjukkan pada spesimen 180°C memiliki nilai yang paling optimal diantara spesimen lainnya.

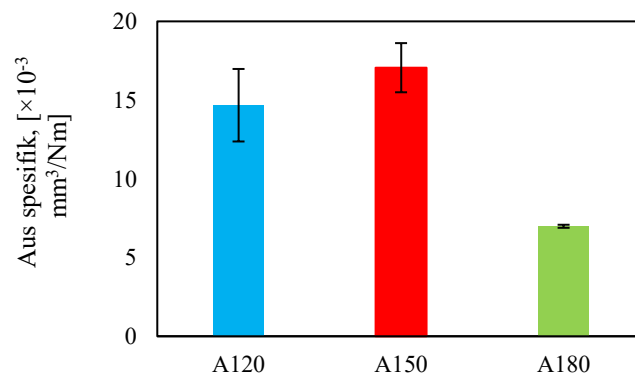
3.5. Pengujian Gesekan dan Aus

Karakterisasi tribologi, yang meliputi pengukuran gesekan dan keausan, dilakukan menggunakan tribometer Pin-on-Disk sesuai dengan standar acuan ASTM G99. Pengujian diterapkan dengan parameter yang seragam untuk semua spesimen, yaitu beban normal 10N, kecepatan rotasi 200 RPM pada diameter lintasan keausan 40 mm, dan diuji selama durasi 10 menit. Tingkat keausan spesimen pin ditentukan melalui metode kehilangan massa, di mana spesimen ditimbang sebelum dan setelah pengujian dengan ketelitian timbangan 0,001 gram. Selisih massa yang diperoleh diidentifikasi sebagai kehilangan material (aus). Sementara itu, koefisien gesek diukur secara in-situ oleh sistem tribometer sebagai rasio antara gaya tangensial (gaya gesek) yang dideteksi oleh sensor terhadap gaya normal (beban) yang diberikan.



Gambar 6. Koefisien gesek pada semua spesimen

Gambar 6 menunjukkan bahwa variasi suhu pada proses pembuatan spesimen mempengaruhi koefisien gesek spesimen, dimana semakin tinggi suhu akan cenderung menghasilkan nilai koefisien gesek yang lebih tinggi. Nilai koefisien gesek pada spesimen dengan suhu pemrosesan 120°C, 150°C, dan 180°C adalah masing-masing 0,135, 0,308, dan 0,333. Pada aplikasi rem, koefisien gesek yang tinggi menjadi hal yang diinginkan untuk memperlambat laju kendaraan. Menurut Subagia, setiap kenaikan variasi suhu pada komposit umumnya meningkatkan nilai koefisien gesek, terutama pada suhu optimal [13]. Namun, penggunaan suhu yang melebihi batas optimal dapat menyebabkan penurunan nilai koefisien gesek akibat degradasi yang dialami oleh resin. Pada pengujian ini, nilai koefisien gesek tertinggi diperoleh pada suhu 180°C, hal ini dapat disebabkan oleh belum mencapai batas maksimal penggunaan suhu. Pada kondisi tersebut, matriks resin mencair dan mengisi rongga kosong di antara serat atau partikel, sehingga porositas menurun dan ikatan antar komponen menjadi lebih baik. Sebagai pembandingan pada komponen pasangan gesek, Khafidh dkk. [4] melaporkan bahwa kondisi permukaan cakram dapat memengaruhi gesekan dan keausan pada sistem pengereman.



Gambar 7. Keausan spesifik pada semua spesimen

Kehilangan massa (Δm) yang didapatkan dari pengujian tribometer Pin-on-Disk dikonversi menjadi volume keausan (V) dengan mempertimbangkan nilai kerapatan (ρ) masing-masing spesimen ($V = \Delta m / \rho$). Selanjutnya, laju keausan spesifik (k) dihitung berdasarkan model keausan Archard [17], yang didefinisikan sebagai volume keausan per unit beban normal dan per unit jarak gesek. Persamaan Archard dirumuskan sebagai berikut:

$$k = \frac{V}{F_N \times s}$$

di mana k adalah laju keausan spesifik (mm^3/Nm), V adalah volume keausan (mm^3), F_N adalah beban normal (N), dan s adalah jarak gesek (m). Secara interpretatif, nilai keausan spesifik yang lebih kecil mengindikasikan ketahanan aus material yang lebih superior [18]. Berdasarkan data pada Gambar 7, spesimen yang menunjukkan ketahanan aus paling rendah (laju keausan spesifik terbesar) adalah variasi suhu 150°C, dengan nilai rata-rata $17,1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Fenomena ini menunjukkan bahwa karakteristik keausan tidak selalu berkorelasi secara linier dengan peningkatan sifat mekanik makroskopik. Meskipun spesimen A150 memiliki nilai densitas dan kekuatan mekanik yang lebih baik dibandingkan A120, proses curing resin fenolik pada suhu tersebut diduga belum berlangsung secara optimal sehingga menghasilkan ikatan antarmuka antara matriks dan partikel penguat yang belum sempurna. Selama proses gesekan, kondisi ini dapat menyebabkan partikel penguat lebih mudah terlepas dari matriks dan membentuk debris abrasif yang mempercepat mekanisme keausan. Sebaliknya, pada spesimen A180, suhu pemrosesan yang lebih tinggi memungkinkan proses curing yang lebih sempurna sehingga menghasilkan ikatan antar komponen yang lebih kuat, struktur yang lebih

padat, serta ketahanan aus yang lebih baik. Pada spesimen dengan variasi suhu 180°C menghasilkan nilai keausan spesifik terendah sebesar $7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, metode *hot compression molding* terbukti efektif untuk fabrikasi komposit berbahan matriks resin fenolik karena memastikan pematangan resin yang optimal seiring kenaikan suhu pengepresan. Hal tersebut secara langsung berkontribusi pada peningkatan sifat mekanik dan tribologi material. Peningkatan suhu molding hingga mencapai 180°C menghasilkan peningkatan signifikan pada kekuatan tarik 1,94 MPa, kekuatan dampak 0,00132 J/mm², dan kekuatan bending 9,195 MPa. Peningkatan ini dikaitkan dengan pencairan resin yang optimal, yang meningkatkan ikatan antar partikel, menghasilkan kepadatan tinggi, dan menekan porositas material. Lebih lanjut, pada suhu optimal 180°C, komposit juga menunjukkan performa tribologi terbaik, dicapai dengan koefisien gesek optimal 0,33 dan laju keausan spesifik terendah $7 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, yang secara keseluruhan menegaskan bahwa suhu 180°C adalah parameter optimal dalam proses pembuatan komposit kampas rem ini.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi yang telah membiayai penelitian ini dengan nomor kontrak induk 126/C3/DT.05.00/PL/2025 dan nomor kontrak turunan 0498.01/LL5-INT/AL.04/2025, 057/DirDPPM/70/DPPM/PTM-KEMDIKTISAINTEK/VI/2025.

Daftar Pustaka

- [1] Faturrochman M, Yaasiin THJJoEE, Sustainability. Efektivitas Subsidi Kendaraan Listrik terhadap Perkembangan Industri Otomotif dalam Mewujudkan Program Making Indonesia 4.0. 2024;1(3):1-17.
- [2] Shang X, Yu K, Zuo X, Yang HJTI. Low wear braking material with high friction coefficient. 2022;173:107608.
- [3] Ekpruke E, Ossia CV, Big-Alabo AJJoME. Recent progress and evolution in the development of non-asbestos based automotive brake pad-a review. 2022;17(2):051-63.
- [4] Khafidh M, Dhewanto SA, Kasim MAM, Purwaningrum Y. Analisis Sifat Mekanik dan Tribologi pada Cakram Baru dan Bekas. ROTASI. 2023;25(4):14-22. doi:10.14710/rotasi.25.4.14-22.
- [5] Khafidh M, Putera FP, Yotenka R, Fitriyana DF, Widodo RD, Ismail R, et al. A study on characteristics of brake pad composite materials by varying the composition of epoxy, rice husk, Al₂O₃, and Fe₂O₃. 2023;6(2):303-19.
- [6] Irawan AP, Fitriyana DF, Siregar JP, Cionita T, Anggarina PT, Utama DW, et al. Influence of varying concentrations of epoxy, rice husk, Al₂O₃, and Fe₂O₃ on the properties of brake friction materials prepared using hand layup method. 2023;15(12):2597.
- [7] Ferdiansyah F, Premesti ASA, Fathichin AR, Ariani BMG, Fahmi AH, Mirzayanti YW, editors. Review Studi: Analisa Pemanfaatan Limbah Sekam Padi sebagai Bahan Material Maju. Prosiding SENASTITAN: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan; 2023.
- [8] Setyanto RHJPMITI. Teknik Manufaktur Komposit Hijau dan Aplikasinya. 2012;11(1).
- [9] Hanif Y, Riyanto AJJAJIR, Inovasi. Studi Eksperimental Sekam Padi sebagai Zat Campuran pada Komposit Termoplastik untuk Meningkatkan Sifat Isolator. 2022;117-24.
- [10] Sellami A, Elleuch R. Green composite friction materials: A review of a new generation of eco-friendly brake materials for sustainability. Environmental Engineering Research. 2024;29(3):230226. doi:10.4491/eer.2023.226.
- [11] Novianto A, Ismail R, Saputra BA. Karakteristik Kampas Rem Dari Komposit Serbuk Arang Tempurung Kelapa dan Serbuk Tulang Sapi. ROTASI. 2023;25(3):52-58. doi:10.14710/rotasi.25.3.52-58.
- [12] Dwiwati ST, Kholil A, Widyarma FJJKEDE. Pengaruh penambahan karbon pada karakteristik kampas rem komposit serbuk kayu. 2017:108-14.
- [13] Subagia IA, Suardana N, Robby G, Steven FJJEDM. Pengaruh Temperatur Sinter Terhadap Kekerasan dan Keausan Kampas Rem Berbasis Komposit Hibrida Serbuk Tempurung Kelapa/Alumina/Phenolic Resin. 2018;11(2):42-8.
- [14] Carlevaris D, Nogueira APG, Rita DA, Candeo S, Fambri L, Menapace C, et al. Novel ingredients for sustainable brake pad friction materials: Benzoxazine resins and rice husk. Wear. 2025;564-565:205698. doi:10.1016/j.wear.2024.205698.
- [15] Tong H, Qian L, Leng F-G, Qiao T-L, editors. Research progress of rice husk ash in solidified soil. E3S Web of Conferences; 2021: EDP Sciences.
- [16] Anggreni Y. PEMBUATAN KOMPOSIT AMC DI PERKUAT HYBRID BAGGASE ASH-ALUMINA TERHADAP VARIASI KOMPAKSI DAN SUHU SINTERING DENGAN METODE METALURGI SERBUK: Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung; 2024.
- [17] Varenberg MJTL. Adjusting for running-in: Extension of the Archard wear equation. 2022;70(2):59.
- [18] Liao Z, Hua N, Chen W, Huang Y, Zhang TJI. Correlations between the wear resistance and properties of bulk metallic glasses. 2018;93:290-8.