



**KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS KAMPAS REM
MOTOR BERBASIS EPOKSI BERPENGUAT SERBUK
ARANG KAYU JATI DAN KERAMIK**

SKRIPSI

Oleh:

Ramadhany Cantika N

221910101005

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS JEMBER

JURUSAN TEKNIK MESIN

PROGRAM STUDI STRATA SATU TEKNIK MESIN

2026



**KEKERASAN DAN KETAHANAN AUS KAMPAS REM
MOTOR BERBASIS EPOKSI BERPENGUAT SERBUK
ARANG KAYU JATI DAN KERAMIK**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
Program studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

SKRIPSI

Oleh:

Ramadhany Cantika N

221910101005

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS JEMBER

JURUSAN TEKNIK MESIN

PROGRAM STUDI STRATA SATU TEKNIK MESIN

2026

PERSEMBAHAN

Skripsi ini berjudul Kekerasan dan Ketahanan Aus Kampas Rem Motor Berbasis Epoksi Berpenguat Serbuk Arang Kayu jati dan Keramik dengan sepenuh hati saya persembahkan sebagai ucapan terima kasih kepada :

Ibu Husnul Khotimah dan Bapak Kosjoko selaku kedua orang tua saya dan teman-teman saya tercinta yang telah membantu dan mendukung selama menempuh pendidikan serta selalu mendoakan yang terbaik untuk saya.

Ibu Ir.Rahma Rei Sakura S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Skripsi

Bapak Dr. Ir.Andi Sanata S.T., M.T., selaku (DPA) saya.

Bapak Ir.Sumarji ,S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I

Bapak Skriptyan Noor Hidayatullah Syuhri ST., MT., Ph.D selaku Dosen Penguji

II

Almamater tercinta Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember

MOTTO

“Nikmati waktumu bersama teman dan abadikan momen bersama mereka ”

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ramadhany Cantika N

NIM : 221910101005

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: *Kekerasan dan Ketahanan Aus Kampas Rem Motor Berbasis Epoksi Berpenguat Serbuk Arang Kayu jati dan Keramik* adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan skripsi ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 4 Januari 2026
Yang menyatakan,

Ramadhany Cantika N
NIM 221910101005

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul Kekerasan dan Ketahanan Aus Kampas Rem Motor Berbasis Epoksi Berpenguat Serbuk Arang Kayu jati dan Keramik telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada :

Hari : Rabu

Tanggal : 7 Januari 2026

Tempat : Ruang Rapat IsDB Lantai 3, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Pembimbing

Tanda Tangan

1. Pembimbing Utama

Nama : Ir.Rahma Rei Sakura

S.T., M.T.,

NIP : 199102282022032003

(.....)

Penguji

1. Penguji I

Nama : Ir.Sumarji ,S.T., M.T.

NIP : 196802021997021001

(.....)

2. Penguji II

Nama : Skriptyan Noor Hidayatullah

Syuhri ST., MT., Ph.D

NIP : 199101272024061002

(.....)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur pirolisis terhadap sifat mekanik dan tribologi kampas rem komposit berbasis serbuk arang kayu jati. Arang kayu jati dibuat melalui proses pirolisis pada temperatur 350°C, 450°C, dan 550°C, kemudian dicampur dengan pasir besi, serbuk keramik, dan resin epoxy dengan komposisi yang konstan. Spesimen diuji menggunakan uji kekerasan, uji keausan secara tribologi, serta dianalisis struktur mikro dan komposisi unsur menggunakan SEM dan EDX.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pirolisis berpengaruh signifikan terhadap karakteristik material. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada temperatur pirolisis 550°C, diikuti oleh 350°C dan 450°C, sedangkan kampas rem komersial memiliki nilai kekerasan paling rendah. Analisis EDX menunjukkan bahwa kandungan karbon tertinggi terdapat pada temperatur 550°C, sedang pada 350°C, dan terendah pada 450°C. Laju keausan menunjukkan hubungan berbanding terbalik dengan kekerasan dan kandungan karbon, di mana spesimen dengan kekerasan lebih tinggi memiliki laju keausan yang lebih rendah. Hasil SEM memperlihatkan bahwa peningkatan temperatur pirolisis menghasilkan morfologi permukaan yang lebih kasar dan berpori. Hasil ini menunjukkan bahwa arang kayu jati hasil pirolisis temperatur tinggi berpotensi digunakan sebagai bahan alternatif kampas rem komposit yang ramah lingkungan.

Kata kunci: Kampas rem, Temperatur pirolisis, Arang kayu jati

ABSTRACT

This study investigates the effect of pyrolysis temperature on the mechanical and tribological properties of teak wood charcoal-based composite brake pads. The teak wood charcoal was produced through pyrolysis at temperatures of 350°C, 450°C, and 550°C, then mixed with iron sand, ceramic powder, and epoxy resin with a constant composition. The specimens were subjected to hardness testing,

wear testing using a tribological method, and microstructural characterization using SEM and elemental analysis using EDX.

The results show that increasing pyrolysis temperature significantly affects material properties. The highest hardness value was obtained at a pyrolysis temperature of 550°C, followed by 350°C and 450°C, while the commercial brake pad showed the lowest hardness. EDX analysis indicated that carbon content was highest at 550°C, moderate at 350°C, and lowest at 450°C. The wear rate exhibited an inverse relationship with hardness and carbon content, where specimens with higher hardness showed lower wear depth rates. SEM observations revealed that higher pyrolysis temperatures resulted in rougher and more porous surface morphologies. These results indicate that teak wood charcoal pyrolyzed at higher temperatures has strong potential as an alternative raw material for environmentally friendly composite brake pads.

Keywords: Brake pad, Pyrolysis temperature, Teak wood charcoal

RINGKASAN

Kekerasan dan Ketahanan Aus Kampas Rem Motor Berbasis Epoksi Berpenguat Serbuk Arang Kayu jati dan Keramik, Ramadhany Cantika N, 221910101005; 67 Halaman; Jurusan Teknik Mesin Program Studi Strata 1 Teknik Mesin Universitas Jember.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pirolisis serbuk arang kayu jati (350°C, 450°C, dan 550°C) terhadap sifat mekanik dan tribologi kampas rem komposit, serta membandingkannya dengan kampas rem komersial. Komposit disusun dari serbuk arang kayu jati sebagai penguat, pasir besi dan serbuk keramik sebagai filler, serta epoxy sebagai matriks. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kekerasan, uji keausan (tribologi), serta karakterisasi mikrostruktur menggunakan SEM dan EDX. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan karbon tertinggi diperoleh pada arang kayu jati hasil pirolisis 550°C, diikuti 350°C dan terendah pada 450°C. Perbedaan ini dipengaruhi oleh tingkat dekomposisi volatil dan kematangan struktur karbon selama proses pirolisis. Nilai kekerasan kampas rem meningkat seiring peningkatan kandungan karbon, dengan nilai tertinggi pada spesimen 550°C, kemudian 350°C, dan 450°C, sedangkan kampas rem komersial menunjukkan nilai kekerasan terendah. Hasil uji keausan menunjukkan kecenderungan berlawanan, di mana laju keausan menurun dengan meningkatnya kekerasan dan kandungan karbon, sehingga spesimen 550°C memiliki ketahanan aus terbaik. Pengamatan SEM menunjukkan bahwa spesimen 350°C memiliki morfologi paling kasar dan berserabut akibat karbonisasi yang belum sempurna. Spesimen 450°C tampak lebih homogen dan padat, sedangkan spesimen 550°C menunjukkan struktur paling halus dan padat namun disertai retakan mikro yang mengindikasikan sifat getas. Hasil EDX mendukung temuan ini dengan menunjukkan peningkatan fraksi karbon dan penurunan unsur volatil pada suhu pirolisis tinggi.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas berkat rahmat dan kasih-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kekerasan dan Ketahanan Aus Kampas Rem Motor Berbasis Epoksi Berpenguat Serbuk Arang Kayu jati dan Keramik” yang disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember. Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak selama proses pengerjaan. Oleh karena itu, penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada;

1. Allah SWT yang telah memberikan saya kemudahan, pertolongan, kekuatan, kesehatan, dan keajaiban lainnya dalam menempuh kehidupan ini. Terima kasih sebanyak banyaknya kepada Tuhan yang telah memberikan saya arti kehidupan sebenarnya yang membuat kita harus tetap kuat, ikhlas, sabar, dan tegar dalam mengalami hal apapun dan yang selalu setia menemani saya ketika sedang lelah dan jatuh jatuhnya. Namun, berkat rahmat dan karunianya, pada akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Kedua orang tua saya, Ibu Husnul Khotimah dan Bapak Kosjoko yang selalu mengusahakan saya.
3. Ibu Ir.Rahma Rei Sakura S.T., M.T., selaku pembimbing skripsi saya yang sangat cantik, baik dan sabar.
4. Bapak Dr. Ir.Andi Sanata S.T., M.T., selaku (DPA) saya.
5. Bapak Ir.Sumarji ,S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I
6. Bapak Skriptyan Noor Hidayatullah Syuhri ST., MT., Ph.D selaku Dosen Penguji II
7. Kucing saya tercinta yaitu mochi, chiki, owen yang selalu mengembalikan senyum saya ketika saya lelah
8. Nur Cahyo sebagai teman dalam segala hal saya dari maba hingga semester 7, yang banyak membantu kesusahan saya dalam memahami

matkul perkuliahan, walaupun akhirnya harus berpisah sebelum skripsi ini selesai, setidaknya kita masih berteman baik.

9. Teman saya Nisa, Fuja, Om Cici, Ilham Nur, Ilham Liantino, Sultan, Bintang Bima yang merupakan teman terdekat saya saat diperkuliahan Teknik Mesin ini.
10. Teman KKN kemuniloka saya tercinta yang selalu excited mendengar saya sempro dan sidang.
11. Teman seangkatan saya (M24) yang banyak mensupport saya juga dari jauh dan mewarnai perkuliahan saya di Teknik Mesin Unej ini.
12. Teman SMA saya Syafta, Sheva, Purwo, dan Luna (almarhumah teman saya) yang selalu mensupport saya dari SMA.
13. Club MES beserta anggotanya yang sudah menerima saya dari maba hingga sekarang.
14. BPM yang sudah menjadi tempat saya berkembang.
15. Kakak tingkat M23, M22 yang sudah memberi ilmu dan pengalaman ke saya.
16. M25, M26 yang sudah memberikan saya pengalaman menjadi kakak tingkat yang baik dan mengayomi.
17. Bude saya yang sudah merawat saya di perkuliahan ini.
18. Saudara saya Ocha yang selalu menjadi tempat gabut saya ketika lagi males ngerjakan skripsi.
19. Galang Hardiyansyah yang sekarang menemani proses skripsi saya di cafe hingga malam dan selalu mensupport saya, tempat keluh kesah saya.
20. Febrianti teman saya dari TK yang sudah membantu saya ketika ada masalah dihidup saya saat menjelang skripsi ini selesai.
21. Mas Yanu dan mbak Riska yang sering membelikan saya camilan ketika dirumah.
22. Seluruh Dosen Pengajar, Teknisi, dan Staff Akademik Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah membantu dalam berjalannya perkuliahan di Teknik Mesin Universitas Jember.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	II
PERSEMBAHAN	III
MOTTO	IV
PERNYATAAN ORISINALITAS	V
HALAMAN PERSETUJUAN	VI
ABSTRAK	VII
RINGKASAN	IX
PRAKATA	X
DAFTAR GAMBAR	XV
DAFTAR TABEL	XVI
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan dan Manfaat	3
1.3.1 Tujuan.....	3
1.3.2 Manfaat.....	3
1.4 Hipotesis	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Komposit	5
2.1.1 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Fase matriks.....	5
2.1.2 Perhitungan Komposisi Komposit.....	5
2.1.3 Komposit Berdasarkan Penguat	6
2.2 Resin Epoksi	7
2.3 Kayu Jati	7
2.4.1 Limbah Kayu Jati	8
2.4 Keramik Porselin	8
2.5 Pasir Besi	9

2.6	Alat Pirolisis	9
2.7	Kampas Rem	10
2.8	Uji Kekerasan <i>Brinell</i>	10
2.9	Keausan.....	10
2.10	Uji SEM-EDX.....	11
2.11	Penelitian Sebelumnya	12
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		13
3.1	Metode Penelitian	13
3.2	Waktu dan Tempat Penelitian	13
3.2.1	Lokasi Penelitian	13
3.2.2	Waktu Penelitian.....	13
3.3	Alat dan Bahan.....	13
3.3.1	Alat	13
3.3.2	Bahan.....	14
3.4	Variabel Penelitian.....	15
3.4.1	Variabel Penelitian.....	15
3.5	Prosedur Penelitian.....	16
3.6	Diagram Alir Penelitian.....	20
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN		21
4.1	Hasil Penelitian	21
4.2	Hasil Pengujian Temperatur.....	27
4.3	Hasil Pengujian Kekerasan Brinell (HBW).....	27
4.3.1	Hasil Data Uji Kekerasan <i>Brinell</i>	27
4.4	Hasil Pengujian Keausan (Pin-on-Disc).....	29
4.4.1	Data Gaya Gesek.....	29
4.4.2	Data Koefisien Gesek.....	30
4.4.3	Data Hasil Laju Keausan Relatif.....	31
4.5	Hasil Analisis Mikrostruktur (SEM).....	33
4.4.1	Mikrostruktur pada Suhu 350°C.....	33
4.4.2	Mikrostruktur pada Suhu 450°C.....	34
4.4.3	Mikrostruktur pada Suhu 550°C.....	35
4.6	Hasil Analisis Komposisi Unsur (SEM–EDX).....	36

4.6.1	EDX Suhu 350°C	36
4.6.2	EDX Suhu 450°C	36
4.6.3	EDX Suhu 550°C	37
4.7	Pembahasan.....	38
4.7.1	Pembahasan Hasil Uji Temperatur	38
4.7.2	Pembahasan Hasil Uji Kekerasan.....	38
4.7.3	Pembahasan Hasil Koefisien Gesek	39
4.7.4	Pembahasan Hubungan Gaya Gesek – Koefisien Gesek – Ketahanan Aus.....	39
4.7.5	Pembahasan Hasil Pengujian SEM	40
4.7.6	Pembahasan Hasil Pengujian EDX	41
4.7.7	Pembahasan Hubungan SEM–EDX terhadap Sifat Mekanik	42
BAB 5.	KESIMPULAN DAN SARAN	42
5.1	Kesimpulan.....	42
5.2	Saran	42
DAFTAR PUSTAKA.....		44

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komposit	5
Gambar 2.2 resin epoksi.....	7
Gambar 2.3 Kayu Jati.....	8
Gambar 2.4 Keramik Porselin.....	8
Gambar 2.5 Pasir Besi.....	9
Gambar 2.6 Alat Pirolisis	9
Gambar 2.7 Kampas Rem	10
Gambar 2.8 Hasil Uji SEM-EDX Kampas em.....	111
Gambar 3.1 Dimensi ASTM G99 untuk Pengujian Keausan dan ASTM E10 untuk Kekerasan.....	14
Gambar 3. 2 Skema Prosedur Penelitian.....	16
Gambar 3.3 Diagram Alir.....	20
Gambar 4.1 Serbuk Kayu Jati di Pirolisis	21
Gambar 4.2 Hasil Pirolisis Serbuk Kayu Jati.....	22
Gambar 4.3 Pengujian SEM EDX Pada Serbuk Arang Kayu Jati	22
Gambar 4.4 Pengukuran Fraksi Massa untuk Komposit.....	22
Gambar 4.5 Pembuatan Komposit	23
Gambar 4.6 Pencetakan Spesimen	23
Gambar 4.7 Hasil Spesimen.....	23
Gambar 4.8 Spesimen di uji Temperatur.....	24
Gambar 4.9 Spesimen di Mounting	24
Gambar 4.10 Kampas Rem diampelas.....	25
Gambar 4.11 Kampas Rem di uji Kekerasan	25
Gambar 4.12 Kampas Rem di uji Keausan	26
Gambar 4.13 Spesimen di uji SEM.....	26
Gambar 4.14 Grafik Hubungan Hasil Kekerasan dengan Kampas rem Komposit dan Komersial	28
Gambar 4.15 Grafik Hubungan Gaya Gesek dengan Kampas Rem Komposit dan Komersial.....	30
Gambar 4.16 Grafik Hubungan Nilai Koefisien Gesek dengan Kampas Rem Komposit dan Komersial.....	31
Gambar 4.17 Grafik Hubungan Laju Keausan Terhadap Kampas Rem Komposit dan Komersial	32
Gambar 4.18 Hasil SEM Kampas Rem Suhu Pirolisis 350°C	33
Gambar 4.19 Hasil SEM Kampas Rem Suhu Pirolisis 450°C	34
Gambar 4.20 Hasil SEM Kampas Rem Suhu Pirolisis 550°C	35

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu	12
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Temperatur . Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.	
Tabel 4.2 Hasil Uji Kekerasan	28
Tabel 4.3 Data Hasil Gaya Gesek Kampas Rem.....	29
Tabel 4.4 Data Hasil Koefisien Gesek Kampas Rem.....	30
Tabel 4.5 Data Laju Keausan Relatif Kampas Rem.....	31
Tabel 4. 6 Hasil SEM-EDX Suhu pirolisis 350°C	36
Tabel 4.7 Hasil SEM-EDX Suhu pirolisis 450°C	36
Tabel 4.8 Hasil SEM-EDX Suhu pirolisis 550°C	37

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kampas rem adalah salah satu komponen penting pada otomotif untuk berkendara yang aman. Tujuan utama dari kampas rem adalah untuk memperlambat laju kendaraan. Mekanismenya adalah untuk merubah energi kinetik ke energi panas melalui bantuan gesekan. *Asbestos* telah dipilih dalam memproduksi kampas rem karena sifat kimia dan fisik/mechanismenya yang kuat, tetapi dalam beberapa tahun terakhir bahan asbes sudah tidak lagi diproduksi dan penggunaannya semakin dibatasi di industri otomotif karena alasan keselamatan penggunaan asbes dan ketersediaan bahan baku.

Salah satu alternatif untuk mengatasi masalah tersebut yaitu pengembangan kampas rem ramah lingkungan. Kampas rem berbahan ramah lingkungan menjadi perhatian besar bagi beberapa peneliti di dunia otomotif, dikarenakan bahan ramah lingkungan mempunyai dampak yang minim terhadap kesehatan dan emisi non gas buang. Berbagai upaya telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya dalam mengembangkan material alternatif alami sebagai kampas rem ramah lingkungan. Material alami yang telah dilaporkan antara lain sekam padi dan tempurung kelapa (Syaputra, 2017), Serbuk kayu jati dan sekam padi (Lubis dkk., 2024), Serat rami dan serbuk tempurung kelapa (Sudia, 2019), dan lain-lain.

Limbah kayu jati seperti serbuk gergaji berpotensi besar sebagai pengisi bahan komposit, dapat mengurangi biaya produksi dan dampak lingkungan. Kayu jati memiliki sifat mekanik yang kuat (Rizanti, 2017). Kayu jati yang dipirolisis secara signifikan meningkatkan kandungan karbon tetapnya (Ramjani dkk., 2024), penambahan karbon menunjukkan nilai kekerasan yang tinggi (Suresha dkk., 2021). Penelitian oleh (Khafidh dkk., 2023) menunjukkan bahwa Penambahan bahan keramik seperti aluminium oksida (Al_2O_3) dan besi oksida (Fe_2O_3) sebagai penguat dalam bantalan rem komposit secara signifikan meningkatkan kepadatan,

dan kekerasan. Material ini juga berkontribusi pada peningkatan ketahanan aus dan stabilitas termal yang penting untuk kinerja cepat pada suhu tinggi. Meskipun demikian, studi ini mencatat tantangan homogenitas campuran akibat perbedaan kepadatan tinggi antara keramik ini dengan matriks resin epoksi. Oleh karena itu, penelitian saya mengeksplorasi penggunaan keramik porselen sebagai pengganti, dengan fokus pada perbandingan sifat mekanik, dan evaluasi ekonomi, untuk menemukan solusi yang berpotensi lebih baik atau lebih ekonomis.

Pasir besi dicirikan sebagai bahan keramik dengan kekerasan inheren yang tinggi, penambahannya pada komposit diharapkan dapat meningkatkan kekerasan keseluruhannya jika dibandingkan dengan bahan tanpa pasir besi. Hal ini sangat penting untuk meningkatkan kinerja keausan, karena bahan dengan kekerasan yang lebih besar menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap gesekan (Apriliani dkk., 2024). Penelitian saya menggunakan resin epoksi sebagai pengikat komposit karena resin epoksi sangat dihargai karena kemampuan prosesnya yang sangat baik, ketahanan terhadap korosi, dan sebagai perekat suhu tinggi (H. Wei dkk., 2023).

Dari beberapa penelitian terdahulu diatas , para peneliti melaporkan serbuk kayu hasil limbah dari berbagai jenis kayu masih eksplorasi dalam tahap dasar. Oleh karena itu , dalam penelitian ini serbuk kayu jati setelah proses pengarangan menjadi salah satu alternatif kampas rem ramah lingkungan. Studi ini membahas tentang metode pirolisis untuk mendapatkan kandungan karbon yang tinggi dan mendapatkan sifat mekanik yang baik dengan menggunakan metode pengujian kekerasan, dan keausan .

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur pirolisis terhadap kandungan nilai karbon kampas rem motor berbasis serbuk arang kayu jati
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur pirolisis terhadap sifat kekerasan dan ketahanan aus kampas rem motor berbasis serbuk arang kayu jati

1.3 Tujuan dan Manfaat

Adapun tujuan dan manfaat pada penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1.3.1 Tujuan

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk:

1. Menganalisis pengaruh variasi temperatur pirolisis terhadap kandungan nilai karbon kampas rem motor berbasis serbuk arang kayu jati
2. Menganalisis pengaruh variasi temperatur pirolisis terhadap sifat kekerasan dan ketahanan aus kampas rem motor berbasis serbuk arang kayu jati

1.3.2 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai berikut:

1. Penelitian ini dapat menambah wawasan mengenai pengaruh temperatur pirolisis terhadap kandungan nilai karbonnya dan karakteristik mekanik bahan komposit berbasis biomassa, khususnya dalam aplikasi kampas rem.
2. Penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pengembangan material kampas rem motor alternatif yang lebih ramah lingkungan, aman digunakan, dan memiliki daya tahan gesek serta kekerasan yang memadai.

1.4 Hipotesis

Adapun hipotesis pada penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Hipotesis Alternatif (H_a)
Variasi temperatur pirolisis berpengaruh signifikan terhadap kandungan nilai karbon, sifat kekerasan dan ketahanan aus kampas rem berbasis serbuk arang kayu jati.
2. Hipotesis Nol (H_0)
Variasi temperatur pirolisis tidak berpengaruh signifikan terhadap kandungan nilai karbon, sifat kekerasan, dan ketahanan aus kampas rem berbasis serbuk arang kayu jati.

1.5 Batasan Masalah

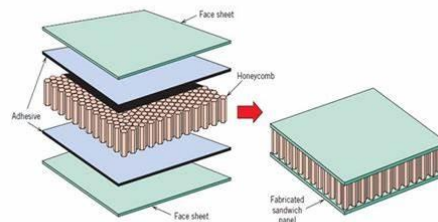
Adapun batasan masalah pada penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Perbandingan fraksi massa pada resin epoksi sebagai matriksnya sebesar 17%, serbuk arang kayu jati sebagai penguatnya sebesar 30%, serbuk besi sebagai penguatnya sebesar 10%, serbuk keramik porselin sebagai penguatnya sebesar 43%.
2. Ukuran partikel yang digunakan pada pembuatan kampas rem ramah lingkungan ini adalah 80 mesh.
3. Jenis serbuk kayu jati berasal dari daerah jember selatan.
4. Suhu pirolisis 350 °C, 450 °C, 550 °C
 - a. Suhu pirolisis dari suhu 100°C lalu diholding selama 15 menit, 200 °C dan diholding selama 15 menit, 300 °C diholding selama 15 menit, 350 °C selama 90 menit.
 - b. Suhu pirolisis dari suhu 100°C lalu diholding selama 15 menit, 200 °C dan diholding selama 15 menit, 300 °C diholding selama 15 menit, 400 °C diholding selama 15 menit, 450 °C selama 90 menit.
 - c. Suhu pirolisis dari suhu 100°C lalu diholding selama 15 menit, 200 °C dan diholding selama 15 menit, 300 °C diholding selama 15 menit, 400 °C diholding selama 15 menit, 500 °C diholding selama 15 menit, 550 °C selama 90 menit.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komposit

Material komposit merupakan gabungan dari material dasar dan material pengisi. Material dasar juga disebut sebagai matriks atau material pengikat karena material ini mengelilingi dan mengikat penguat dari material lain. Material pengisi atau penguat berupa fragmen, partikel, dan serat, serabut dari material alami atau sintetis (Tsai & Hahn, 2018).



Gambar 2.1 Komposit

(Sumber : (Tsai & Hahn, 2018))

2.1.1 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Fase matriks

a. *Polymer matrix composites* (PMC)

PMC terdiri dari plastik *thermosetting* atau matriks termoplastik dengan penguatan tersebar dari karbon, kaca, Kevlar, serat logam (Rajak dkk., 2019).

2.1.2 Perhitungan Komposisi Komposit

Diperlukan perhitungan terkait massa serat (m), volume serat (V_s), dan volume komposit (V_c) sebelum komposit dicetak. Perhitungan komposisi dapat dihitung berdasarkan volume total cetakan. Rumus yang digunakan untuk menentukan komposisi komposit dapat dilihat dibawah ini:

a. Volume cetakan (cm^3)

Volume cetakan = volume komposisi

$$V_{\text{komposisi}} = p \times l \times t \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

p = panjang komposit (cm)

l = lebar komposit (cm)

t = ketebalan komposit (cm)

b. Volume Komponen

$$V_i = f_v \times V_{Total} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

V_i = volume komponen (cm³)

f_v = fraksi volume komponen (%)

V_{Total} = total volume komponen (cm³)

c. Massa Komponen

$$massa\ Komponen = V_i \times \rho_i \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

V_i = Volume komponen (cm³)

ρ_i = massa jenis komponen (gr/cm³)

2.1.3 Komposit Berdasarkan Penguat

a. Partikel

Komposit yang diperkuat partikel dapat diaplikasikan pada permukaan yang membutuhkan ketahanan aus yang tinggi (Rajak dkk., 2019).

b. Serat

Pada material komposit yang diperkuat serat, fase terdispersi dari serat sintesis seperti kaca, karbon, basal dan Kevlar dalam struktur komposit menunjukkan peningkatan sifat material seperti kekuatan tinggi, kekakuan dan ketahanan terhadap bahan kimia, suhu dan keausan (Rajak dkk., 2019).

2.2 Resin Epoksi

Resin epoksi memiliki sifat mekanik yang baik, meliputi kekuatan tarik tinggi dan modulus Young (Rehim & Turkey, 2022). Nilai kekerasannya adalah 85-90 Shore D. Resin epoksi juga memiliki sifat daya rekat yang tinggi, ketahanan korosi, dan tahan panas, membuatnya cocok untuk aplikasi di bidang yang menuntut seperti otomotif, senjata, penerbangan, dan kedirgantaraan (H. Z. Weidkk., 2023).



Gambar 2.2 resin epoksi
(Sumber : Arif dkk., 2015)

2.3 Kayu Jati

Kayu jati dikenal karena sifat mekaniknya yang luar biasa, termasuk kekuatan tinggi dan stabilitas dimensi. Ketahanan alaminya terhadap pembusukan dan jamur perusak kayu semakin meningkatkan daya tahannya. Kepadatan dan kekerasan kayu berkontribusi pada kemampuannya untuk menahan keausan (Chávez-Salgado dkk., 2022). Kayu jati mengandung selulosa yang tinggi sebesar 53.6%, hemiselulosa 16.1%, lignin 30.3% (Trisanti dkk., 2021). Kayu jati dengan rotasi panjang memiliki nilai rata-rata kekerasan Brinell 35,2 N/mm² dan Kayu jati dengan rotasi pendek memiliki nilai rata-rata kekerasan Brinell 27,9 N/mm² (Rizanti, 2017)



Gambar 2.3 Kayu Jati

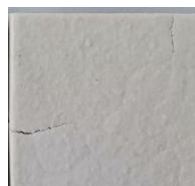
(Sumber : Anggiriani dkk., 2023))

2.4.1 Limbah Kayu Jati

Kayu jati (*Tectona grandis*) merupakan salah satu jenis kayu yang bernilai ekonomis tinggi dan paling banyak dimanfaatkan oleh masyarakat. Dengan demikian, potensi limbah yang dihasilkan juga sangat besar baik yang berasal dari limbah penebangan pohon (limbah eksploitasi) maupun dari limbah industri penggergajian. Limbah ini biasanya hanya dibuang saja atau dimusnahkan. Oleh karena itu, diperlukan suatu upaya untuk memanfaatkan limbah tersebut sehingga dapat mempunyai nilai tambah (Rais Salim, 2016).

2.4 Keramik Porselin

Porselen termasuk jenis keramik bakaran suhu tinggi yang dibuat dari bahan lempung murni yang tahan api, seperti kaolin, alumina dan silika. Pada umumnya, porselin dipijar sampai suhu 1350°C atau 1400°C, bahkan ada yang lebih tinggi lagi hingga mencapai 1500°C (Yustana, 2018). Kekuatan keramik porselen yang diukur dapat bervariasi secara signifikan, biasanya berkisar antara 200 hingga 800 MPa (Zhang & Lawn, 2022).



Gambar 2.4 Keramik Porselin

Sumber : (Öztürk dkk., 2022)

2.5 Pasir Besi

Pasir besi mengandung sejumlah besar Fe_3O_4 , dengan persentase komposisi 81,42% (Fatmaliana dkk., 2020). Pasir besi memiliki sifat feromagnetik, yang dapat mempengaruhi perilakunya di bawah tekanan mekanis dan kesesuaiannya untuk berbagai aplikasi industri (Yuwanda dkk., 2022).

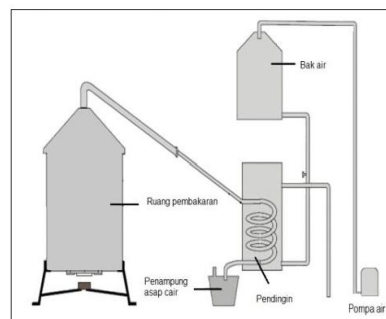


Gambar 2.5 Pasir Besi

Sumber : (Putra dkk., 2023)

2.6 Alat Pirolisis

Bahan baku yang terdiri dari serbuk gergaji dipanaskan dan terjadi ketika bahan baku awal dibakar di ruang tertutup dengan udara terbatas hingga menjadi arang (Suryaningsih & Reza Pahleva, 2020).



Gambar 2.6 Alat Pirolisis

(Sumber : (Embang dkk., 2023)

2.7 Kampas Rem

Secara sederhana, rem berfungsi untuk mengurangi atau menghentikan laju kendaraan. Rem bekerja dengan menekan kedua bantalan rem ke cakram atau drum yang berputar pada kendaraan, sehingga putarannya melambat dan kendaraan dapat mengurangi kecepatan atau berhenti (Juang Zebua dkk., 2022) .



Gambar 2.7 Kampas Rem

(Sumber : (Yudhanto dkk., 2019)

2.8 Uji Kekerasan *Brinell*

Pengujian melibatkan penggunaan indenter bola, biasanya berdiameter 10 mm, dan menerapkan beban yang dapat berkisar dari 62,5 hingga 3000 kg, tergantung pada bahan yang diuji (Udalov dkk., 2024).

Untuk mencari nilai kekerasan pada uji *brinell* adalah sebagai berikut :

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

HB = Nilai kekerasan Brinell (Brinell Hardness Number)

P = Beban uji (kgf atau N, sesuaikan)

D = Diameter bola indenter (mm)

d = Diameter rata-rata jejak (indentasi) (mm)

$\pi = 3,14159$

2.9 Keausan

Hilangnya material secara progresif atau pindahnya sejumlah material dari suatu permukaan sebagai hasil dari pergerakan relative antara permukaan tersebut

dengan permukaan lain. Salah satu uji keausan adalah pengujian laju keausan (Nurul Ihsan dkk., 2022).

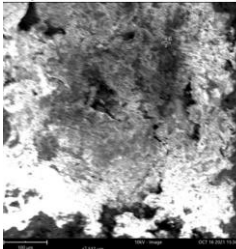
$$\text{Laju Keausan} : \frac{\Delta h}{\Delta t} \dots\dots\dots(2.5)$$

Δh = Kedalaman Keausan (μm)

Δt = Perubahan Waktu (s)

2.10 Uji SEM-EDX

SEM-EDX mengacu pada Scanning Electron Microscopy (SEM) dikombinasikan dengan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), teknik yang digunakan untuk menganalisis ultrastruktur dan komposisi unsur spesimen (Yacouba dkk., 2023).



Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
6	C	Carbon	71.89	62.65
8	O	Oxygen	25.76	29.91
35	Br	Bromine	0.64	3.69
14	Si	Silicon	1.03	2.10
12	Mg	Magnesium	0.60	1.07
47	Ag	Silver	0.07	0.58

Gambar 2.8 Hasil Uji SEM-EDX Kampas Rem

(Sumber : (Mgbemena dkk., 2022)

2.11 Penelitian Sebelumnya

Adapun landasan penelitian sebelumnya pada penelitian ini antara lain :

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Peneliti & Tahun	Bahan & Metode	Hasil & kekurangan
(Widjanarko, 2020)	Komposit serbuk arang kayu akasia + resin <i>epoxy</i> ; variasi fraksi volume 20%, 30%, 40%; metode <i>hand lay-up</i> ;	Hasil optimal dicapai dengan fraksi volume 20% partikel arang kayu akasia menghasilkan nilai keausan $2,98 \times 10^{-7}$ mm ² /kg. Keterbatasan termasuk kebutuhan bahan tambahan untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus dalam penelitian masa depan
(Fajar Dermawan, 2024)	Serat daun nanas hasil pirolisis + resin <i>epoxy</i> , diuji keausan metode Oghosi	Nilai keausan tertinggi untuk bantalan rem non-asbes adalah $4,27 \times 10$ gram/mm ² .s dengan komposisi 50% sekam padi. Nilai keausan terendah adalah $3,75 \times 10$ gram/mm ² .s dengan komposisi 40% sekam padi.
(Bhatt dkk., 2024)	Epoxy resin 15%, 20%,25%)+Coconut Shell Ash (CSA), Hot press, uji densitas, porositas, Brinell, pin-on-disc.	15% Epoxy: Kekerasan 85,3 BHN, keausan $3,1 \times 10^{-7}$ mm ² /kg, 20% Epoxy: Kekerasan 91,6 BHN, keausan $2,4 \times 10^{-7}$ mm ² /kg (terbaik).25% Epoxy: Kekerasan 88,2 BHN, keausan sedikit naik ($2,7 \times 10^{-7}$ mm ² /kg)., belum diuji suhu tinggi & uji lapangan.
(Kosjoko & Abadi, 2023)	Serbuk kayu jati dipirolisis suhu 250°C, 120 menit menjadi karbon/arang.Dicampur resin epoxy.Proses tekan 2500 kg, 7 menit.	Kekerasan tertinggi:50:50→78 HD Keausan terendah:50:50→ 0,03204 mm ³ /kg.m. Kelenturan tertinggi: 40:60 → 19,1 MPa. Suhu pirolisis hanya 250°C (masih rendah, lignin belum terurai penuh) Uji hanya mekanik sederhana
(Pramono & Suprihanto, 2023)	20%serbuk kayu jati+20%serbuk tempurung kelapa+ 20% serbuk kuning + 40% resin epoxy. pencampuran, press mold (10 MPa, 10 menit).	Keausan terendah: post curing 180°C = $0,7444 \times 10^{-5}$ mm ² /kg (paling mendekati kampas standar $0,6105 \times 10^{-5}$ mm ² /kg).Kekerasan tertinggi: post curing 130°C= 1350kgf/mm ² .Suhu 230°C→keausan meningkat & kekerasan menurun (material gosong). Kekerasan jauh lebih rendah dibanding kampas standar (4389 kgf/mm ²). Suhu post curing tinggi (230°C) justru merusak material.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pembuatan kampas rem menggunakan metode press dan pengujian kekerasannya menggunakan *Brinell* untuk pengujian keausannya menggunakan tribometer . Eksperimental pembuatan kampas rem ini dibuat dengan tiga variasi temperatur yaitu 350°C, 450 °C , 550 °C.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menganalisis pengaruh dari perlakuan variasi temperatur pada proses pirolisis serbuk kayu jati terhadap kandungan karbon dan karakteristik mekanik kampas rem komposit yang dihasilkan. Fokus utama dari penelitian ini adalah untuk menginvestigasi kandungan karbon, sifat kekerasan, ketahanan aus dan hasil mikro dari material kampas rem tersebut.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat pada penelitian ini antara lain sebagai berikut :

3.2.1 Lokasi Penelitian

Proses pirolisis di Laboratorium Teknik Universitas Muhammadiyah Jember, dan pengujian akan dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini direncanakan akan dilaksanakan mulai dari bulan Oktober 2025 hingga Desember 2025.

3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan pada penelitian ini antara lain sebagai berikut :

3.3.1 Alat

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Gerinda
- b. Alat Pirolisis

Kapasitas ruang bakar 2–5 liter; rentang suhu maksimal 600 °C; kontrol digital; sistem vakum dari oksigen

c. Press Cetakan

Kapasitas beban ≥ 10 ton, sistem kontrol manual/digital

d. Alat Uji Kekerasan *Brinell* XHB-3000

Indenter bola baja 10 mm, beban pengujian 62.5-3000 kg, pembacaan jejak dengan mikroskop digital.

e. Cetakan *Mounting*

Terbuat dari kaca dengan dimensi ($\text{Ø}60\text{mm} \times 6\text{mm}$).

f. Alat uji keausan Tribometer

Rentang beban 2N-200N, rentang putaran 50 rpm , menghasilkan output koefisien gesek dan laju keausan.

g. Alat uji SEM-EDX Hitachu SU-3800

Tegangan 30 kV; resolusi 3.0 nm-4.0 nm, pelapisan emas/paladium untuk spesimen non-konduktif.

h. Oven

3.3.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Limbah Kayu Jati Jember Selatan

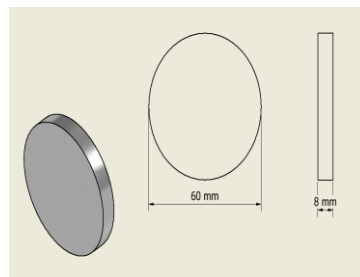
b. Serbuk Keramik porselin

c. Resin *Epoxy* dan *Hardener* (sebagai bahan pengikat/matriks)

d. Katalis

e. Serbuk besi

f. Amplas



Gambar 3.1 Dimensi ASTM G99 untuk Pengujian Keausan dan ASTM E10 untuk Kekerasan

3.4 Variabel Penelitian

Adapun variabel penelitian ini antara lain sebagai berikut :

3.4.1 Variabel Penelitian

a. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah perlakuan yang ditetapkan oleh peneliti untuk diamati pengaruhnya terhadap variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

- 1) Temperatur 1: 350°C
- 2) Temperatur 2: 450°C
- 3) Temperatur 3: 550°C

b. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang diukur sebagai hasil dari perlakuan pada variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah:

- 1) Ketahanan Aus: kemampuan suatu material untuk menahan kerusakan atau kehilangan material akibat gesekan atau kontak dengan benda lain.
- 2) Nilai Kekerasan: Nilai yang dihasilkan saat kampas rem di uji kekerasan.
- 3) Hasil SEM-EDX : Komposisi unsur kimia.
- 4) Hasil pengujian temperatur : Pengaruh pengujian temperatur tiap spesimen terhadap sifat mekaniknya.

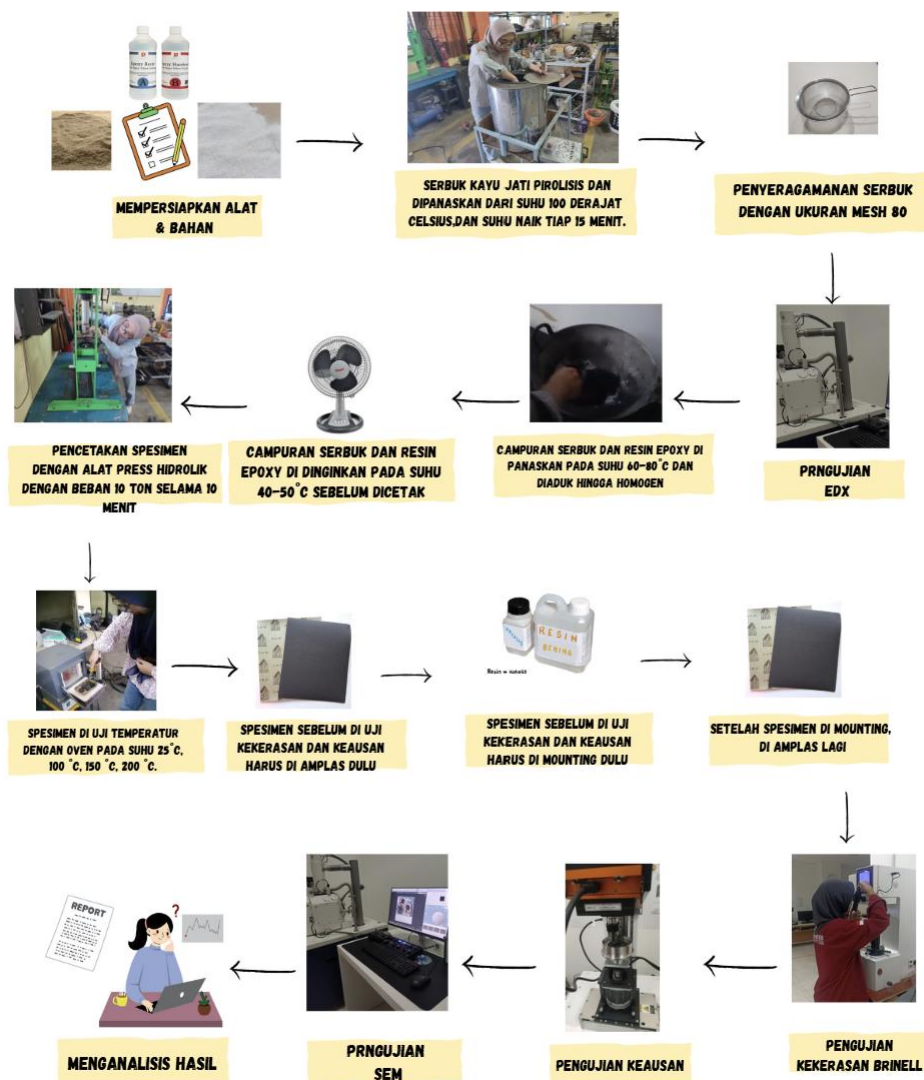
c. Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah parameter yang dijaga konstan selama penelitian untuk memastikan bahwa perubahan pada variabel terikat hanya disebabkan oleh variabel bebas. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah:

- 1) Komposisi/Fraksi Massa: Persentase massa dari serbuk arang kayu jati (30%), serbuk keramik (43%), serbuk besi (10%) dan matriks epoksi (17%).
- 2) Ukuran Partikel (*Mesh*): Ukuran serbuk arang dan serbuk keramik diseragamkan setelah diayak.
- 3) Proses pirolisis : Laju kenaikan suhu dan pengholdingan pada suhu akhir dibuat sama.

- 4) Prosedur Pencampuran: Waktu dan kecepatan pengadukan dibuat sama.
- 5) Kondisi Curing Epoxy : Suhu dan waktu pengeringan resin dijaga konstan.
- 6) Waktu pengepresan dijaga konstan selama 10 menit untuk seluruh sampel.
- 7) Parameter Pengujian: Beban, kecepatan, waktu dan jarak pada uji keausan serta metode uji kekerasan disamakan untuk semua sampel.

3.5 Prosedur Penelitian



Gambar 3. 2 Skema Prosedur Penelitian

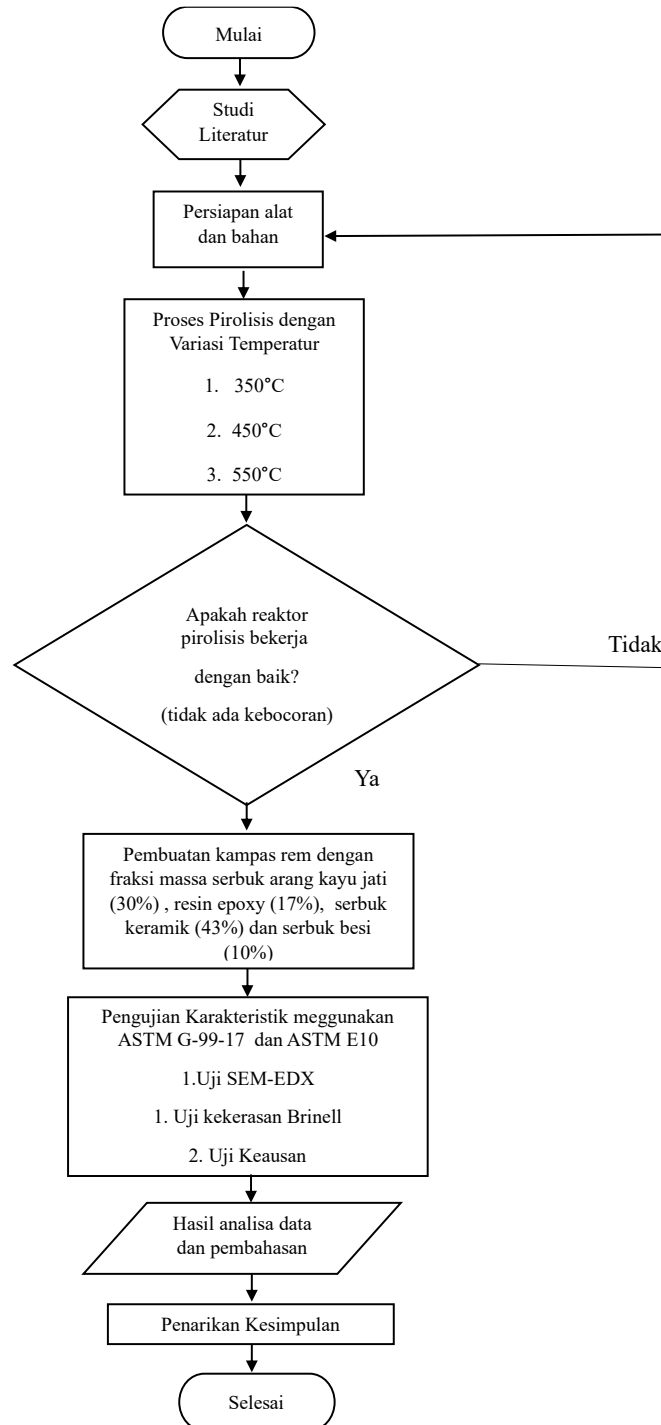
Langkah-langkah yang akan dilakukan selama pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur: Mengkaji penelitian terdahulu mengenai pirolisis biomassa, pembuatan komposit kanvas rem, dan metode pengujian terkait.
2. Persiapan Bahan Baku : Limbah serbuk kayu jati. Pasir besi, resin epoxy, keramik porselin.
3. Proses Pirolisis:
 - a) Membagi serbuk kayu jati menjadi 3 batch.
 - b) Melakukan proses pirolisis pada setiap *batch* menggunakan reaktor pada temperatur yang berbeda sesuai variabel bebas (350°C,450°C,550°C) dalam lingkungan minim oksigen untuk menghasilkan arang.
 - c) Mendinginkan dan menghaluskan arang hasil pirolisis dari setiap variasi.
4. Penyeragaman Ukuran Partikel: Mengayak serbuk arang dari setiap variasi temperatur, pasir besi, dan serbuk keramik porselin untuk mendapatkan ukuran partikel (*mesh*) yang seragam dan sesuai batasan masalah.
5. Pengujian EDX
 - a) Persiapkan permukaan sampel agar bersih.
 - b) Lapisi konduktif dengan emas/paladium atau karbon.
 - c) Amati dengan EDX dan simpan hasil gambar.
6. Pembuatan Komposit:
 - a) Menyiapkan tiga kelompok campuran, di mana setiap kelompok menggunakan serbuk arang dari temperatur pirolisis yang berbeda.
 - b) Mencampurkan serbuk arang, serbuk keramik porselin, serbuk besi, dan resin epoksi dengan komposisi yang sama (variabel kontrol) dengan dipanaskan dengan diaduk hingga suhu 60-80°C selama 4 menit untuk setiap kelompok hingga homogen.
 - c) Lalu didinginkan hingga suhu 40-50 °C selama 4 menit.
 - d) Menuangkan campuran komposit ke dalam cetakan yang telah disiapkan.
 - e) Membiarkan spesimen mengeras (proses curing) pada suhu 40-50 selama waktu yang ditentukan hingga matriks epoksi terpolimerisasi sempurna.

- f) Komposit di press pada alat press hidrolik dengan beban 10 ton selama 10 menit.
 - g) Komposit didinginkan hingga suhu ruang.
7. Pengujian Ketahanan Temperatur Menggunakan Oven
- a) Siapkan komposit yang sudah jadi
 - b) Masukkan komposit pada oven di suhu 100 °C, 150 °C, 200 °C dan diholding selama 30 menit.
 - c) Amati perubahan komposit di tiap suhu.
8. Pengujian Kekerasan tipe Brinnel Hardness Tester. (ASTM E10) & Uji Tribometer (ASTM G99)
- a) Mounting
 - 1) Persiapkan cetakan dengan dimensi ($\text{\O}60\text{mm} \times 8\text{mm}$).
 - 2) Campurkan resin dan katalis dengan perbandingan (99:1).
 - 3) Letakkan spesimen ke dasar cetakan dengan posisi permukaan halus menghadap bawah.
 - 4) Tuangkan resin katalis sampai memenuhi cetakan dan tutup dengan kaca.
 - 5) Tunggu sampai resin kering
 - 6) Beri tanda pada tiap tiap variasi spesimen
 - b) Pengamplasan
 - 1) Haluskan dan ratakan permukaan mounting hingga rata dan sesuai dengan dimensi uji tribometer ($\text{\O}60\text{mm} \times 6\text{mm}$) dengan amplas grid 800, 1000, 1200, 1500 dan 2000.
 - 2) Pastikan di salah satu permukaan, material tidak tertutup resin,
 - 3) Poles permukaan dan material dengan menggunakan autosol dan kain bludru.
 - c) Pengujian Kekerasan tipe Brinnel Hardness Tester. (ASTM E10)
 - 1) Gunakan bola baja/tungsten carbide, diameter 2.5–10 mm.
 - 2) Untuk ketebalan 6 mm, rekomendasi aman: bola 2.5mm dengan beban 187.5 KgF, tergantung kekerasan material, supaya kedalaman <0.75 mm.

- 3) Tempatkan spesimen di dudukan mesin.
 - 4) Turunkan indenter hingga menyentuh permukaan, beban minor diterapkan otomatis.
 - 5) Mesin akan otomatis menambah beban utama setelah beban minor stabil.
 - 6) Beban ditahan sesuai waktu yang diatur, lalu dilepas otomatis.
 - 7) Gunakan mikroskop optik bawaan untuk mengukur diameter jejak indentasi dalam dua arah: horizontal (d1) dan vertikal (d2).
 - 8) Nilai HBW dihitung otomatis oleh perangkat sesuai persamaan ASTM E10
 - 9) Lakukan minimal 3 kali pengukuran di titik berbeda dengan jarak $\geq 3 \times$ diameter jejak dari tepi atau indentasi lain.
 - 10) Hitung rata-rata HBW sebagai nilai kekerasan spesimen.
- d) Pengujian Tribometer (ASTM G99)
- 1) Letakkan spesimen kedalam wadah uji tribometer, dan setting ketinggian indenter pin on disk.
 - 2) Uji tiap spesimen hingga keluar nilai koefisien geseknya
 - 3) Catat dan dokumentasikan hasil pengujian masing masing spesimen.
9. Pengujian SEM
- a) Persiapkan permukaan sampel agar bersih.
 - b) Lapsi konduktif dengan emas/paladium atau karbon.
 - c) Amati dengan SEM dengan beberapa perbesaran dan simpan hasil gambar.
10. Analisis Data: Menganalisis data hasil pengujian secara kuantitatif dan kualitatif, kemudian membuat grafik hubungan antara temperatur pirolisis terhadap nilai kandungan karbon, kekerasan dan ketahanan aus.
11. Penarikan Kesimpulan: Menyimpulkan pengaruh temperatur pirolisis terhadap sifat mekanik kampas rem dan menentukan temperatur optimal.

3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3 Diagram Alir

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pembuatan arang kayu jati melalui proses pirolisis pada variasi temperatur tertentu. Arang yang dihasilkan kemudian dihaluskan dan dicampur dengan pasir besi, serbuk keramik, dan resin epoxy untuk membentuk komposit kampas rem. Campuran dicetak dan dilakukan proses curing hingga diperoleh spesimen uji. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kekerasan untuk mengetahui sifat mekanik material, uji keausan dan tribologi untuk mengevaluasi gaya gesek, koefisien gesek, serta laju keausan, serta pengujian mikrostruktur menggunakan SEM untuk mengamati morfologi permukaan. Selain itu, analisis EDX dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi unsur serbuk arang kayu jati. Seluruh hasil pengujian digunakan sebagai dasar analisis pengaruh temperatur pirolisis terhadap karakteristik dan performa kampas rem.



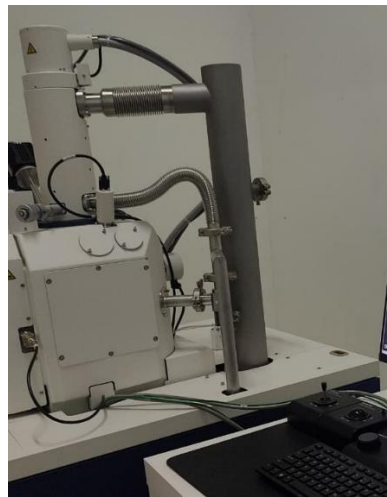
Gambar 4.1 Serbuk Kayu Jati di Pirolisis

Serbuk kayu jati di pirolisis pada suhu 350°C, 450°C, 550°C diholding selama 90 menit supaya proses karbonisasi berhasil.



Gambar 4.2 Hasil Pirolisis Serbuk Kayu Jati

Gambar diatas adalah hasil pirolisis serbuk kayu jati



Gambar 4.3 Pengujian SEM EDX Pada Serbuk Arang Kayu Jati

Serbuk arang kayu jati di uji sem edx untuk mengetahui kandungan karbonnya.



Gambar 4.4 Pengukuran Fraksi Massa untuk Komposit



Gambar 4.5 Pembuatan Komposit

Pencampuran komposisi serbuk arang kayu jati, pasir besi, keramik, dan resin epoxy dengan dipanaskan di kompor dan diaduk hingga homogen.



Gambar 4.6 Pencetakan Spesimen

Proses Pencetakan Spesimen Komposit dengan Alat Presshidrolik menggunakan beban 10 ton dan diholding selama 10 menit.

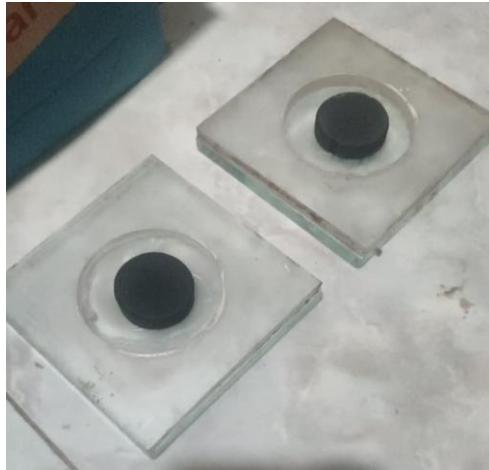


Gambar 4.7 Hasil Spesimen



Gambar 4.8 Spesimen di uji Temperatur

Spesimen di oven di suhu 100°C, 150°C, 200°C selama 30 menit



Gambar 4.9 Spesimen di Mounting

Spesimen yang sudah jadi di mounting untuk dilakukan pengujian kekerasan dan keausan.



Gambar 4.10 Kampas Rem diampelas

Spesimen yang sudah dimounting selanjutnya diampelas sebelum dilakukan pengujian kekerasan dan keausan



Gambar 4.11 Kampas Rem di uji Kekerasan

Kampas rem di uji kekerasan *brinell* dengan beban 62,5 Kgf



Gambar 4.12 Kampas Rem di uji Keausan

Kampas rem di uji keausan dengan alat tribometer yang menghasilkan data gaya gesek, koefisien gesek, kedalaman.



Gambar 4.13 Spesimen di uji SEM

Spesimen kampas rem komposit diuji SEM untuk mendapat hasil morfologinya.

4.2 Hasil Pengujian Temperatur

Perubahan dimensi setelah dilakukan pengujian temperatur

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Temperatur

Temperatur Pirolisis	Pengujian Temperatur 100°C	Pengujian Temperatur 150°C	Pengujian Temperatur 200°C
350°C	1 mm	1 mm	1 mm
450°C	1 mm	1 mm	1 mm
550°C	1 mm	1 mm	1 mm

Hasil yang didapatkan adalah tidak ada perubahan fisik secara signifikan, hanya ada perubahan diameter 1 mm tetapi berpengaruh pada sifat mekanik kanvas rem tersebut. Pemanasan pada suhu sekitar 200°C dapat menyebabkan epoxy mengalami curing lanjutan (post-curing), sehingga ikatan silang (*cross-linking*) dalam matriks meningkat. Peningkatan cross-linking ini membuat struktur komposit menjadi lebih padat, kuat, dan stabil sehingga kekerasan dan ketahanan aus dapat meningkat meskipun tidak terjadi perubahan fisik secara visual (Parente dkk., 2024).

4.3 Hasil Pengujian Kekerasan Brinell (HBW)

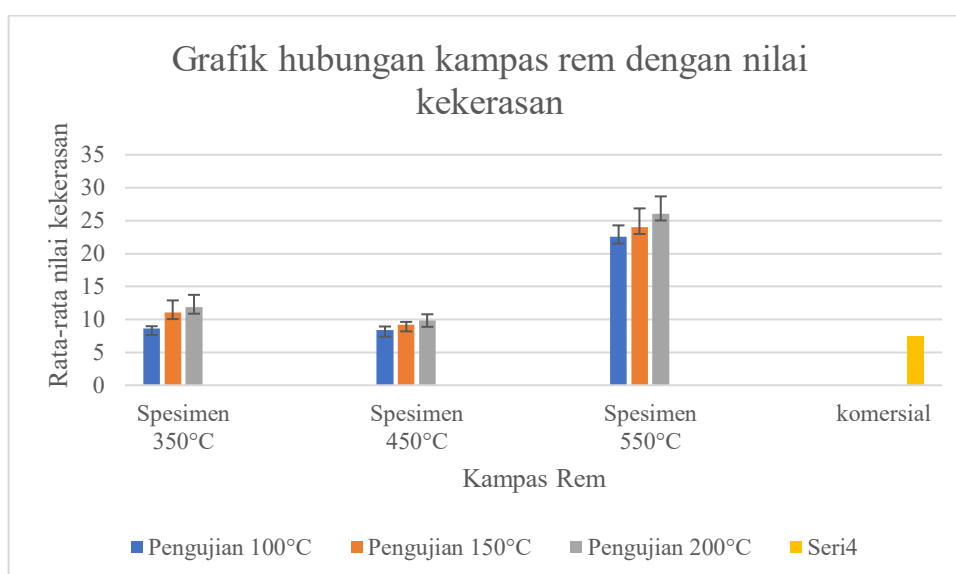
Berikut adalah hasil dari pengujian kekerasan pada kanvas rem komposit dan komersial :

4.3.1 Hasil Data Uji Kekerasan *Brinell*

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur pirolisis terhadap sifat mekanik kanvas rem berbasis serbuk arang kayu jati dengan penguat keramik. Pengujian dilakukan pada tiga spesimen untuk setiap variasi temperatur (350°C, 450°C, dan 550°C) serta satu sampel pembanding berupa kanvas rem komersial. Data hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.2 Hasil Uji Kekerasan

Temperatur Pirolisis	Pengujian Temperatur 100°C	Pengujian Temperatur 150°C	Pengujian Temperatur 200°C
350°C	8.48	10.66	10.92
	8.37	13.05	14.02
	9.02	9.43	10.66
Rata-rata	8.62	11.04	11.86
450°C	8.76	9.63	10.9
	7.73	8.76	9.2
	8.61	9.16	9.51
Rata-rata	8.36	9.18	9.87
550°C	24.55	27.21	29.08
	21.57	21.68	24.73
	21.43	23.02	24.25
Rata-rata	22.51	23.97	26.02
Komersial	7,04	7,29	8



Gambar 4.14 Grafik Hubungan Hasil Kekerasan dengan Kampas rem Komposit dan Komersial

Dari grafik hubungan hasil kekerasan dengan temperatur menunjukkan nilai kekerasan tertinggi pada spesimen temperatur pirolisis 550°C dan pada spesimen 2 memiliki simpangan baku tertinggi dan nilai kekerasan terendah adalah komersial. Hal ini mengindikasikan bahwa temperatur pirolisis memengaruhi karakteristik nilai kekerasan. Dari jurnal (Aboughaly dkk., 2023) biochar yang lebih tinggi dapat meningkatkan kekerasan matriks polimer, dengan biochar yang diproduksi pada suhu operasi yang lebih tinggi umumnya menghasilkan luas permukaan yang lebih besar serta meningkatkan kekuatan mekanik dan kekerasan komposit polimer.

4.4 Hasil Pengujian Keausan (Pin-on-Disc)

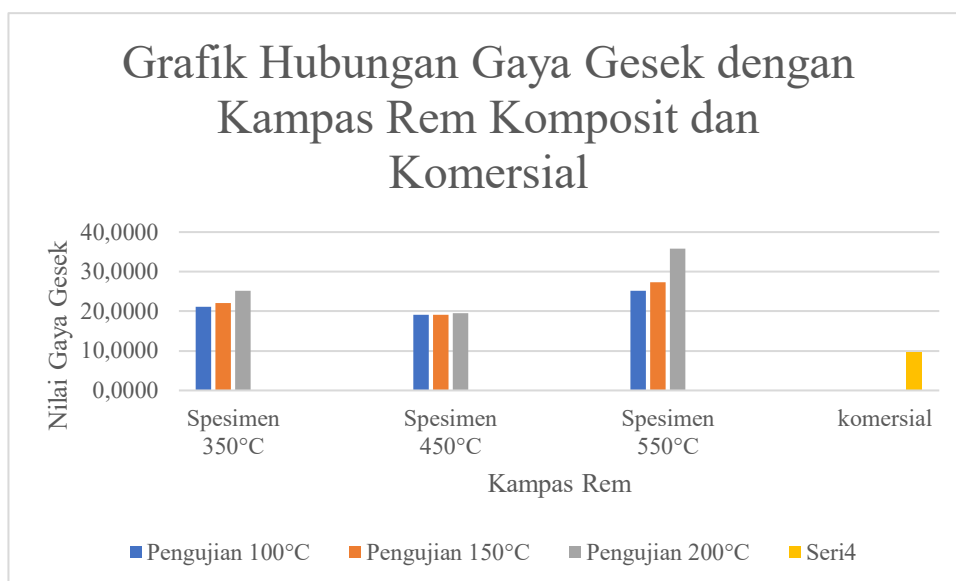
Berikut adalah hasil pengujian keausan pada kampas rem komposit dan komersial :

4.4.1 Data Gaya Gesek

Uji keausan dilakukan menggunakan mesin Pin-on-Disc dengan tujuan mengetahui pengaruh variasi temperatur pirolisis terhadap gaya gesek, koefisien gesek, dan laju keausan kampas rem komposit berbasis serbuk arang kayu jati.

Tabel 4.3 Data Hasil Gaya Gesek Kampas Rem

Kampas Rem	Pengujian Temperatur 100°C	Pengujian Temperatur 150°C	Pengujian Temperatur 200°C
350°C	21,09	22,13	25,19
450°C	19,09	19,14	19,49
550°C	25,18	27,33	35,76
Komersial		9,6	



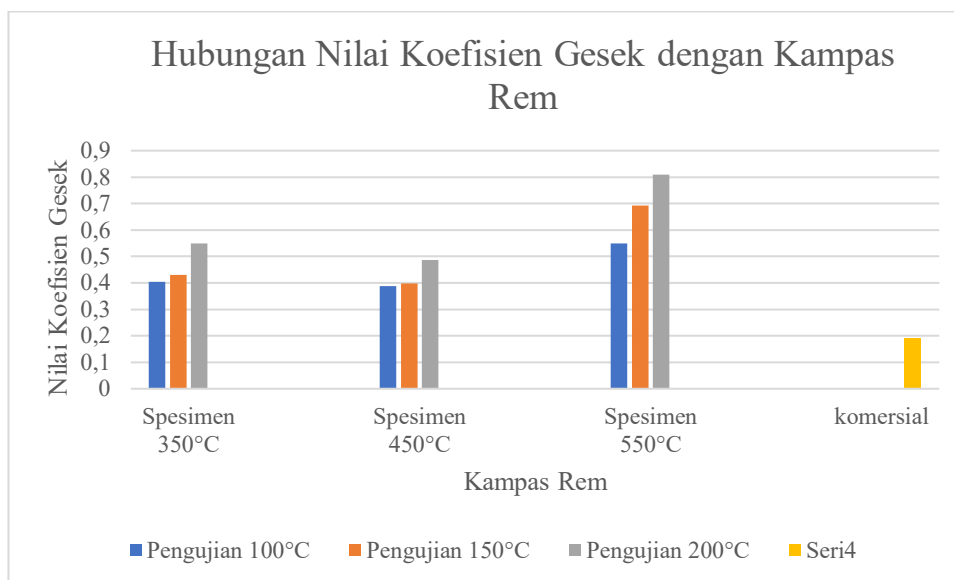
Gambar 4.15 Grafik Hubungan Gaya Gesek dengan Kampas Rem Komposit dan Komersial

Grafik menunjukkan bahwa gaya gesek tertinggi terjadi pada temperatur pirolisis 550°C, kemudian 350°C, 450°C dan terendah pada kampas rem komersial. Hal ini mengindikasikan bahwa temperatur pirolisis memengaruhi karakteristik permukaan dan interaksi kontak kampas rem terhadap piringan uji.

4.4.2 Data Koefisien Gesek

Tabel 4.4 Data Hasil Koefisien Gesek Kampas Rem

Kampas Rem	Pengujian Temperatur 100°C	Pengujian Temperatur 150°C	Pengujian Temperatur 200°C
350°C	0.404	0.431	0.549
450°C	0,38	0,39	0,49
550°C	0.549	0,69	0,81
Komersial		0,19	



Gambar 4.16 Grafik Hubungan Nilai Koefisien Gesek dengan Kampas Rem Komposit dan Komersial

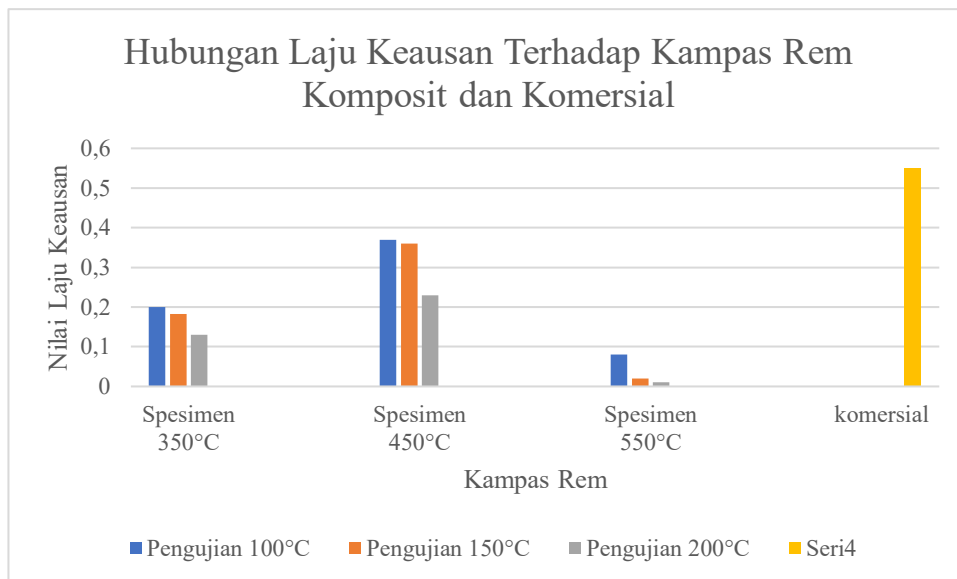
Grafik menunjukkan bahwa nilai koefisien gesek tertinggi terjadi pada temperatur pirolisis 550°C, kemudian 350°C, 450°C dan terendah pada kampas rem komersial. Hal ini mengindikasikan bahwa temperatur pirolisis memengaruhi karakteristik permukaan dan interaksi kontak kampas rem terhadap piringan uji.

4.4.3 Data Hasil Laju Keausan Relatif

Berikut hasil laju keausan kampas rem sebagai berikut :

Tabel 4.5 Data Laju Keausan Kampas Rem

Kampas Rem	Pengujian Temperatur 100°C	Pengujian Temperatur 150°C	Pengujian Temperatur 200°C
350°C	0.2	0.183	0.13
450°C	0,37	0,36	0,23
550°C	0.08	0,02	0,01
Komersial	0,55		



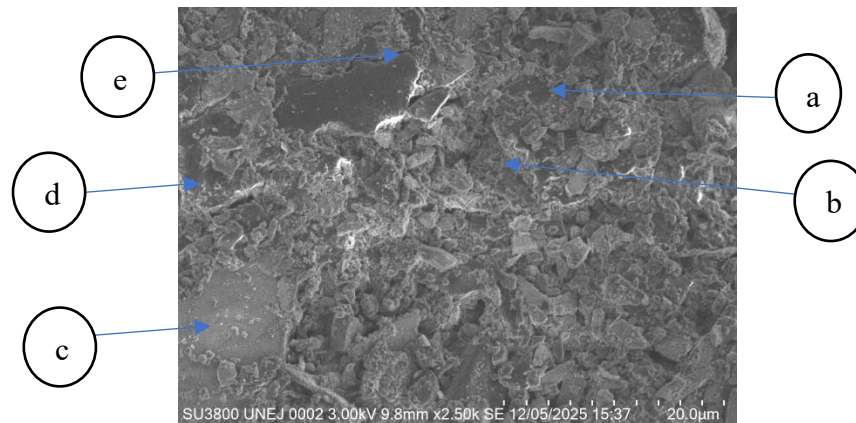
Gambar 4.17 Grafik Hubungan Laju Keausan Terhadap Kampas Rem Komposit dan Komersial

Grafik menunjukkan bahwa laju keausan kampas rem komposit dipengaruhi oleh variasi suhu perlakuan. Kampas rem komersial memiliki laju keausan tertinggi, yaitu sekitar $0,55 \mu\text{m/s}$, yang mengindikasikan ketahanan aus paling rendah. Sebaliknya, kampas rem komposit pada suhu 550°C menunjukkan laju keausan terendah, sekitar $0,03 \mu\text{m/s}$, sehingga memiliki ketahanan aus terbaik. Kampas rem komposit pada suhu 350°C memiliki laju keausan sedang, sedangkan kampas rem komposit pada suhu 450°C menunjukkan laju keausan lebih tinggi dibandingkan komposit suhu 350°C namun masih lebih rendah dibandingkan komposit komersial.

4.5 Hasil Analisis Mikrostruktur (SEM)

Berikut adalah hasil SEM pada kampas rem komposit :

4.4.1 Mikrostruktur pada Suhu 350°C



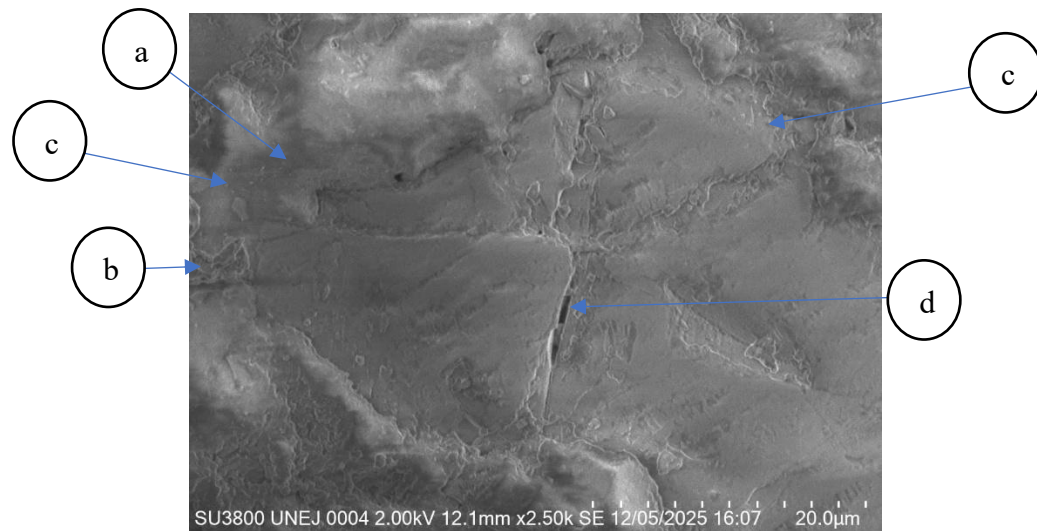
Gambar 4.18 Hasil SEM Kampas Rem Suhu Pirolisis 350°C

Keterangan Gambar

- a : Matriks epoxy
- b : Partikel arang kayu jati
- c : Partikel filler keramik
- d : Partikel filler pasir besi
- e : Retakan mikro

Pada temperatur pirolisis 350°C permukaan kampas rem terlihat banyak fragmen tak beraturan, bentuknya lebih rapuh dan berserabut yang menunjukkan bahwa lignin dan selulosa belum terdekomposisi sempurna sehingga karbonisasi belum optimal, pori-pori masih kecil dan tidak merata yang mengindikasikan bahwa volatil organik belum sepenuhnya hilang sehingga struktur masih padat dan tidak berpori besar (Tu dkk., 2022).

4.4.2 Mikrostruktur pada Suhu 450°C



Gambar 4.19 Hasil SEM Kampas Rem Suhu Pirolisis 450°C

Keterangan Gambar :

a : Matriks epoxy

b : Serbuk arang kayu jati

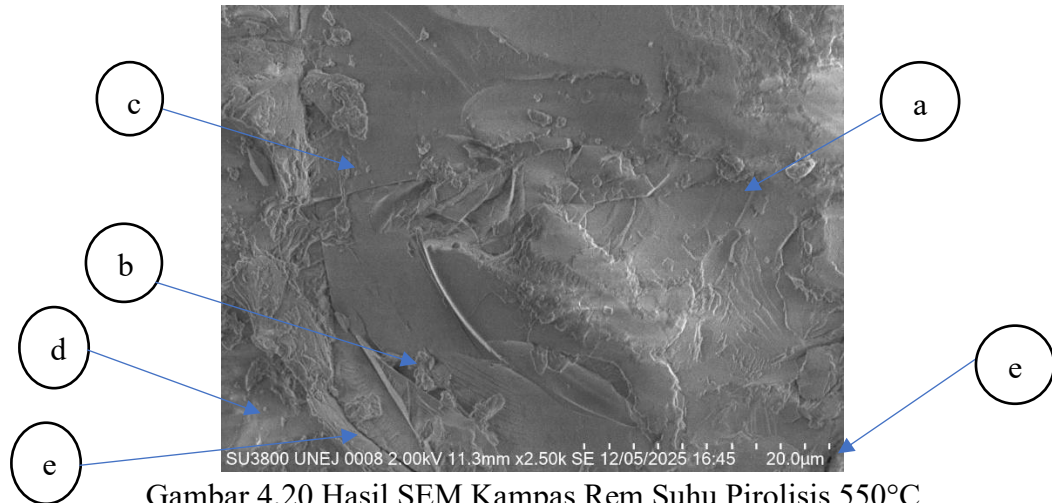
c : Partikel pasir besi

d : Partikel Keramik

e : Porositas

Pada sampel yang dipirolisis pada 450°C, peningkatan kepadatan pori dan peningkatan keteraturan struktural pada suhu pirolisis yang lebih tinggi dibandingkan dengan 350°C (S. Liu dkk., 2022).

4.4.3 Mikrostruktur pada Suhu 550°C



Gambar 4.20 Hasil SEM Kampas Rem Suhu Pirolisis 550°C

Keterangan Gambar :

- a : Matriks Epoxy
- b : Serbuk Arang Kayu Jati
- c : Serbuk Pasir Besi
- d : Serbuk Keramik
- e : Retakan
- f : Porositas

Pada suhu pirolisis 550°C, gambar SEM menunjukkan peningkatan kepadatan pori dan peningkatan keteraturan struktural pada suhu pirolisis yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lebih rendah (S. Liu dkk., 2022) dan terlihat porositas karena porositas biochar umumnya meningkat dengan peningkatan suhu pirolisis (Sathyabama & Firdous, 2025).

4.6 Hasil Analisis Komposisi Unsur (SEM-EDX)

Berikut adalah hasil SEM EDX pada serbuk arang kayu jati :

4.6.1 EDX Suhu 350°C

Tabel 4. 6 Hasil SEM-EDX Suhu pirolisis 350°C

Element	At. No.	Netto	Mass (%)	Mass Norm. (%)	Atom (%)	Abs. error (%) (1sigma)	Rel. error (%) (1sigma)
C	6	139868	73,03	78,03	3,46	4,73	4,73
O	8	26093	26,97	26,97	1,46	5,30	5,30
		Sum	100,00	100,00			

Hasil EDX menunjukkan dominasi unsur C (73%), sesuai dengan karakter arang jati yang masih mengandung struktur organik sisa karbonisasi (lignin & selulosa) tingginya kandungan O (27%) menandakan proses karbonisasi belum matang sehingga kandungan volatil dan oksigen masih tinggi (Elnour dkk., 2019).

4.6.2 EDX Suhu 450°C

Tabel 4.7 Hasil SEM-EDX Suhu pirolisis 450°C

Element	At. No.	Netto	Mass (%)	Mass Norm. (%)	Atom (%)	Abs. error (%) (1sigma)	Rel. error (%) (1sigma)
N	7	68216	58,36	58,36	54,59	2,99	5,12
C	6	165734	41,64	41,64	45,41	1,74	4,19
		Sum	100,00	100,00	100,00		

Hasil dari SEM-EDX pada arang kayu jati suhu pirolisis 450°C menunjukkan kandungan nitrogen yang tinggi (58.36 %) nitrogen biomassa relatif stabil dalam arang pada suhu yang lebih rendah, tetapi ketika suhu naik, terutama dalam kisaran 400-500° C, ia mengalami devolatilisasi dan membentuk senyawa tar-N perantara

(Anca-Couce dkk., 2018). Nilai karbon (41.64%) mengindikasikan awal terjadinya penyusunan kembali struktur aromatik karbon.

4.6.3 EDX Suhu 550°C

Tabel 4.8 Hasil SEM-EDX Suhu pirolisis 550°C

Element	At. No.	Netto	Mass (%)	Mass Norm. (%)	Atom (%)	Abs. error (%) (1sigma)	Rel. error (%) (1sigma)
C	6	104168	75,77	75,77	81,80	3,69	4,87
O	8	15761	20,63	20,63	16,72	1,10	5,35
Si	14	22065	1,73	1,73	0,80	0,07	3,89
P	15	7016	0,69	0,69	0,29	0,03	4,09
Ca	20	4049	0,64	0,64	0,21	0,02	3,84
K	19	4007	0,53	0,53	0,18	0,02	3,87
		Sum	100,00	100,00	100,00		

Hasil dari SEM-EDX pada arang kayu jati suhu pirolisis 550°C menunjukkan kandungan karbon sangat tinggi (75,77%) yang menandakan karbonisasi terproses mendekati sempurna, kandungan O berkurang (20.63%), menandakan volatil terdekomposisi. muncul unsur Si, P, Ca, K (<2%) karena unsur mineral seperti silikon (Si), kalsium (Ca), dan kalium (K) tetap ada dalam biochar sebagai residu anorganik, bahkan pada suhu pirolisis yang bervariasi. Kehadiran mereka konsisten di seluruh sampel biochar yang berbeda, menunjukkan stabilitasnya selama proses pirolisis (Elnour dkk., 2019)

4.7 Pembahasan

Berikut adalah pembahasan dari hasil pengujian yang telah dilakukan pada kampas rem :

4.7.1 Pembahasan Hasil Uji Temperatur

Pada pengujian temperatur rendah (100°C, 150°C, dan 200°C), spesimen kampas rem tidak menunjukkan perubahan fisik yang signifikan seperti retak, deformasi, maupun perubahan warna. Hal ini menunjukkan bahwa material masih berada dalam batas stabil secara visual dan struktural. Namun demikian, jika dikaitkan dengan sifat mekanik, peningkatan temperatur uji tetap memberikan pengaruh terhadap performa material. Seiring kenaikan temperatur, resin epoxy dan matriks komposit mengalami pepadatan dan peningkatan ikatan antar partikel, sehingga berkontribusi pada meningkatnya nilai kekerasan sesuai dengan penelitian oleh (Parente dkk., 2024) dan ketahanan aus. Dengan demikian, meskipun perubahan fisik tidak tampak secara makroskopis, peningkatan temperatur uji tetap berperan dalam memperbaiki sifat mekanik kampas rem.

4.7.2 Pembahasan Hasil Uji Kekerasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekerasan kampas rem meningkat seiring kenaikan temperatur pirolisis, dengan nilai tertinggi diperoleh pada suhu 550 °C. Pada suhu ini, proses karbonisasi berlangsung paling optimal sehingga terbentuk struktur karbon yang lebih keras dan padat, meskipun berpotensi menjadi lebih rapuh. Pada suhu 350 °C, karbonisasi belum sempurna karena masih terdapat lignin, hemiselulosa, dan selulosa, sehingga arang yang terbentuk relatif lunak dan menghasilkan kekerasan lebih rendah. Sementara itu, pada suhu 450 °C lignin terbakar dan sebagian besar senyawa volatil telah terurai dan pada suhu 450°C terjadi pelepasan volatil yang intens sehingga struktur karbon belum sepenuhnya matang (Feng dkk., 2012). Pada penelitian oleh (Abreu Neto dkk., 2018) menghasilkan kekerasan 3,05 MPa untuk arang yang diproduksi pada suhu 450 °C, 3,44 MPa untuk arang yang diproduksi pada suhu 600 °C, dan 4,59 MPa untuk arang yang diproduksi pada suhu 750 °C. Secara keseluruhan, komposit berbasis arang kayu jati pada suhu pirolisis tinggi menunjukkan potensi sebagai material kampas rem alternatif dengan karakteristik kekerasan yang unggul. Peningkatan

suhu pirolisis menyebabkan devolatilisasi dan karbonisasi biomassa. Pada suhu 200–350 °C, hemiselulosa dan selulosa terurai sehingga gugus volatil terlepas dan struktur organik mulai berubah menjadi karbon, menyebabkan kekerasan meningkat bertahap. Pada suhu 350–500 °C, ikatan C–H dan C–O digantikan oleh ikatan C=C aromatik, rasio H/C dan O/C menurun, dan struktur karbon menjadi lebih kaku serta rapat sehingga kekerasan meningkat signifikan. Selanjutnya pada suhu 500–700 °C, terjadi reorganisasi atom karbon membentuk domain semi-grafitik disertai penebalan dinding pori dan densifikasi mikro, yang semakin meningkatkan resistansi terhadap penetrasi dan kekerasan arang.

4.7.3 Pembahasan Hasil Koefisien Gesek

Hasil koefisien gesek terlihat meningkat seiring dengan meningkatnya nilai kekerasan material tersebut, pada penelitian (He dkk., 2025) juga menghasilkan koefisien gesek yang berbanding lurus dengan nilai kekerasan material tersebut.

4.7.4 Pembahasan Hubungan Gaya Gesek – Koefisien Gesek – Ketahanan Aus

Pengujian kekerasan, gaya gesek, dan koefisien gesek dilakukan untuk memahami karakteristik tribologi kampas rem berbasis serbuk arang kayu jati yang dipirolisis pada variasi temperatur 350°C, 450°C, dan 550°C. Ketiga parameter tersebut saling berkaitan dan secara langsung mempengaruhi ketahanan aus material kampas rem.

a. Pengaruh Kekerasan terhadap Ketahanan Aus

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kekerasan memiliki hubungan erat dengan ketahanan aus kampas rem. menurut (Irawan dkk., 2023) secara umum, ketahanan terhadap keausan meningkat seiring dengan meningkatnya kekerasan. Penelitian oleh Liao dkk. menunjukkan bahwa peningkatan kekerasan material menghasilkan penurunan laju keausan. Material yang memiliki sifat keras akan lebih sulit terkikis, sehingga spesimen uji memiliki ketahanan aus yang baik. Hal ini dikarenakan nilai keausan spesifik yang diperoleh dalam uji keausan Ogoshi berbanding terbalik dengan sifat ketahanan ausnya. Semakin rendah nilai keausan spesifik, semakin baik sifat ketahanan aus suatu material. Penelitian yang dilakukan oleh Fitriyana dkk

menunjukkan hasil yang sama. Pengujian menggunakan metode pin on disc menunjukkan bahwa peningkatan kekerasan lapisan pelapis menghasilkan penurunan laju keausan pada material.

b. Hubungan Gaya Gesek dengan Ketahanan Aus

Gaya gesek yang dihasilkan selama pengujian tribometer meningkat seiring dengan kenaikan temperatur pirolisis. Spesimen 550°C menunjukkan gaya gesek tertinggi dibandingkan 350°C dan 450°C. Gaya gesek yang lebih besar mengindikasikan interaksi kontak yang lebih kuat antara permukaan kampas dan piringan, permukaan yang lebih kasar dan lebih keras, kemampuan material menahan pergerakan relatif yang lebih tinggi. Namun, gaya gesek yang tinggi tidak selalu berbanding lurus dengan keausan yang tinggi. Pada material yang memiliki struktur mikro padat dan ikatan antarpartikel kuat, gaya gesek tinggi justru dapat dicapai tanpa kehilangan material yang signifikan. Hal ini terlihat pada spesimen 550°C yang memiliki gaya gesek tinggi tetapi struktur karbon lebih matang.

c. Hubungan Koefisien Gesek dengan Ketahanan Aus

Hubungan antara koefisien gesekan dan keausan sangat kompleks, karena keduanya merupakan respons dari sistem tribologi daripada sifat material yang melekat. Koefisien gesek merupakan rasio antara gaya gesek terhadap gaya normal (He dkk., 2025). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai koefisien gesek meningkat dengan naiknya temperatur pirolisis, terutama pada spesimen 550°C. Nilai koefisien gesek yang tinggi menunjukkan kestabilan gesek yang lebih baik, potensi pengereman yang lebih efektif, adanya permukaan kontak yang lebih kasar dan aktif secara mekanik. Namun, nilai koefisien gesek yang terlalu tinggi juga berpotensi meningkatkan laju keausan apabila struktur material bersifat getas. Oleh karena itu, keseimbangan antara kekerasan, koefisien gesek, dan struktur mikro menjadi faktor utama dalam menentukan performa kampas rem.

4.7.5 Pembahasan Hasil Pengujian SEM

Secara umum, suhu pirolisis memainkan peran penting dalam membentuk struktur mikro biochar, mempengaruhi porositas dan karakteristik permukaannya,

yang pada gilirannya sangat penting untuk penerapannya sebagai pengisi dalam komposit polimer (Elnour dkk., 2019). Pada suhu 350°C, permukaan material masih terlihat relatif kasar dan tidak homogen, dengan partikel arang kayu jati yang belum terkarbonisasi sempurna serta ikatan antar fase yang kurang rapat. Pada suhu 450°C, struktur mikro menjadi lebih padat dan homogen akibat berkurangnya senyawa volatil, sehingga distribusi partikel arang, pasir besi, dan serbuk keramik tampak lebih merata. Sementara itu, pada suhu 550°C, permukaan menunjukkan porositas yang lebih tinggi dengan indikasi retakan mikro, yang menandakan karbonisasi telah berlangsung lebih sempurna namun cenderung meningkatkan sifat getas material. Perubahan morfologi ini sejalan dengan hasil uji mekanik dan tribologi yang diperoleh. Hasil analisis SEM secara konsisten menunjukkan struktur berpori yang terdistribusi dengan baik dalam biochar dengan peningkatan suhu pirolisis (Sathyabama dkk, 2025).

4.7.6 Pembahasan Hasil Pengujian EDX

Hasil analisis EDX menunjukkan pada temperatur pirolisis 350°C, kandungan karbon masih relatif sedang karena proses karbonisasi belum sempurna dan masih terdapat senyawa organik serta gugus oksigen. Pada temperatur 450°C, kandungan karbon terdeteksi paling rendah, yang disebabkan oleh pelepasan senyawa volatil secara intens sebelum terbentuknya struktur karbon yang stabil. Pada temperatur 550°C, kandungan karbon kembali meningkat akibat terbentuknya struktur karbon yang lebih matang dan stabil, sejalan dengan peningkatan kekerasan dan perubahan morfologi permukaan hasil pengamatan SEM.

4.7.7 Pembahasan Hubungan Struktur Mikro Komposit Terhadap Sifat Mekanik

Pengamatan struktur mikro melalui SEM menunjukkan hubungan yang jelas dengan sifat mekanik kanvas rem komposit. Pada suhu pirolisis 350 °C, permukaan masih kasar dan tidak homogen akibat karbonisasi yang belum sempurna, sehingga ikatan antar fase lemah dan menghasilkan nilai kekerasan rendah serta keausan lebih tinggi. Pada suhu 450 °C, struktur mikro menjadi lebih homogen dan padat karena berkurangnya senyawa volatil, namun kepadatan material belum optimal sehingga peningkatan sifat mekanik masih terbatas. Sementara itu, pada suhu 550 °C terbentuk struktur karbon yang paling padat dan

stabil, yang berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan dan ketahanan aus tertinggi, meskipun mulai muncul retakan mikro yang menandakan kecenderungan sifat getas. Secara keseluruhan, semakin homogen dan padat struktur mikro, semakin baik sifat mekanik kampas rem komposit (Mousavi dkk., 2020).

4.7.8 Pembahasan Hubungan SEM–EDX terhadap Sifat Mekanik

Secara keseluruhan, hasil SEM dan EDX saling mendukung dalam menjelaskan perubahan sifat mekanik kampas rem. Biochar yang dihasilkan pada suhu pirolisis yang lebih tinggi cenderung menunjukkan struktur padat atau berpori (Sathyabama dkk, 2025) pada suhu 550°C berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan dan gaya gesek. Sebaliknya, kandungan karbon terendah pada suhu 450°C menyebabkan sifat mekanik berada pada tingkat terendah, sedangkan pada 350°C karbonisasi yang belum sempurna membatasi peningkatan performa material.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi temperatur pirolisis berpengaruh terhadap kandungan karbon serbuk arang kayu jati karena kandungan karbon tertinggi diperoleh pada temperatur pirolisis 550°C, diikuti 350°C, dan terendah pada 450°C, yang menunjukkan bahwa proses karbonisasi semakin optimal pada temperatur pirolisis yang lebih tinggi.
2. Variasi temperatur pirolisis berpengaruh terhadap sifat kekerasan dan ketahanan aus kampas rem komposit karena peningkatan kandungan karbon akibat pirolisis suhu tinggi meningkatkan nilai kekerasan dan menurunkan laju keausan, sehingga kampas rem dengan arang kayu jati hasil pirolisis 550°C memiliki performa mekanik dan ketahanan aus terbaik dibandingkan variasi lainnya dan kampas rem komersial.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka didapat saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan pengujian lanjutan pada kondisi pengereman sebenarnya, seperti uji *fading* dan *recovery*, agar performa kampas rem komposit dapat dibandingkan lebih komprehensif dengan kampas rem komersial.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengoptimalkan komposisi filler dan matriks, guna memperoleh keseimbangan terbaik antara kekerasan, ketahanan aus, dan ketangguhan material.
3. Disarankan untuk melakukan pengujian keausan jangka panjang dan uji temperatur tinggi pada kondisi operasi yang lebih ekstrem, seperti beban pengereman yang lebih besar, waktu gesek yang lebih lama, kecepatan geser tinggi, serta temperatur kerja mendekati kondisi pengereman berulang (*fade*),

agar dapat diketahui stabilitas mekanik, ketahanan aus, dan konsistensi koefisien gesek material kampas rem dalam kondisi mendekati aplikasi nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Aboughaly, M., Babaei-Ghazvini, A., Dhar, P., Patel, R., & Acharya, B. (2023). Enhancing the Potential of Polymer Composites Using Biochar as a Filler: A Review. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym15193981>
- Anca-Couce, A., Sommersacher, P., Evic, N., Mehrabian, R., & Scharler, R. (2018). Experiments and modelling of NO_x precursors release (NH₃ and HCN) in fixed-bed biomass combustion conditions. *Fuel*, 222, 529–537. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.003>
- Anggiriiani, S., Sutiawan, J., Studi Teknik Produksi Furnitur, P., Industri Furnitur dan Pengolahan Kayu Jalan Wanamarta Raya No, P., & Industri Kendal, K. (2023). A Review of the Suitability of Fast Growing Teak Wood for Furniture Material. In *Biodiversitas Papuasias-Fakultas Kehutanan UNIPA Jurnal Kehutanan Papuasias* (Vol. 9, Issue 1).
- Apriliani, N. F., Wirawan, W. A., Muslimin, M., Ilyas, R. A., Rahma, M. A., & Agus Salim, A. T. (2024). Improving wear performance, physical, and mechanical properties of iron sand/epoxy composite modified with carbon powder. *Results in Materials*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100532>
- Arif, J., Husni, H. R., & Sebayang, S. (2015). Pengaruh Resin Epoksi Terhadap Mortar Polimer Ditinjau Dari Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, Daya Serap Air Dan Scanning Electron Microscope. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 3(3).
- Bhatt, B., Marathe, U., Kalel, N., & Bijwe, J. (2024). *Efficacy of high-performance epoxy resin as binder to replace eco-unfriendly Phenolic resins in Cu-free brake-pads*. <https://ssrn.com/abstract=4948067>
- Chávez-Salgado, L. P., Vandenbossche, V., & Vilarem, G. (2022). *Tectona grandis* Linn. f. secondary metabolites and their bioactive potential: a review. *Iforest - Biogeosciences and Forestry*, 15(2), 112–120. <https://doi.org/10.3832/ifor3714-015>
- Elnour, A. Y., Alghyamah, A. A., Shaikh, H. M., Poulouse, A. M., Al-Zahrani, S. M., Anis, A., & Al-Wabel, M. I. (2019a). Effect of pyrolysis temperature on biochar microstructural evolution, physicochemical characteristics, and its influence on biochar/polypropylene composites. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/app9061149>
- Elnour, A. Y., Alghyamah, A. A., Shaikh, H. M., Poulouse, A. M., Al-Zahrani, S. M., Anis, A., & Al-Wabel, M. I. (2019b). Effect of pyrolysis temperature on

biochar microstructural evolution, physicochemical characteristics, and its influence on biochar/polypropylene composites. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/app9061149>

Elnour, A. Y., Alghyamah, A. A., Shaikh, H. M., Poulouse, A. M., Al-Zahrani, S. M., Anis, A., & Al-Wabel, M. I. (2019c). Effect of pyrolysis temperature on biochar microstructural evolution, physicochemical characteristics, and its influence on biochar/polypropylene composites. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/app9061149>

Embang, Y., Mendoyo, K., Bali, J., Tika, N., Ketut Supir, I., Ayu, G., & Agustiana, T. (2023). PELATIHAN PEMBUATAN ASAP CAIR DENGAN TUNGKU PIROLISIS SEDERHANA BAGI KELOMPOK PETANI KELAPA. In *Jurnal Widya Laksana* (Vol. 12, Issue 1).

Fajar Dermawan. (2024). Analysis Of Alternative Brake Pads From Pineapple Leaf Fibers Coated With Epoxy Resin On Wear Tests. In *Jurnal Smart Teknologi* (Vol. 5, Issue 5). <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/JST>

Fatmaliana, A., Maulinda, M., & Sari, N. (2020). SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF HEMATITE (Fe₂O₃) OF IRON ORE AND MAGNETITE (Fe₃O₄) FROM IRON SAND THROUGH PRECIPITATION METHOD FOR INDUSTRIAL RAW MATERIALS. *Jurnal Neutrino*, 12(2), 37–42. <https://doi.org/10.18860/NEU.V12I2.8183>

Feng, X. M., Mi, W. L., Xia, F., Mao-Ying, Q. L., Jiang, J. W., Xiao, S., Wang, Z. F., Wang, Y. Q., & Wu, G. C. (2012). Involvement of spinal orexin A in the electroacupuncture analgesia in a rat model of post-laparotomy pain. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 12. <https://doi.org/10.1186/1472-6882-12-225>

He, T., Chen, W., Liu, Z., Gong, Z., Du, S., & Zhang, Y. (2025). The Impact of Surface Roughness on the Friction and Wear Performance of GCr15 Bearing Steel. *Lubricants*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/lubricants13040187>

Irawan, A. P., Fitriyana, D. F., Siregar, J. P., Cionita, T., Anggarina, P. T., Utama, D. W., Rihayat, T., Rusiyanto, R., Dimiyati, S., Aripin, M. B., Ismail, R., Bayuseno, A. P., Baskara, G. D., Khafidh, M., Putera, F. P., & Yotenka, R. (2023). Influence of Varying Concentrations of Epoxy, Rice Husk, Al₂O₃, and Fe₂O₃ on the Properties of Brake Friction Materials Prepared Using Hand Layup Method. *Polymers*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/polym15122597>

Juang Zebua, A. P., Wicaksono, D., & Sehonno, S. (2022). STUDI EKSPERIMENTAL PEMBUATAN KAMPAS REM BERBAHAN SERAT SABUT TERHADAP PENGUJIAN KEAUSAN. *Teknika STTKD: Jurnal*

Teknik, Elektronik, Engine, 8(1), 87–91.
<https://doi.org/10.56521/teknika.v8i1.557>

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, Al₂O₃ and Fe₂O₃. *Automotive Experiences*, 6(2), 303–319. <https://doi.org/10.31603/ae.9121>

Kosjoko, & Abadi, T. (2023). Pirolisis Serbuk Kayu Jati (Tectona Grandis L.F) untuk Bahan Brake Pad Sepeda Motor Bermatrik Epoxy. *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah Dan Teknologi Teknik Mesin*, 8(1), 30–35. <https://doi.org/10.32528/jp.v8i1.502>

Lubis, R. F., Pasaribu, L. H., & Nasution, M. I. (2024). Pengaruh variasi campuran serbuk kayu jati (tectona grandis l.) dan sekam padi pada pembuatan material komposit kanvas rem. *Dinamika Teknik Mesin*, 14(1), 60. <https://doi.org/10.29303/dtm.v14i1.783>

Mgbemena, C. O., Esigie, R. U., Mgbemena, C. E., & Ata, C. M. (2022). Production of low wear friction lining material from agro-industrial wastes. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00130-3>

Nurul Ihsan, M., Wicaksono, D., & Sehonu, S. (2022). UJI KEAUSAN KAMPAS REM BERBAHAN LIMBAH ORGANIK MENGGUNAKAN METODE OGOSHI. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 8(1), 92–96. <https://doi.org/10.56521/teknika.v8i1.559>

Öztürk, Akpınar, S., & Tığ, M. (2022). Effect of calcined colemanite addition on properties of porcelain tile. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 58(1), 321–331. <https://doi.org/10.1007/s41779-021-00674-2>

Parente, J. M., Simoes, R., Silva, A. P., & Reis, P. N. B. (2024). Impact of the Curing Temperature on the Manufacturing Process of Multi-Nanoparticle-Reinforced Epoxy Matrix Composites. *Materials*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/ma17081930>

Pramono, C., & Suprihanto, A. (2023). Karakteristik Bahan Alternatif Kanvas Rem dari Komposit Berpenguat Serbuk Serbuk Kayu Jati, Serbuk Tempurung Kelapa, dan Serbuk Kuningan dengan Variasi Suhu Post Curing. *JPII*, 1(7), 235–241. <https://doi.org/10.14710/jpii.2023.20817>

Putra, I., Fe, K., Besi, P., & Box, S. (2023). *HASIL PROSES KONSENTRASI MENGGUNAKAN SLUICE BOX*.

- Rais Salim. (2016). *Karakteristik dan Mutu Arang Kayu Jati (Tectona grandis) dengan Sistem Pengarangan Campuran pada Metode Tungku Drum The Quality and Characteristics of Teak (Tectona grandis) Charcoal Made by Mixed Carbonisation in Drum Kiln.*
- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354–6374. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>
- Ramjani, S. A., Vijayakumary, P., Subramanian, P., Gunasekar, J. J., & Gitanjali, J. (2024). Briquette Production from Teak and Neem Twigs Biochar with Selective Binding Materials. *Chemical Engineering Transactions*, 110, 445–450. <https://doi.org/10.3303/CET24110075>
- Rehim, M. H. A., & Turkey, G. (2022). Epoxy resin reinforced with graphene derivatives: physical and dielectric properties. *Journal of Polymer Research*, 29(4). <https://doi.org/10.1007/s10965-022-02971-1>
- Rizanti, D. E. (2017). *COMPARISON OF TEAK WOOD PROPERTIES ACCORDING TO FOREST MANAGEMENT: SHORT AND LONG ROTATION.* <https://www.researchgate.net/publication/322220441>
- Sathyabama, K., & Firdous, S. (2025). Effect of Pyrolysis Temperature on the Physicochemical Properties and Structural Characteristics of Agricultural Wastes-Derived Biochar. *ACS Omega*, 10(33), 37013–37024. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00120>
- Sudia, B. (2019). *Biokomposit Polimer Berpenguat Serat Rami dan Partikel Tempurung Kelapa Sebagai Material Kampas Rem Sepeda Motor.*
- Suresha, B., Indushekhara, N. M., Varun, C. A., Sachin, D., & Pranao, K. (2021). Effect of carbon nanotubes reinforcement on mechanical properties of aramid/epoxy hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1478–1484. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.307>
- Suryaningsih, S., & Reza Pahleva, D. (2020). ANALISIS KUALITAS BRIKET TANDAN KOSONG DAN CANGKANG KELAPA SAWIT DENGAN PENAMBAHAN LIMBAH PLASTIK LOW DENSITY POLYETHYLENE (LDPE) SEBAGAI BAHAN BAKAR ALTERNATIF. In *Jurnal Material dan Energi Indonesia* (Vol. 10, Issue 01).

- Syaputra, M. (2017). *ANALISA KEAUSAN KAMPAS REM NON ASBES TERBUAT DARI KOMPOSIT POLIMER SERBUK PADI DAN TEMPURUNG KELAPA*. 07(2).
- Trisanti, P. N., Rifan, M., Akbar, P., Gunardi, I., & Sumarno, S. (2021). Isolation of cellulose from teak wood using hydrothermal method. *AIP Conference Proceedings*, 2349. <https://doi.org/10.1063/5.0053874>
- Tsai, Stephen W., & Hahn, H. Thomas. (2018). *Introduction to Composite Materials*. Routledge.
- Tu, P., Zhang, G., Wei, G., Li, J., Li, Y., Deng, L., & Yuan, H. (2022). Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00618-z>
- Udalov, A. V, Udalov, A., & Norin, E. G. (2024). Indentation parameters for Brinell hardness measurement of low carbon steels. *E3S Web of Conferences*, 549, 3015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454903015>
- Wei, H., Wang, D., & Xing, W. (2023). Strengthening and Toughening Technology of Epoxy Resin. *Journal of Physics: Conference Series*, 2468(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2468/1/012066>
- Wei, H. Z., Wang, D. Y., & Xing, W. (2023). Strengthening and Toughening Technology of Epoxy Resin. *Journal of Physics*, 2468(1), 12066. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2468/1/012066>
- Widjanarko, D. (2020). *Karakteristik Komposit Partikel Arang Kayu Akasia Bermatrik Epoxy Sebagai Salah Satu Alternatif Kampas Rem Non-Asbestos* (Vol. 22, Issue 1).
- Yacouba, A., Bellali, S., Haddad, G., Mavros, N., Fontanini, A., Dubourg, G., Lagier, J.-C., Raoult, D., & Khalil, J. Y. B. (2023). Use of scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray for urine analysis: A preliminary investigation. *Microscopy Research and Technique*. <https://doi.org/10.1002/jemt.24301>
- Yudhanto, F., Dhewanto, S. A., & Yakti, S. W. (2019). KARAKTERISASI BAHAN KAMPAS REM SEPEDA MOTOR DARI KOMPOSIT SERBUK KAYU JATI. *Quantum Teknika: Jurnal Teknik Mesin Terapan*, 1(1). <https://doi.org/10.18196/jqt.010104>
- Yustana, P. (2018). *MENGENAL KERAMIK* Penerbit: ISI PRESS.

Yuwanda, A. N., Rahmayuni, R., Visgun, D. A., Rahmi, A., Rifai, H., & Dwiridal, L. (2022). Characterization of Magnetic Minerals of Iron Sand Pasia Nan Tigo Padang Beach Using X-Ray Diffraction (XRD). *INDONESIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 12(1), 35. <https://doi.org/10.13057/ijap.v12i1.51531>

Zhang, Y., & Lawn, B. R. (2022). Editorial: Dental Ceramics: From Science and Technology to Clinical Application. *International Journal of Prosthodontics*, 35(3), 257–258. <https://doi.org/10.11607/ijp.2022.3.e>