

**PENGARUH VARIASI TEKANAN PADA PRODUKSI
KOMPOSIT *FRICTION MATERIALS* KAMPAS REM
TERHADAP SIFAT MEKANIK, FISIK DAN TRIBOLOGI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**



Disusun Oleh :

Nama : AKHMAD FAUZI
No. Mahasiswa : 20525124
NIRM : 1904130034

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

2025

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Akhmad Fauzi

NIM : 20525124

Judul Tugas Akhir : Pengaruh Variasi Tekanan Pada Produksi Komposit
Friction Materials Kampas Rem Terhadap Sifat
Mekanik, Fisik dan Tribologi

Dengan ini saya mengatakan bahwa tugas akhir ini mutlak karya sendiri, serta kutipan yang dilakukan secara tertulis berdasarkan kaidah dalam penulisan karya ilmiah yang berlaku. Sebagaimana penulis tidak melakukan plagiarisme terhadap dari karya ilmiah orang lain, kecuali kutipan dan referensi yang tercantum di dalam penulisan karya ilmiah ini. Apabila pernyataan penulis tidak benar di kemudian hari, serta terdapat melakukan pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya ilmiah ini. Penulis bersedia menanggung konsekuensi atau sanksi akademik yang berlaku. Demikianlah surat pernyataan ini yang saya buat sebagai bentuk pertanggungjawaban, tanpa ada paksaan atau pihak tertentu yang terlibat di dalamnya.

Yogyakarta, 26 Agustus 2025

Yang menciptakan pernyataan,

Akhmad Fauzi
(20525124)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

PENGARUH VARIASI TEKANAN PADA PRODUKSI KOMPOSIT FRICTION MATERIALS KAMPAS REM TERHADAP SIFAT MEKANIK, FISIK DAN TRIBOLOGI

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : AKHMAD FAUZI
No. Mahasiswa : 20525124
NIRM : 1904130034

Yogyakarta, 4 Agustus 2025

Dosen Pembimbing



Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

PENGARUH VARIASI TEKANAN PADA PRODUKSI KOMPOSIT *FRICTION MATERIALS* KAMPAS REM TERHADAP SIFAT MEKANIK, FISIK DAN TRIBOLOGI

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : AKHMAD FAUZI
No. Mahasiswa : 20525124
NIRM : 1904130034

Tim Penguji

Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

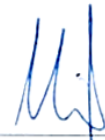
Ketua

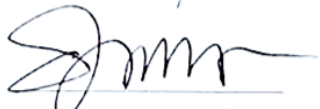
Ir. Santo Ajie Dhewanto, S.T., M.M., IPP

Anggota I

Ir. Donny Suryawan, S.T., M.Eng., IPP

Anggota II


Tanggal : 26/8/2025


Tanggal : 26/8/2025


Tanggal : 26/8/2025

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin


Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

HALAMAN PERSEMBAHAN

Rasa syukur dan terima kasih sebesar-besarnya. Penulis mempersembahkan laporan ini kepada kedua orang tuaku tercinta yang telah berupaya selalu mendoakan, mendukung, memotivasi penulis dengan penuh pengorbanan tidak ada hentinya. Kakak-kakakku yang selalu mendukung dan mengorbankan tenaga yang tidak kenal lelah dengan memenuhi kebutuhan dan keperluan penulis selama menempuh pendidikan di program studi Teknik Mesin. Kepada dosen pembimbing penulis yang telah memberikan saran, masukan dan bantuan selama pelaksanaan riset tugas akhir ini. Tidak lupa juga kepada program Studi Teknik Mesin dan Pihak UII terkait telah memfasilitasi dan hibah pendanaan penelitian selama pelaksanaan tugas akhir yang dilakukan oleh penulis hingga dapat terselesaikan dengan baik, meskipun terdapat masalah yang luar prediksi penulis. Dengan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang terkait yang telah disebutkan di atas.

HALAMAN MOTTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”
(QS. Al-Baqarah:286).

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sebelum mereka
mengubah keadaan diri sendiri” (QS. Ar-Ra’d: 11).

“Jangan tunggu sempurna, mulailah, kerjakan, selesaikan dan sempurnakan
dengan sambil berjalan”

“Semakin keras badai, maka semakin kuat pondasi pada pohon”

“Langkah kecilmu hari ini adalah pondasi besar dalam menuju masa depanmu”

“ Ilmu adalah cahaya, sementara usaha adalah pelitanya”

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillahirobbil alamin, dengan memanjatkan rasa syukur ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir (TA) ini dengan judul “Pengaruh Variasi Tekanan Pada Produksi Komposit *Friction Materials* Bantalan Rem Terhadap Sifat Mekanik, Fisik dan Tribologi”. Laporan ini sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia (UII).

Pada penulisan laporan ini atas keberhasilan dalam pelaksanaan riset yang telah dilakukan oleh penulis dan tidak lepas dari atas bimbingan, bantuan, dukungan dan nasehat dari berbagai pihak selama pelaksanaan riset dan penyusunan Tugas Akhir ini. Pada kesempatan ini penulis dengan hormat dan mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Orang tua penulis terutama bapak Jahrah, ibu Saniah dan saudara kandung penulis yang telah memberikan dukungan baik secara nasehat, doa maupun finansial selama penulis menempuh pendidikan ini.
2. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, ST., M.T., IPP selaku ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia, sekaligus selaku dosen pembimbing penulis yang telah membimbing dalam pelaksanaan riset, penyusunan laporan, masukan dan saran.
3. Dosen pembimbing penulis dan pihak UII yang terkait telah memberikan fasilitas dalam pelaksanaan dan pendanaan riset ini hingga dapat terselesaikan dengan baik.
4. Bapak Dr.Eng. Ir. Risdiyono, S.T., M.Eng., IPM selaku kepala laboratorium Kreativitas dan Inovasi yang telah mengizinkan dalam peminjaman alat CNC untuk membuat cetakan.
5. Bapak Irfan Aditya Dharma, S.T., M.Eng., Ph.D selaku kepala laboratorium Konversi Energi yang telah mengizinkan dalam peminjaman alat tribometer untuk pengujian spesimen.

6. Bapak Ir. Muhammad Ridlwan, S.T., M.T., IPP selaku kepala laboratorium Proses Produksi dan Komposit yang telah mengizinkan dalam peminjaman alat untuk proses pembuatan spesimen uji.
7. Pihak laboran Teknik Mesin UII yang telah membantu penulis dalam penggunaan alat.
8. Muhammad Errizky Wibowo dan Mohammad Rizki Djati Admoko selaku rekan seperjuangan yang telah mengambil topik material gesek ramah lingkungan.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan ini masih banyak kekurangannya, sangat jauh dari kata sempurna. Atas saran dan kritik sangat diharapkan oleh penulis untuk membangun ke depannya. Semoga laporan ini memberikan manfaat dari berbagai kalangan. Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya.

Yogyakarta, 7 Juli 2025

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Akhmad Fauzi', is placed over a light blue rectangular background.

Akhmad Fauzi

(20525124)

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan kampas rem ramah lingkungan dari sekam padi untuk menggantikan material asbes yang berbahaya. Parameter tekanan kompresi pemadatan mempengaruhi kekuatan, keausan dan gesekan dalam pengembangan material gesek rem baru. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tekanan kompresi terhadap sifat mekanik, fisik dan kinerja tribologi. Dalam penelitian ini, material gesek rem dibuat menggunakan metode *compression molding* dengan komposisi resin fenolik, sekam padi, Al_2O_3 , Fe_2O_3 dan hexamin. Tekanan kompresi pemadatan divariasikan pada 5 MPa, 10 MPa dan 15 MPa. Pengujian meliputi densitas, kekuatan impact, kekuatan tarik, kekuatan lentur, keausan dan gesekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompresi pemadatan material dari 5 MPa menjadi 10 MPa dapat menurunkan densitas, kekuatan impact, kekuatan tarik, kekuatan lentur, laju keausan spesifik dan koefisien gesek. Sementara itu, tekanan kompresi pemadatan 10 MPa menjadi 15 MPa dapat meningkatkan sifat mekanik, fisik dan ketahanan keausan. Namun, peningkatan tekanan tersebut menurunkan kinerja gesekan. Oleh karena itu, hasil akhir material akibat peningkatan tekanan kompresi pemadatan dipengaruhi oleh ukuran partikel, distribusi matriks dan pengisi, porositas, serta ikatan silang resin.

Kata kunci : Tekanan kompresi, material gesek rem, kekuatan, kinerja tribologi.

Abstract

This study develops environmentally friendly brake lining from rice husk to replace dangerous asbestos materials. The parameters of compaction compression pressure influence the strength, wear and friction in the development of new brake friction materials. This study aims to analyze the influence of compression pressure on properties of mechanical, physical and tribological performance. In the study, brake friction material was made using the compression molding method with a composition of phenolic resin, rice husk, Al_2O_3 , Fe_2O_3 and hexamine. The compaction compression pressure was varied among 5 MPa, 10 MPa and 15 MPa. Testing includes density, impact strength, tensile strength, flexural strength, wear and friction. The results showed that increasing the material compaction compression pressure from 5 MPa to 10 MPa can reduce the density, impact strength, tensile strength, flexural strength, specific wear rate and coefficient of friction. Meanwhile, increasing the compaction compression pressure from 10 MPa to 15 MPa can improve properties of mechanical, physical and wear resistance. However, increasing pressure reduces friction performance. Therefore, the final material result due to increased compaction compression pressure is influenced by particle size, matrix and filler distribution, porosity and resin cross-linking.

Keyword : Compression pressure, brake friction material, strength, tribological performance.

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	iii
Lembar Pengesahan Dosen penguji.....	iv
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar.....	vii
Abstrak	ix
<i>Abstract</i>	x
Daftar Isi	xi
Daftar Tabel.....	xiii
Daftar Gambar	xiv
Daftar Notasi.....	xvi
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
Bab 2 Tinjauan Pustaka	7
2.1 Kajian Pustaka	7
2.2 Dasar Teori	11
2.2.1 Komposit Material Gesek Rem	11
2.2.2 Kriteria Material Gesek Rem.....	14
2.2.3 Komposisi Material Gesek	14
2.2.4 Tribologi	20
2.2.5 <i>Compression Molding</i> (Cetakan Kompresi)	23
Bab 3 Metode Penelitian	25
3.1 Alur Penelitian.....	25
3.2 Pendekatan Dan Desain Penelitian	25

3.3	Material dan Alat	26
3.4	Desain Cetakan Spesimen	28
3.5	Metode Penyerbukan Sekam Padi	32
3.6	Pembuatan spesimen uji	33
3.7	Pengujian Spesimen.....	37
3.7.1	Pengujian densitas	37
3.7.2	Pengujian impak	38
3.7.3	Pengujian tarik.....	39
3.7.4	Pengujian lentur.....	42
3.7.5	Pengujian gesekan dan keausan.....	43
3.8	Variabel penelitian.....	46
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	47
4.1	Pengujian Densitas	47
4.2	Pengujian Impak.....	50
4.3	Pengujian Tarik	52
4.4	Pengujian lentur.....	56
4.5	Pengujian Koefisien Gesek (CoF)	58
4.6	Pengujian Laju Keausan Spesifik.....	60
Bab 5	Penutup.....	63
5.1	Kesimpulan.....	63
5.2	Saran atau Penelitian Selanjutnya.....	63
Daftar Pustaka		65
Lampiran.....		69

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Standar material gesek sesuai SAE J661-1997.	12
Tabel 2.2. Spesifikasi teknik material gesekan rem komposit PT.KAI.....	13
Tabel 2.3. Karakteristik sifat mekanik, termal dan fisik resin fenolik.	15
Tabel 3.1. Bahan pembuatan spesimen uji material gesek.....	26
Tabel 3.2. Alat pembuatan spesimen uji material gesek dan cetakan.	27
Tabel 3.3. Standar uji spesimen.....	29
Tabel 3.4. Parameter-parameter proses produksi material gesek.	35
Tabel 3.5. Variabel penelitian pada spesimen uji.	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Bagian-bagian lapisan material gesekan pada bantalan rem.	12
Gambar 2.2. Aplikasi komponen otomotif dari resin fenolik.....	16
Gambar 2.3. (a) Tanaman padi dan (b) sekam padi.....	18
Gambar 2.4. Mikrograf SEM abu sekam padi (RHA) suhu 600°C.....	18
Gambar 2.5. Mekanisme keausan abrasif.....	22
Gambar 2.6. Mekanisme gesekan.....	22
Gambar 2.7. Metode <i>compression molding</i>	23
Gambar 3.1. Diagram alur penelitian.	25
Gambar 3.2. Cetakan spesimen uji.	29
Gambar 3.3. Dimensi cetakan.....	29
Gambar 3.4. Dimensi uji kekuatan tarik.....	30
Gambar 3.5. Dimensi uji kekuatan lentur.....	30
Gambar 3.6. Dimensi uji kekuatan impak.	30
Gambar 3.7. Dimensi uji keausan <i>pin on disc</i>	31
Gambar 3.8. Skematik penyerbukan sekam padi.	32
Gambar 3.9. Skematik pembuatan spesimen uji material gesek rem.	37
Gambar 3.10. Timbangan digital dan mikrometer sekrup.....	38
Gambar 3.11. Alat uji impak.	39
Gambar 3.12. Mesin uji tarik merk <i>Ibertest</i>	40
Gambar 3.13. Pengukuran spesimen uji menggunakan dial indikator.	40
Gambar 3.14. Spesimen yang di jepit pada grip mesin uji tarik.....	40
Gambar 3.15. Kurva <i>stress</i> dan <i>strain</i>	41
Gambar 3.16. Mesin uji bending <i>tokyo testing machine</i>	42
Gambar 3.17. Posisi spesimen dengan metode <i>three poin bending</i>	43
Gambar 3.18. Mesin tribometer.....	44
Gambar 3.19. Posisi spesimen uji.....	44
Gambar 3.20. Skematik grafik CoF-jarak sliding.	45
Gambar 4.1. Grafik pengujian densitas.	47
Gambar 4.2. Struktur rongga sekam padi pada pembakaran 650°C.....	48
Gambar 4.3. Grafik hasil pengujian kekuatan impak.	50

Gambar 4.4. Patah getas Kode spesimen M5-3.....	51
Gambar 4.5. Grafik <i>stress</i> dan <i>strain</i> kode spesimen M15-3.	52
Gambar 4.6. Grafik pengujian kekuatan tarik dan modulus elastisitas.	53
Gambar 4.7 Grafik pengujian perpanjangan putus.....	55
Gambar 4.8. Grafik Pengujian kekuatan lentur.	56
Gambar 4.9. Grafik kode spesimen M15-3.	58
Gambar 4.10. Grafik pengujian koefisien gesek.	59
Gambar 4.11. Grafik pengujian laju keausan spesifik.....	60
Gambar 4.12. Permukaan spesimen terhadap variasi pemadatan tekanan.	61

DAFTAR NOTASI

CoF	=	<i>Coefficient of Friction</i> (μ)
ρ	=	Densitas (g/cm^3)
HI	=	Harga Impak (J/mm^2)
m	=	Massa (g)
V	=	Volume (cm^3)
$\Delta\sigma$	=	Selisih Tegangan (MPa)
$\Delta\varepsilon$	=	Selisih Regangan (%)
α	=	Sudut Alpha
β	=	Sudut Beta
W	=	Energi Serap (J)
K_s	=	Laju Keausan Spesifik (mm^3/Nm)
F_n	=	Beban Normal (N)
f_g	=	Gaya Gesek (N)
γ	=	Gamma (m)
r	=	Jarak <i>Sliding</i>
E	=	Modulus Elastisitas
v	=	Fraksi Volume (%)
μm	=	Mikrometer
g	=	Gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
ASTM	=	<i>American Society Testing Materials</i>
SAE	=	<i>Society of Automotive Engineer</i>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kampas rem merupakan salah satu komponen penting dari transportasi kendaraan. Komponen ini berfungsi untuk mengendalikan dan menghentikan laju kecepatan kendaraan. Kualitas kampas rem merupakan faktor terpenting dalam menjamin keselamatan jiwa pengguna [1]. Kampas rem memiliki dua jenis yaitu kampas rem asbes dan kampas rem non asbes. Material gesek rem yang beredar di pasaran masih berbahan asbes. Bahan ini memiliki kekurangan yaitu sifatnya yang tidak ramah lingkungan. Komponen ini termasuk material habis pakai dan harus diganti secara berkala. Kampas rem yang bagus dan berkualitas dapat meningkatkan kinerja pengereman. Oleh karena itu, bahan yang dibuat untuk kampas rem memiliki gesekan yang tinggi dan ketahanan panas yang baik.

Perkembangan ilmu material komposit, khususnya pada material gesek seperti kampas rem, saat ini mengarah pada keberlanjutan yang ramah lingkungan. Hal ini didorong oleh tingginya dampak negatif dari penggunaan material kampas rem berbahan asbes. Material gesek rem berbahan asbes mengandung zat karsinogenik yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Penelitian dari WHO (*World Health Organization*) dan IARC (*Internasional Agency for Research on Cancer*) menunjukkan bahwa partikel yang dihasilkan oleh material gesek rem asbes dapat menyebabkan gangguan pada paru-paru [2]. Karsinogenik berasal dari mineral silikat yang memiliki kandungan silika kristal yang sulit dihancurkan oleh tubuh, sehingga berbahaya bagi paru-paru jika terhirup secara berulang [3]. Maka dari itu, kampas rem asbes mulai tergantikan menjadi non asbes yang lebih aman dan ramah lingkungan.

Material gesek rem berbahan dari limbah tumbuhan mulai dikembangkan sebagai bahan alternatif dari kampas rem asbes. Hal ini karena bahan yang lebih aman dan ramah lingkungan, sehingga material gesek rem berbahan tumbuhan menjadi alternatif untuk menggantikan bahan asbes. Salah satu tumbuhan alam yang memiliki potensi besar di Indonesia berasal dari sektor pertanian, yaitu

limbah tumbuhan padi. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2024, luas panen padi mencapai 10,05 juta hektar dengan produksi 55,66 juta ton Gabah Kering Giling (GKG). Dari jumlah tersebut, limbah sekam padi yang dihasilkan diperkirakan sekitar 20%-30% [4]. Sekam padi memiliki kandungan silika yang tinggi, khususnya silika amorf dengan proses pembakaran pada suhu dan waktu terkontrol. Kandungan silika amorf memiliki dampak bahaya terhadap kesehatan jauh lebih kecil dibandingkan silika kristal [5]. Silika amorf mudah dihancurkan oleh sistem imun manusia. Oleh karena itu, limbah sekam padi dapat dimanfaatkan menjadi material alternatif kampas rem.

Kandungan silika pada kampas rem memiliki peran penting yang dapat mendukung kinerja gesekan rem. Hal ini dikarenakan memiliki sifat yang keras, tahan panas, meningkatkan gesekan, memperlambat keausan, serta membuat material komposit lebih stabil. Dengan ini, penggunaan bahan alam dalam material gesek rem memiliki pengaruh terhadap sifat mekanik, fisik dan tribologi [6]. Maka dari itu, desain material gesek rem berbahan limbah sekam padi harus memenuhi kriteria utama seperti koefisien gesek tinggi, keausan rendah dan kekuatan tinggi (densitas, tarik, lentur dan impak). Penelitian sebelumnya terkait material gesek rem berbahan alam seperti sekam padi dengan resin epoksi lebih banyak berfokus pada variasi komposisi. Namun, pengaruh pemadatan tekanan kompresi masih belum banyak tereksplorasi, terutama pada kampas rem dari sekam padi dengan resin fenolik. Parameter tekanan ini sangat penting dalam proses pemadatan material gesek rem, karena dapat mempengaruhi kekuatan, keausan dan koefisien gesek.

Penelitian terdahulu dari Khafidh, dkk., berfokus pada komposisi menggunakan metode *hand lay up* (penekanan manual dengan rol) yang berbahan resin epoksi, sekam padi, aluminium oksida dan besi oksida, Namun, penelitian tersebut tidak menggunakan tekanan kompresi dan resin fenolik [7]. Di sisi lain, penelitian dari Ghazali, dkk., menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompresi dapat memperbaiki kekuatan dan menurunkan keausan [8]. Oleh karena itu, penelitian ini akan meneliti variasi tekanan pemadatan kompresi optimal untuk material gesek rem berbahan sekam padi dan resin fenolik agar diperoleh kinerja terbaik. Fokus dari penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan tekanan

pemadatan dengan metode *compression molding* agar memiliki kekuatan tinggi, ketahanan aus tinggi dan koefisien gesek tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh tekanan kompresi pada sifat fisik?
2. Bagaimana pengaruh tekanan kompresi pada sifat mekanik?
3. Bagaimana pengaruh tekanan kompresi pada kinerja tribologi?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, peneliti memberikan batasan masalah yang diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan yang telah dirumuskan sebelumnya. Terdapat beberapa poin yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu:

1. Formulasi setiap bahan pada pembuatan spesimen material gesek rem yaitu resin fenolik (40%), serbuk sekam padi (20%), serbuk Al_2O_3 (15%), serbuk Fe_2O_3 (15%) dan *hexamine* (10%).
2. Material penguat dan pengisi yang digunakan adalah sekam padi dengan diolah menjadi serbuk (penyaringan *mesh* 100).
3. Material sebagai matriks (pengikat) menggunakan resin fenolik bakelit dan sebagai *hardener* menggunakan katalis *hexamine*.
4. Material sebagai bahan aditif abrasif menggunakan serbuk Al_2O_3 dan serbuk Fe_2O_3 .
5. Teknik manufaktur yang digunakan dalam proses pembuatan spesimen uji material gesek rem dengan metode *compression molding*.
6. Tekanan kompresi yang digunakan yaitu 5 MPa, 10 MPa dan 15 MPa.
7. Pengujian yang dilakukan untuk memperoleh hasil akhir pada sifat mekanik, fisik dan kinerja tribologi di antaranya uji densitas, uji impact, uji lentur, uji tarik, uji keausan dan uji gesekan.
8. Tidak membahas proses permesinan secara mendetail pada cetakan spesimen uji.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, maka tujuan penelitian ini yaitu :

1. Mengetahui dan menganalisis hasil akhir sifat fisik dengan pengaruh tekanan kompresi pada material gesek rem berbahan resin fenolik bakelit, serbuk sekam padi, serbuk Al_2O_3 , serbuk Fe_2O_3 dan *hexamine* ($[\text{CH}_2]_6\text{N}_4$).
2. Mengetahui dan menganalisis hasil akhir sifat mekanik dengan pengaruh tekanan kompresi pada material gesek rem berbahan resin fenolik bakelit, serbuk sekam padi, serbuk Al_2O_3 , serbuk Fe_2O_3 dan *hexamine* ($[\text{CH}_2]_6\text{N}_4$).
3. Mengetahui dan menganalisis hasil akhir kinerja tribologi dengan pengaruh tekanan kompresi pada material gesek rem berbahan resin fenolik bakelit, serbuk sekam padi, serbuk Fe_2O_3 , serbuk Fe_2O_3 dan *hexamine* ($[\text{CH}_2]_6\text{N}_4$).

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini, diharapkan dapat memberikan suatu informasi, manfaat, ilmu pengetahuan dan wawasan kepada para pembaca maupun penulis. Maka dari itu, manfaat penelitian ini sebagai berikut:

- a. Bagi peneliti, mengetahui teknik manufaktur pada produksi kampas rem dengan pengaruh tekanan kompresi yang menggunakan bahan resin fenolik bakelit, serbuk sekam padi, serbuk Al_2O_3 , serbuk Fe_2O_3 dan *hexamine*.
- b. Bagi perguruan tinggi, memberikan suatu informasi dari hasil penelitian ini, serta dapat memberikan referensi bahwa limbah sekam padi dapat dijadikan material alternatif dalam komposisi kampas rem non asbes ramah lingkungan.
- c. Bagi industri, memberikan dampak positif terutama aspek inovasi material komposit dengan memanfaatkan limbah sekam padi sebagai campuran pada kampas rem yang mengurangi dampak berbahaya terhadap kesehatan maupun lingkungan, serta parameter tekanan

kompresi dapat meningkatkan kinerja material gesek rem (fisik, mekanik dan tribologi).

- d. Bagi masyarakat, sebagai wawasan ilmu pengetahuan dan pemanfaatan limbah sekam padi sebagai campuran material kampas rem, terutama pada masyarakat yang memiliki pabrik penggilingan padi agar dapat mengurangi limbah tersebut.

1.6 Sistematika Penulisan

Penelitian ini merupakan bagian sistematis penulisan laporan tugas akhir yang berjudul “PENGARUH VARIASI TEKANAN PADA PRODUKSI KOMPOSIT *FRICTION MATERIALS* KAMPAS REM TERHADAP SIFAT MEKANIK, FISIKA DAN TRIBOLOGI”. Pada laporan ini berisikan penjabaran umum secara berurutan untuk dapat mengetahui gambaran masing-masing bab beserta sub bab. Bagian ini bertujuan untuk mempermudah dalam pembahasan dari laporan tugas akhir, sehingga dapat dijadikan sebagai garis besar dari penelitian. Sistematis penulisan pada laporan tugas akhir ini sebagai berikut :

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisikan dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematis penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisikan kajian pustaka mengenai referensi yang relevan dari penelitian terdahulu dan dasar teori sebagai pendekatan secara teoritis untuk penunjang pada penelitian ini.

BAB III Metode Penelitian

Bab ini berisikan alur penelitian, pendekatan dan desain penelitian, alat dan bahan, desain cetakan spesimen, Pembuatan spesimen uji, pengujian spesimen uji dan variabel penelitian.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisikan analisis hasil dan pembahasan pada pengujian densitas, pengujian impak, pengujian tarik, pengujian lentur, pengujian koefisien gesek dan pengujian laju keausan spesifik.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Bagian ini berisikan daftar referensi sebagai acuan dalam penelitian ini.

LAMPIRAN

Bagian ini berisikan data-data dari hasil pengujian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Menurut penelitian dari Suhot, dkk., limbah pertanian dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengisi dalam polimer yang diperkuat. Penelitian ini telah membuktikan bahwa sekam padi memiliki potensi sebagai material komposit gesek rem ramah lingkungan. Tinjauan dari penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik sifat material gesek seperti uji kekuatan tarik, uji kekuatan lentur, uji kekuatan dampak, uji termal dan uji ketahanan api. Namun, penelitian tersebut tidak meninjau uji densitas dan kinerja tribologi berbahan sekam padi. Oleh karena itu, peneliti melakukan uji densitas, uji ketahanan aus dan kinerja gesekan. Hasil ini membuktikan bahwa sekam padi memiliki kandungan silika tinggi dan lignin yang rendah sehingga dapat menghasilkan sifat ketahanan aus yang baik, tahan goresan dan tahan lama. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa sekam padi memiliki potensi besar sebagai alternatif material gesek non asbes. Maka dari itu, menggunakan sekam padi sebagai bahan alam pada komposisi material gesek rem dan juga melakukan uji densitas, serta uji kinerja tribologi [9].

Menurut penelitian dari Khafidh, dkk., mengkaji metode *hand layup* (pencetakan secara manual dengan rol) untuk melihat pengaruh berbagai fraksi volume material terhadap sifat fisik, sifat mekanik dan ketahanan aus. Material yang digunakan dalam penelitian tersebut meliputi sekam padi, serbuk Al_2O_3 , serbuk Fe_2O_3 dan resin epoksi. Penelitian ini menghasilkan kekuatan tertinggi (modulus lentur dan kekerasan), tetapi laju keausan spesifik lebih besar dengan komposisi fraksi volume sekam padi (20%), serbuk Al_2O_3 (15%), serbuk Fe_2O_3 (15%) dan resin epoksi (50%). Kekurangan dari penelitian ini adalah tidak dilakukannya uji gesekan, serta ketahanan aus diperoleh tergolong rendah. Oleh karena itu, peneliti melakukan pengujian gesekan dengan menggunakan komposisi fraksi volume yang sama, namun mengganti resin epoksi dengan fenolik. Selain itu, peneliti melakukan peningkatan tekanan kompresi pada

metode *compression molding* untuk meningkatkan kekuatan dan menurunkan laju keausan spesifik [7].

Penelitian dari Fitriyana, dkk., menyatakan bahwa penambahan sekam padi dapat meningkatkan sifat mekanik serta memanfaatkan limbah pertanian sebagai alternatif bahan dasar rem. Penelitian ini memperoleh nilai tertinggi untuk massa jenis, kekuatan tarik dan kekuatan impak pada komposisi fraksi volume sekam padi (20%), serbuk Al_2O_3 (15%), serbuk Fe_2O_3 (15%) dan resin epoksi (50%). Metode produksi komposit dan jenis resin yang digunakan sama dengan penelitian sebelumnya oleh Khafidh, dkk. Proses pembakaran sekam padi dilakukan pada suhu 80°C selama 24 jam dengan ukuran partikel *mesh* 100. Karena proses pembakaran sekam padi pada penelitian ini memakan waktu yang cukup lama, peneliti berupaya mempersingkat waktu dan meningkatkan suhu pembakaran. Namun, proses tersebut tetap mampu menghasilkan kandungan silika tinggi dan tidak berbahaya. Penelitian ini tidak menampilkan data hasil pengujian modulus elastisitas dan tidak membahas hasil kinerja tribologi. Oleh karena itu, melakukan uji modulus elastisitas, uji kinerja gesekan, serta mengubah suhu dan waktu pembakaran menjadi 600°C selama 60 menit [10].

Penelitian dari Ghazali, dkk., menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pengepresan panas pada komposit kampas rem dari terak kelapa sawit dapat meningkatkan kekuatan tekan dan kekerasan, tetapi menurunkan laju keausan. Namun, densitas, volume keausan dan laju keausan belum mencapai standar minimal kampas rem asbes. Penelitian ini tidak melakukan uji sifat mekanik dan uji gesekan. Oleh karena itu, mengganti bahan terak kelapa sawit dengan sekam padi, serta menambahkan uji kekuatan mekanik dan uji gesekan dengan variasi tekanan kompresi [8].

Penelitian dari Akbulut dan Mutlu, terkait proses manufaktur otomotif bahan gesekan menunjukkan bahwa peningkatan tekanan pra-pembentukan maupun pembentukan panas dapat meningkatkan nilai koefisien gesek (CoF), densitas dan menurunkan laju keausan spesifik. Material gesek rem non asbes dalam penelitian ini menggunakan serat sintesis dan belum memanfaatkan bahan alam sebagai material alternatif. Penelitian ini tidak melakukan uji mekanik, tetapi melakukan uji keausan, uji koefisien gesek, uji densitas dan uji kekerasan.

Oleh karena itu, akan mencoba mengganti material gesek rem berbahan serat sintesis dengan sekam padi, serta menganalisis pengaruh tekanan kompresi suhu ruang dan tekanan kompresi panas. Sementara itu, untuk parameter lainnya seperti waktu (pengepresan panas, pra-pembentukan dan pengawetan) serta suhu (pengepresan panas dan pengawetan) dijaga secara konstan [11].

Penelitian dari Singh, dkk., menyajikan bahwa partikel bahan abrasif (aluminium oksida, magnesium oksida, seng oksida, besi oksida, silikon dioksida, titanium dioksida dan zirkonia) memiliki pengaruh terhadap kinerja tribologi bahan gesekan non-asbes. Dengan demikian, komposit gesekan yang dibuat dengan bahan abrasif yang berbeda dapat mempengaruhi hasil akhir kinerja gesekan. Telah terbukti bahwa berbagai jenis abrasif mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kinerja tribologi komposit. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa komposit gesek yang mengandung aluminium oksida memiliki koefisien gesek tertinggi sebesar 0,425 dan fluktuasi gesekan terkecil sebesar 0,252. Koefisien stabilitas sebesar 0,87 juga diperoleh dari komposit yang mengandung aluminium oksida. Sementara itu, komposit gesek yang mengandung besi oksida menunjukkan ketahanan aus yang lebih tinggi. Pada penelitian ini masih berfokus pada kinerja tribologi, tetapi tidak menguji sifat mekanik dan fisik. Oleh karena itu, melakukan komposisi bahan abrasif dengan fraksi volume besi oksida (15%) dan aluminium oksida (15%) sebagai bahan abrasif, serta menambahkan pengujian sifat mekanik dan fisik [12].

Penelitian dari Nandiyanto, dkk., menyatakan bahwa ukuran partikel memiliki pengaruh terhadap kinerja bantalan rem dengan matriks resin. Penelitian ini menggunakan variasi ukuran partikel sebesar 250 μm , 500 μm dan 1000 μm . Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ukuran partikel 1000 μm memberikan sifat mekanik yang baik. Ukuran partikel sekam padi mempengaruhi jarak antartpartikel, ikatan partikel dan ketahanan panas. Partikel yang berukuran lebih kecil dapat mengurangi kehilangan massa karena jumlah rongga-rongga lebih sedikit, meningkatkan koefisien gesek, memperbaiki ketahanan aus dan menghasilkan permukaan yang lebih kasar. Temuan ini diperkuat oleh Primaningtyas, dkk., yang meneliti ukuran partikel sekam padi dengan variasi *mesh* saringan 50, 80 dan 100. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sekam

padi dengan ukuran partikel 100 *mesh* memiliki karakteristik sifat mekanik yang lebih baik. Karena penelitian sebelumnya masih berfokus pada variasi ukuran partikel sekam padi. Oleh karena itu, menggunakan ukuran partikel 100 *mesh* sebagai campuran material gesek rem untuk dianalisis melalui pengaruh tekanan kompresi pemadatan [10-11].

Penelitian dari Widodo, dkk., menyatakan peningkatan temperatur cetak panas kompresi terhadap karakteristik kampas rem komposit berbahan resin epoksi (50%), sekam padi (20%), serbuk Al_2O_3 (15%) dan serbuk Fe_2O_3 (15%). Metode cetak panas kompresi tekanan 20 MPa selama 15 menit dengan variasi suhu 80°C, 100°C dan 120°C. Temuan dari penelitian tersebut mengatakan bahwa peningkatan temperatur cetak dapat meningkatkan karakteristik sifat bantalan rem, yang diperoleh hasil terbaik pada temperatur 120°C. Penelitian ini menggunakan resin epoksi sebagai matrik, di mana resin tidak tahan terhadap panas. Oleh karena itu, menggunakan resin fenolik sebagai matriks yang memiliki ketahanan panas jauh lebih baik daripada resin epoksi [15].

Penelitian dari Binda, dkk., mempelajari bantalan rem berbasis resin termosetting seperti resin fenolik yang dapat memberikan ketahanan mekanis dan ketahanan aus yang baik. Penelitian ini menggunakan komposisi serbuk batu tulis, serat kaca, resin fenolik, aluminium oksida dan grafit. Formulasi dilakukan dengan meningkatkan kandungan resin fenolik (10%, 25%, 35%) dan menurunkan serbuk batu tulis (65%, 50%, 40%). Hasil penelitian menyatakan bahwa komposit gesek pada komposit dengan resin fenolik 35% dan batu tulis 40% menghasilkan koefisien gesek yang lebih stabil dan teratur. Kandungan resin fenolik 35% memberikan hasil terbaik, tidak menutup kemungkinan penggunaan mencapai 50%. Kandungan resin fenolik yang lebih tinggi cenderung meningkatkan koefisien gesek dan menurunkan tingkat keausan. Penelitian ini menggunakan resin fenolik dengan fraksi volume 40% dan katalis *hexamine* (10%). Oleh karena itu, mengganti serat dan serbuk batu tulis dengan sekam padi sebagai bahan penguat dan pengisi material gesek dengan menggunakan resin fenolik [16].

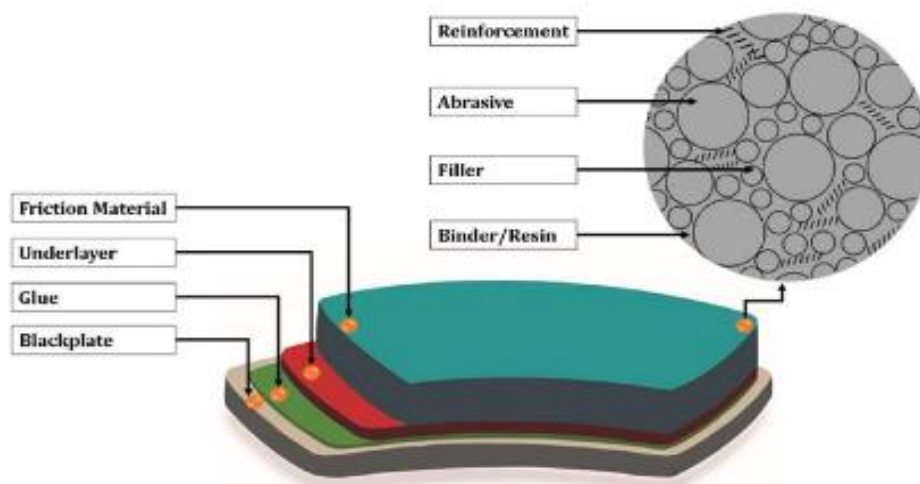
Pada penelitian-penelitian sebelumnya, belum banyak dilakukan penelitian dengan bahan fenolik yang lebih tahan terhadap panas dan

dikombinasikan dengan sekam padi. Selain itu, pengaruh tekanan pada sifat mekanik, fisik dan tribologi terhadap komposit tersebut juga belum banyak dieksplorasi. Pada penelitian ini akan dilakukan peningkatan tekanan pemadatan kompresi mulai dari 5 MPa, 10 MPa dan 15 MPa. Maka dari itu, diperoleh hasil akhir nilai densitas, kekuatan tarik, kekuatan lentur, kekuatan impak, laju keausan spesifik dan koefisien gesek dengan peningkatan tekanan pemadatan pada proses pembuatan material gesek rem.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Komposit Material Gesek Rem

Material komposit adalah kombinasi dari dua atau lebih jenis material dengan pencampuran tanpa terjadinya reaksi kimia. Pada dasarnya bahan bantalan rem masih terbuat dari serat asbes. Namun, saat ini material bantalan rem terus mengalami perkembangan yang untuk menggantikan serat asbes menjadi non asbes. Meningkatkan kualitas komposit bantalan rem ada beberapa hal yang perlu diperhatikan diantaranya sifat mekanik, gesekan material, tingkat keausan dan efektivitas material terhadap gesekan. Komposit gesekan merupakan salah satu bahan yang mempunyai tingkat mikroskopis dan tidak dapat larut dalam air. Tujuan penggunaan komposit pada material gesekan yaitu untuk mendesain dan meningkatkan sifat dari bahan dengan meninjau beberapa faktor di antaranya kekuatan, ketahanan terhadap korosi, ketahanan aus, temperatur, ketahanan termal, mendesain konduktivitas termal dan lain-lain. Material gesek rem yang bersentuhan langsung dengan roda akan menimbulkan gesekan sehingga dapat menghentikan atau memperlambat putaran roda. Material gesek rem terdiri atas beberapa komponen yaitu bahan pengikat (*binder/matriks*), penguat (*reinforcement*), pengisi (*filler*) dan abrasif (*abrasive*). Lapisan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Bagian-bagian lapisan material gesekan pada bantalan rem [17].

Bahan pengikat adalah bahan yang menggabungkan semua komponen material, di mana bahan ini harus memiliki koefisien gesek yang stabil dan tinggi, tahan terhadap temperatur tinggi dan perubahan temperatur yang cepat, serta ringan. Penguat adalah bahan berserat atau serbuk yang ditambahkan ke pengikat untuk meningkatkan sifat mekanik. Ketahanan material gesek rem sangat ditentukan oleh jenis bahan penguat yang digunakan. Pengisi digunakan untuk mengisi celah antara komponen bantalan rem. Bahan abrasif digunakan untuk mengubah koefisien gesekan. Material gesek rem dalam penerapan pengereman harus memenuhi standar keamanan, daya tahan dan kemampuan dalam pengereman.

Terdapat beberapa parameter sebagai acuan standar yang perlu dikaji seiring dengan perkembangan ilmu material gesekan komposit, khususnya pada material gesek rem ramah lingkungan. Standar ini dapat digunakan sebagai referensi untuk mempermudah dalam mendesain karakteristik material bantalan rem, seperti sifat mekanik, fisik dan kinerja tribologi. Hal ini dapat ditunjukkan pada Tabel 2.1, yang memuat standar internasional material bantalan rem yang telah disepakati secara global, sementara itu, Tabel 2.2 menunjukkan standar material bantalan rem kereta api di PT. KAI (Kereta Api Indonesia).

Tabel 2.1. Standar material gesek sesuai SAE J661-1997 [18].

Parameter	Nilai standar
Nilai kekerasan (Rockwell)	68 – 105 kgf/mm ²

Keausan spesifik	$5 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{kg}$
Massa Jenis (Densitas)	$1,5 - 2,4 \text{ g/cm}^2$
Ketahanan panas	360°C (untuk pemakaian terus menerus sampai dengan 250°C)
Konduktivitas Termal	$0,12 - 2,8 \text{ W/m.K}$
Koefisien Gesek	$0,14 - 0,27$
Tekanan Spesifik	$0,17 - 0,98 \text{ Joule /g.}^\circ\text{C}$
Kekuatan Geser	$1.300 - 3.500 \text{ N/cm}^2$
Kekuatan Per patahan	$480 - 1.500 \text{ N/cm}^2$

Tabel 2.2. Spesifikasi teknik material gesekan rem komposit PT.KAI [19].

Parameter	Nilai standar
Berat jenis (densitas)	$1,8 - 2,4 \text{ g/cm}^2$
Koefisien gesek	$0,14 - 0,22$
Kekerasan (HRR)	70 – 105
Kekuatan tekan	Min. 2.500 N/cm^2
Kekuatan Bending/Modulus of Rupture,(MOR)	$24.00 - 4.000 \text{ N/cm}^2$
Kekuatan geser	$1.500 - 3.500 \text{ N/cm}^2$
Modulus Young/Modulus of Elastisitas (MOE)	$24.000 - 150.000 \text{ N/cm}^2$
Konduktivitas termal	Min. $0,8 \text{ W/m.K}$

Ketahanan panas operasional	250°C (Tidak meleleh dan tidak terbakar untuk pemakaian terus menerus) ≥500°C (dapat terbakar, tetapi tidak menimbulkan nyala api)
-----------------------------	---

2.2.2 Kriteria Material Gesek Rem

Langkah ini sangat penting dalam mendesain material gesek rem. Kondisi pengereman pada transportasi kendaraan sangat bergantung pada gesekan antara material gesek rem dan rotor. Hubungan ini direpresentasikan oleh koefisien gesek berfungsi untuk memperlambat laju kendaraan. Dalam mendesain material bantalan rem, terdapat beberapa persyaratan yang harus dipenuhi yaitu :

1. Koefisien harus stabil pada berbagai rentang suhu, kecepatan kendaraan, beban atau tekanan pedal, kelembaban relatif dan parameter lainnya.
2. Material gesek rem harus memiliki kinerja yang tinggi dalam sistem pengereman, dengan ketahanan yang baik dan tingkat keausan gesekan yang rendah.
3. Kebisingan dan getaran harus seminimal mungkin untuk menjaga kenyamanan pengguna.
4. Konduktivitas termal harus rendah.
5. Kekuatan dan daya tahan harus tinggi.
6. Material digunakan harus ekonomis, ramah lingkungan dan memiliki gaya gesekan, serta kekuatan geser yang sangat baik.
7. Material harus memiliki ketahanan lingkungan yang baik terhadap debu, tekanan dan kelembaban.

2.2.3 Komposisi Material Gesek

Material gesek memiliki banyak jenis yang bervariasi tergantung pada kegunaannya, sehingga menghasilkan perbedaan signifikan dalam komposisi. Formulasi material gesek sangat mempengaruhi kinerja tribologi, sifat mekanik dan sifat fisik. Komposisi suatu formulasi dapat mempengaruhi kinerja material,

tergantung pada teknik manufaktur yang digunakan. Oleh karena itu, proses produksi harus dilakukan secara konsisten untuk mempertahankan atau meningkatkan sifat material gesek komposit. Penelitian ini menggunakan beberapa komposisi sebagai material gesek rem, sebagaimana dijelaskan sebagai berikut :

2.2.3.1 Resin fenolik

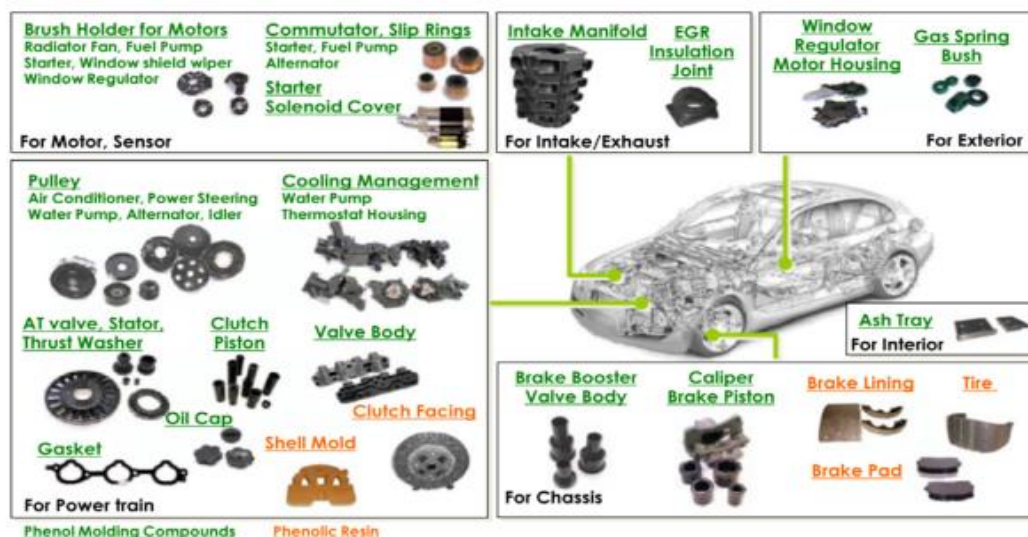
Resin fenolik merupakan salah satu jenis polimer termosetting yang diterapkan pada material komposit sebagai matriks (pengikat). Tujuan penggunaan resin fenolik sebagai pengikat adalah untuk menjaga material gesek agar tetap stabil di bawah kondisi mekanis, termal dan tekanan. Resin fenolik memiliki ketahanan temperatur yang cukup tinggi untuk mencegah rem memudar atau kegagalan bantalan rem parah. Jenis resin fenolik terbagai menjadi dua tipe, yaitu *resole* dan *novolac*. Produksi material yang menggunakan resin *resole* tidak memerlukan bahan tambahan untuk proses mengawetkan akhir sedangkan resin *novolac* harus menggunakan bahan tambahan berupa katalis *hexamethylene tetramine* (HMTA) ($[\text{CH}_2]_6\text{N}_4$) untuk proses mengawetkan dalam kondisi pemanasan sekitar 120°C - 180°C . Persentase penambahan katalis HMTA dalam komposit sekitar 7% - 15% untuk memperoleh ikatan silang sempurna dalam kondisi pemanasan bahan di dalam cetakan. Proses pengawetan produk yang menggunakan bahan ini sebagai matriks membutuhkan suhu yang tinggi. *Hexamine* ditambahkan pada material komposit sebagai agen pengeras dan memiliki densitas sebesar $1,33 \text{ g/cm}^3$. karakteristik sifat resin fenolik ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Karakteristik sifat mekanik, termal dan fisik resin fenolik [20].

Sifat resin	Resole	novolac
Kekuatan tarik (MPa)	35 – 62	48 – 55
Modulus tarik (GPa)	2,7	2,8
Kekuatan lentur (MPa)	76 – 120	76 – 97
Kekuatan tekan (MPa)	80 – 100	68 – 206

Kekuatan impak (J/m ²)	13 – 21	11 – 19
Temperatur pengawetan (°C)	130 – 200	120 – 180
Temperatur maksimum (°C)	150	200
Temperatur transisi <i>glass</i> (°C)	100 – 150	100 – 200
TGA onset (°C)	100 – 110	300 – 360
Pengawetan penyusutan (%)	-	0,002
Penyerapan air (24 jam) (%)	0,2 – 0,4	0,1– 0,2
Viskositas (Pa.s)	100 – 1000	0,5 – 0,6
Densitas (g/cm ³)	1,23 – 1,32	1,25 – 1,3

Resin fenolik memiliki kinerja yang lebih baik saat terbakar dibandingkan dengan resin epoksi, karena kemampuan terbakarnya yang lama dan pelepasan panas yang rendah. Komposit dengan matriks resin fenolik memiliki keunggulan yang lebih baik sehingga layak digunakan di industri manufaktur komponen material gesekan [21]. Penerapan resin fenolik sebagai pengikat sangat populer dalam pengembangan industri otomotif, kendaraan rel dan mesin industri. Penerapan tersebut banyak ditemukan pada material gesekan seperti bantalan, lapisan kopling dan beberapa produk lainnya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Aplikasi komponen otomotif dari resin fenolik [20].

Resin fenolik memiliki peran penting pengikat bantalan rem karena menawarkan ketahanan hingga termal 200°C, serta memiliki sifat mekanik, termal dan tribologi yang sangat baik. Pemilihan jumlah fraksi volume resin fenolik dalam komposisi bantalan rem sebagai pengikat menjadi aspek penting untuk menjaga keutuhan struktur dengan material lain pada berbagai suhu. Hal ini memungkinkan bantalan rem mampu menahan tekanan mekanis dan termal selama pengoperasian pengereman, serta berkontribusi pada kinerja gesekan. Dalam komposit berbasis polimer, fenolik berperan sebagai pengikat atau matriks yang mengikat semua komponen secara bersama-sama, termasuk bahan seperti serat, pengisi, abrasif dan pelumas [22]. Selain itu, resin ini dapat mengurangi tekanan termal selama pengereman, serta dapat mengendalikan kebisingan dan getaran.

Resin fenolik akan mempengaruhi stabilitas termal bantalan rem, kemampuan mempertahankan sifat mekanis dan kemampuan mengikat material lainnya selama pengereman agar tidak hancur. Resin fenolik memiliki kepadatan rendah, kekuatan ikatan tinggi dengan pengisi, kinerja lingkungan yang baik dan keandalan tinggi dalam kondisi ekstrem. Jumlah resin yang terlalu sedikit dapat mengakibatkan penurunan daya tahan material, sementara jumlah resin yang berlebihan dapat menurunkan koefisien gesekan pada suhu tinggi dan secara signifikan meningkatkan kekerasan. Dalam pembuatan material gesekan, kandungan resin sebagai pengikat memiliki korelasi dengan tekanan cetak, waktu dan suhu [23].

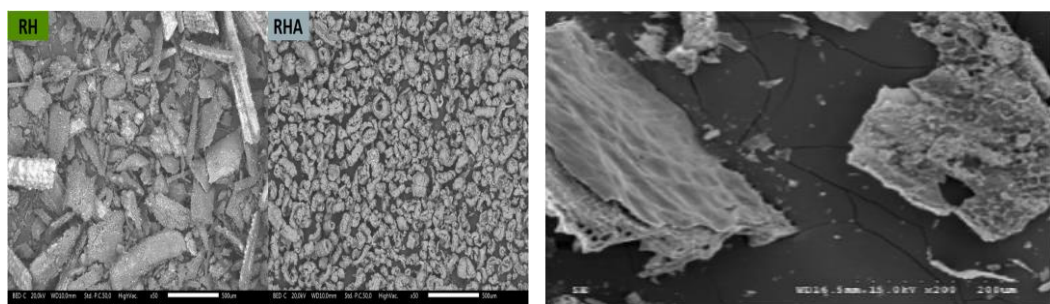
2.2.3.2 Sekam Padi (*Rice Husk*)

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan komposit. Sekam padi memiliki keunggulan seperti tahan rayap, ringan, tahan panas, tahan air dan sulit terbakar dibandingkan kayu. Oleh karena itu, sekam padi yang telah berbentuk serbuk dapat dijadikan sebagai pengisi atau penguat dalam komposit material gesekan [24]. Sekam padi memiliki nilai densitas 0,9 – 1,01 g/cm³.



Gambar 2.3. (a) Tanaman padi dan (b) sekam padi [25].

Tanaman padi beserta limbahnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. merupakan hasil dari limbah pertanian. Limbah ini kemudian digiling untuk memisahkan antara kulit dan biji. Sekam padi yang melalui proses pembakaran akan menjadi abu yang dikenal sebagai *Rice husk Ash* (RHA) yang memiliki kandungan silika lebih tinggi [26]. Silika dalam sekam padi dapat diperoleh dalam jumlah besar melalui metode pembakaran. RHA mengandung silika amorf sekitar 85% - 90% setelah proses pembakaran di dalam lingkungan yang cukup teroksidasi pada suhu dan durasi terkontrol. Sekam padi maupun abu sekam padi dapat digunakan dalam sektor bahan gesekan kendaraan karena memiliki kandungan silika, khususnya abu sekam padi yang mengandung silika amorf yang dikenal memiliki sifat keras. Sekam padi memiliki kandungan silika yang tinggi dan lignin yang rendah, sehingga cocok digunakan sebagai bahan gesekan, karena mudah menyerap air dan meningkatkan sifat mekanik. Silika sendiri merupakan bahan abrasif sehingga dapat mempengaruhi sifat tribologi bantalan rem [27]. Menurut penelitian oleh Tong, dkk., menunjukkan bahwa abu sekam padi yang dihasilkan proses pembakaran pada temperatur 600°C mengandung silika amorf lebih tinggi dari 90%. Struktur abu sekam pada pembakaran suhu 600°C dapat ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Mikrograf SEM abu sekam padi (RHA) suhu 600°C [27-28].

Ukuran partikel dan struktur pori serbuk sekam padi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja material gesek rem. Partikel sekam padi yang berukuran lebih kecil berpotensi meningkatkan stabilitas gesekan, sedangkan struktur porinya berperan dalam memenuhi distribusi panas selama pengereman. Partikel serbuk sekam padi yang berukuran lebih kecil menunjukkan kinerja yang baik sebagai bahan pengisi pada persentase komposisi yang lebih tinggi. Peningkatan persentase serbuk sekam padi dapat memberikan hasil yang signifikan terhadap sifat kekerasan dan ketahanan benturan.

2.2.3.3 Aluminium Oksida

Aluminium oksida (alumina) adalah senyawa kimia dari unsur aluminium dan oksigen dengan rumus kimia (Al_2O_3). Alumina adalah oksidasi tahan api dengan biaya rendah, kekerasan yang unggul dan ketahanan terhadap oksidasi, serta ketahanan korosi yang tinggi pada kondisi temperatur tinggi. Aluminium oksida memiliki sifat mekanik yang baik seperti kekerasan yang tinggi tapi getas, tahan terhadap aus, kekuatan, kekakuan tinggi dan konduktivitas termal baik. Penambahan senyawa ini dapat memberikan ketahanan terhadap kekuatan impak, ketahanan bahan kimia dan ketahanan abrasi yang baik. Karakteristik aluminium oksida meliputi titik didik (2.980°C), titik leleh (2.040°C), densitas ($3,94 \text{ g/cm}^3$) dan berat molekul ($101,96 \text{ g/mol}$).

Peningkatan sifat mekanik pada produk, terutama yang mengandung alumina, dapat dicapai dengan memperkecil ukuran partikel dan meningkatkan kemurniannya. Hal ini telah diselidiki oleh penelitian Tomasek, dkk., yang menunjukkan bahwa penambahan aluminium oksida dapat meningkatkan koefisien gesek dan memperbaiki kinerja keausan dengan komposisi material percobaan yaitu (0, 3,4, 5,6, 9,0 dan 14,6 vol%) [29]. Aluminium oksida memiliki kemampuan membentuk pelapis pelindung yang dapat mengurangi keausan dan peningkatan gesekan. Serbuk aluminium oksida sangat cocok digunakan pada aplikasi suhu tinggi. Senyawa ini dapat dijadikan sebagai bahan alternatif dalam pembuatan material gesek seperti kampas rem, karena memiliki durabilitas tinggi dan tidak larut dalam air. Sifat ini dapat memungkinkan penggunaannya di tempat berair, udara, suhu dan unsur kimia lainnya.

2.2.3.4 Besi Oksida

Besi merupakan logam transisi yang paling umum digunakan karena sifatnya yang relatif universal dan mudah diolah. Besi murni tidak terlalu kuat, namun jika dipadukan dengan logam lain atau karbon, akan menghasilkan baja yang sangat kuat. Besi oksida adalah senyawa yang terdiri dari besi dan oksigen. Besi oksida digunakan sebagai pelapis pelindung terhadap korosi. Serbuk senyawa tersebut berwarna hitam. Partikel besi oksida berfungsi mengubah karakteristik gesekan, meningkatkan koefisien gesekan, serta membantu membersihkan cakram [30]. Karakteristik senyawa besi oksida meliputi titik didih (3.414°C), titik leleh (1.565°C), densitas ($5,25 \text{ g/cm}^3$) dan berat molekul ($159,69 \text{ g/mol}$). Bahan ini adalah salah satu bagian dari formulasi material gesekan yang akan dihomogenkan dengan komposisi lain yang berbentuk serbuk.

Oksidasi besi menjadi komponen utama dalam lapisan gesekan. Lapisan ini sangat penting karena menjadi sumber utama gesekan yang memungkinkan bantalan rem berfungsi dengan baik. Bahan tersebut berfungsi sebagai abrasif yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekasaran permukaan, sehingga meningkatkan ketahanan keausan material komposit gesekan. Besi oksida merupakan material yang baik karena tidak beracun, berlimpah, memiliki biaya produksi yang murah dan mudah diproduksi. Oksidasi besi dalam aplikasi bantalan rem berguna untuk meningkatkan ketahanan terhadap *fade* (kerugian gesek). Istilah *fade* mengacu pada penurunan efektivitas pengereman akibat peningkatan temperatur (khususnya pada suhu $>200^{\circ}\text{C}$), yang disebabkan oleh degradasi koefisien gesek kinetik. Bantalan rem yang menggunakan material besi oksida dapat menurunkan suhu pengoperasian.

2.2.4 Tribologi

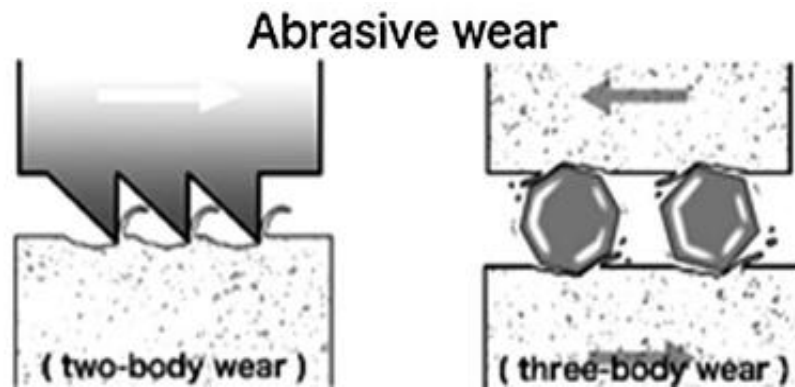
Tribologi adalah ilmu yang mempelajari interaksi permukaan dalam pergerakan relatif seperti gesekan (*friction*), pelumasan (*lubrication*) dan aus (*wear*) [31]. Mengetahui karakteristik fenomena pada material gesek rem yang telah diproduksi, perlu dilakukan analisis perlakuan melalui uji tribometer saat diberikan pembebanan. Koefisien gesekan suatu material bergantung pada permukaan atau kombinasi material, penyusunan permukaan material dan kondisi

pengoperasian. Parameter tribologi meliputi kekasaran permukaan, mekanisme adhesi, gesekan, keausan, serta interaksi fisik dan kimia pelumas. Peningkatan aplikasi material polimer, khususnya pada komposit gesekan rem, memerlukan pemahaman tentang sifat tribologi. Gesekan dan mekanisme keausan merupakan aspek penting dalam performa material gesek rem. Gesekan dan keausan adalah fenomena kompleks yang bergantung pada komposisi material, proses produksi, struktur mikro, sifat mekanik dan fisik dan lingkungan serta perubahan suhu.

2.2.4.1 Keausan (*Wear*)

Keausan adalah berkurangnya ketebalan permukaan akibat gesekan yang terjadi selama pembebanan dan pergerakan. Keausan yang terjadi pada bantalan rem diakibatkan oleh gesekan, panas yang dihasilkan dan tekanan selama pengereman. Fenomena ini bukanlah sifat material, melainkan respons dari sistem yang akan diterima oleh material gesek rem. Laju keausan bahan gesek bergantung pada tingkat gesekan, porositas, ketahanan panas, kekuatan mekanis resin pengikat dan temperatur permukaan bantalan. Keausan adalah salah satu penyebab utama keterbatasan masa pakai bahan bantalan rem. Kondisi pengoperasian dapat mempengaruhi keausan antarmuka akibat gesekan antara bantalan rem dan cakram rem. Tingkat keausan meningkat dengan cepat dalam material gesek rem pada temperatur tinggi, tekanan pengereman dan kecepatan awal [32].

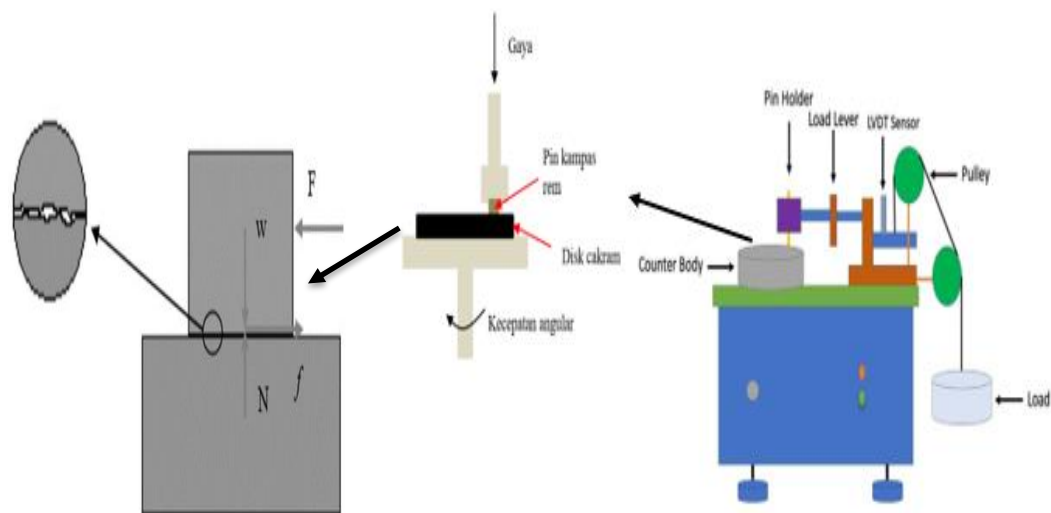
Kemampuan mengenali keausan pada bantalan rem sangat penting untuk membantu menentukan penyebab terjadinya fenomena tersebut. Selain itu, hal ini berguna sebagai dasar evaluasi untuk perbaikan ke depannya agar lebih akurat dan dapat meningkatkan masa pakai, sehingga menghemat biaya pembelian kampas rem. Gambar 2.5 menunjukkan jenis keausan yang sering terjadi pada bantalan rem salah satunya adalah keausan abrasif (*Abrasive wear*). Keausan ini terjadi ketika dua permukaan bersentuhan dalam kontak geser, sehingga menyebabkan goresan, pengikisan dan pelepasan sebagian partikel material bantalan rem. Hal ini menyebabkan perpindahan material dari satu permukaan ke permukaan lainnya.



Gambar 2.5. Mekanisme keausan abrasif [33].

2.2.4.2 Gesekan (*Friction*)

Gesekan (*friction*) merupakan bentuk hilangnya energi yang terjadi antara dua permukaan yang saling bersentuhan dan bergerak relatif. Gesekan ini dinyatakan sebagai gaya yang berlawanan sehingga adanya koefisien gesek (μ). Gambar 2.6 menunjukkan mekanisme gesekan. Gesekan yang terjadi antara dua permukaan benda yang saling bersentuhan akan menimbulkan gaya gesek. Besarnya gaya ini dapat dihitung menggunakan nilai koefisien gesek melalui persamaan 2.1 sebagai berikut:



Gambar 2.6. Mekanisme gesekan [34-35].

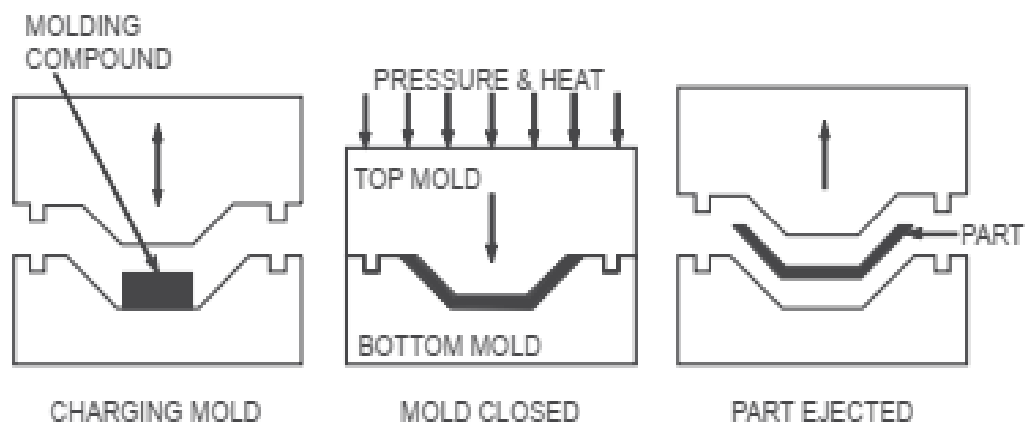
$$\mu = \frac{f_k}{N} \quad (2.1)$$

Simbol (μ) menunjukkan koefisien gesek (cof), (f_k) adalah gaya gesek (N) dan N adalah beban normal (N) . Ada beberapa faktor yang mempengaruhi

koefisien gesekan yaitu jenis material, kekasaran permukaan, temperatur dan kelembaban. Oleh karena itu, koefisien gesek bergantung pada dua faktor yaitu tingkat kekasaran dan gaya normal yang bekerja pada benda. Sistem kerja material gesek rem dilakukan dengan cara menekan dan menggesek permukaan cakram rem. Fenomena ini termasuk dalam gaya gesek sliding, yaitu gaya gesek yang terjadi ketika dua permukaan saling bergeser. Gesekan yang terjadi antara benda padat pasti menimbulkan dampak terhadap lingkungan sekitar.

2.2.5 *Compression Molding* (Cetakan Kompresi)

Compression molding adalah salah satu teknik produksi manufaktur pembuatan material komposit dengan metode cetakan tertutup. Metode ini memungkinkan dapat mengendalikan suhu, tekanan dan waktu untuk menghasilkan produk yang diinginkan. Prinsip kerja proses ini adalah memberikan pemanas dan tekanan secara bersamaan dalam arah vertikal pada dua bagian cetakan (atas dan bawah) menggunakan mesin hidrolik. Proses pencetakan kompresi digunakan dalam pembuatan komposit yang berbahan dasar resin termoset. Gambar 2.7 menunjukkan proses cetakan kompresi dalam pembuatan material gesekan yaitu dengan memadukan semua material dan resin secara homogen, lalu memasukkannya ke dalam cetakan. Setelah itu, cetakan ditutup dan diawetkan di bawah temperatur serta tekanan tertentu.



Gambar 2.7. Metode *compression molding* [35].

Proses ini dapat menyebabkan perubahan kimia yang mengakibatkan pengerasan material sesuai bentuk cetakan. Proses pembuatan material gesekan

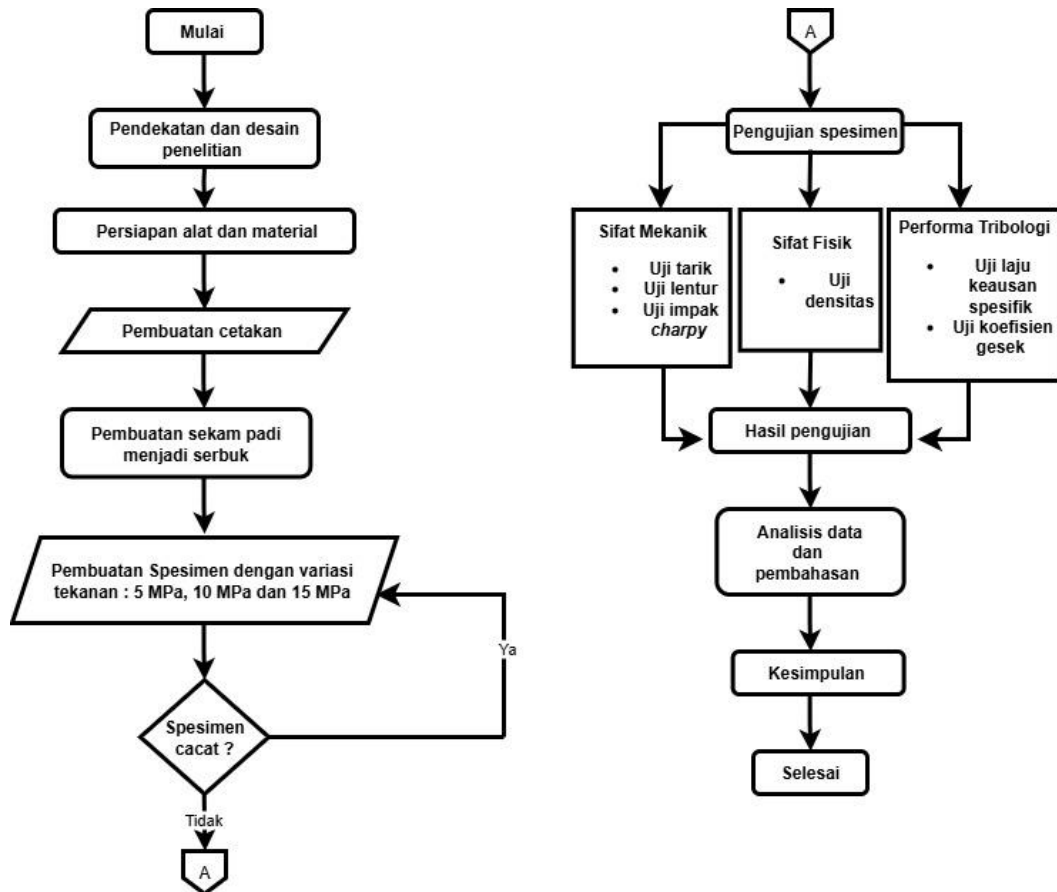
dengan teknik manufaktur *compression moulding* akan menghasilkan sifat mekanik yang baik. Teknik ini dapat mendistribusikan resin secara lebih optimal dan efisien. Pencetakan kompresi merupakan salah satu metode yang efektif dan efisien dalam memproduksi material gesek rem yang berkualitas. Proses tersebut melibatkan pemanasan serta penekanan material gesek di dalam cetakan sehingga menghasilkan material gesek rem yang padat, tahan lama dan sesuai dengan kebutuhan performa pengereman.

Penelitian dari Gai, dkk., menyatakan bahwa parameter seperti tekanan cetakan, suhu perlakuan panas dan waktu perlakuan panas harus diamati dalam proses produksi material gesek berbahan serbuk, karena mempengaruhi sifat material [36]. Proses pembuatan material gesek rem melibatkan beberapa jenis material yang digunakan secara gabungan. Sebelum material dimasukkan ke dalam cetakan, dilakukan teknik pencampuran (*blending* atau *mixing*) untuk memastikan bahwa penguat dan matriks tercampur secara homogen. Proses produksi material gesek rem terdiri dari serbuk atau partikel yang terdistribusi merata dalam matriks, yang berfungsi sebagai pengikat sehingga dapat memberikan bentuk padatan yang baik. Semakin tinggi tekanan dalam proses kompresi, maka porositas antarpartikel semakin sedikit dan sifat mekanik yang dihasilkan meningkat [37]. Tekanan pemadatan yang semakin tinggi pada material gesek rem berbahan partikel atau serbuk akan meningkatkan densitas hingga kondisi optimum. Proses kompresi merupakan salah satu bagian terpenting dalam pembuatan material gesekan rem, karena dapat memastikan kepadatan material gesekan dan keausan sesuai yang diinginkan.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian



Gambar 3.1. Diagram alur penelitian.

3.2 Pendekatan Dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental. Metode eksperimental adalah suatu pendekatan penelitian yang bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh suatu perlakuan terhadap perlakuan lainnya dalam kondisi terkontrol. Dalam penelitian ini, metode tersebut menggunakan pendekatan kuantitatif. Pendekatan ini diterapkan untuk menjelaskan dan menguji hubungan antara variabel, menentukan sebab-akibat, menguji teori yang bertujuan untuk memprediksi suatu gejala. Penelitian kuantitatif ini dapat dijadikan landasan yang kuat untuk memahami fenomena yang dapat diukur

secara angka dan analisis data statistik. Peneliti melakukan proses pembuatan spesimen uji material gesek rem dalam skala laboratorium dengan variasi tekanan kompresi cetak menggunakan metode *compression molding*. Spesimen uji yang telah dibuat, kemudian diuji untuk mengetahui karakteristik akhir material gesek meliputi sifat mekanik, fisik dan kinerja tribologi.

3.3 Material dan Alat

1. Material

Tabel 3.1. Bahan pembuatan spesimen uji material gesek.

Gambar dan nama	Kegunaan	Gambar dan nama	Kegunaan
 Sekam padi	Serbuk campuran dari bahan alam	 Resin fenolik	Bahan pengikat
 Serbuk Fe_2O_3	Bahan aditif gesekan	 Serbuk Al_2O_3	Bahan aditif gesekan
 WD-40 PTFE	Bahan pelumas pada cetakan agar spesimen tidak lengket	 Hexamin	Bahan tambahan dari resin tipe novolak

2. Alat

Tabel 3.2. Alat pembuatan spesimen uji material gesek dan cetakan.

Gambar dan nama	Kegunaan	Gambar dan nama	Kegunaan
 Saringan 100 mesh	Untuk pemisahan ukuran partikel yang diinginkan	 Mesin bor makita	Sebagai alat <i>mixer</i> pada proses pencampuran semua formulasi
 Mesin grinder	Sebagai alat untuk menghaluskan sekam padi dan fenolik	 Mesin <i>furnace</i>	Sebagai tempat proses pembakaran sekam padi
 Oven elektrik	Untuk pengawetan spesimen uji	 Sarung tangan las	sebagai pengaman saat memindahkan cetakan panas
 Wadah <i>stainless</i>	Sebagai wadah sekam padi pada proses pembakaran	 Wadah plastik	Sebagai wadah campuran komposisi
 Obeng minus	Untuk melepaskan bagian cetakan	 Cetakan	Pembuatan spesimen uji berdasarkan standar yang ditentukan

 <p>Mesin hotpress</p>	<p>Untuk pemadatan spesimen uji</p>	 <p>Kayu</p>	<p>Sebagai alat bantu pelepasan dan pembentukan spesimen di cetakan</p>
 <p>Mesin CNC milling</p>	<p>Sebagai proses permesinan cetakan spesimen yang berbahan aluminium</p>	 <p>Mesin frais</p>	<p>Sebagai pengurangan dan perataan permukaan cetakan sebelum proses CNC</p>
 <p>Bandsaw</p>	<p>Sebagai alat pemotong material yang memiliki dimensi lebih</p>	 <p>Kuas</p>	<p>Untuk membersihkan sisa partikel yang menempel pada cetakan</p>

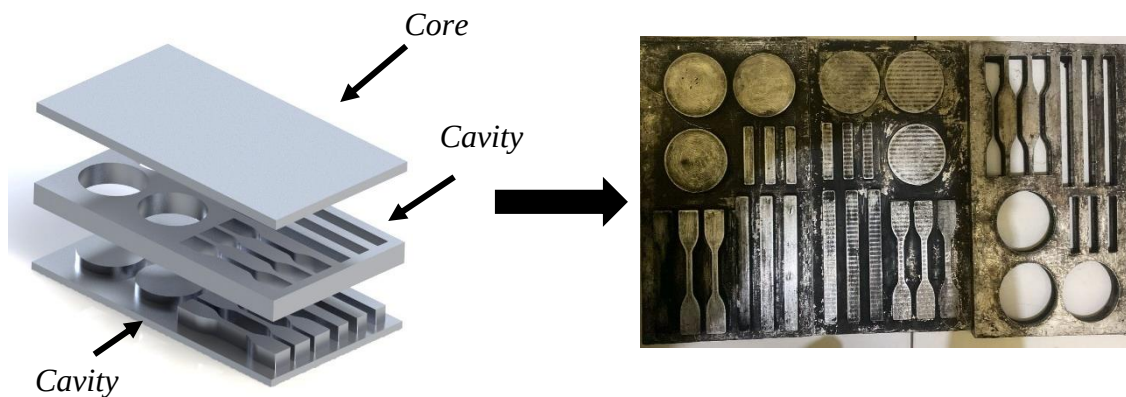
3.4 Desain Cetakan Spesimen

Desain dan simulasi cetakan spesimen dirancang menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* dan *Autodesk Fusion* sebelum masuk tahapan permesinan. Spesimen didesain sesuai dengan standar ASTM (*American Society Testing Materials*) untuk polimer material komposit. Terkait kode standar yang digunakan dapat ditunjukkan pada Tabel 3.3.

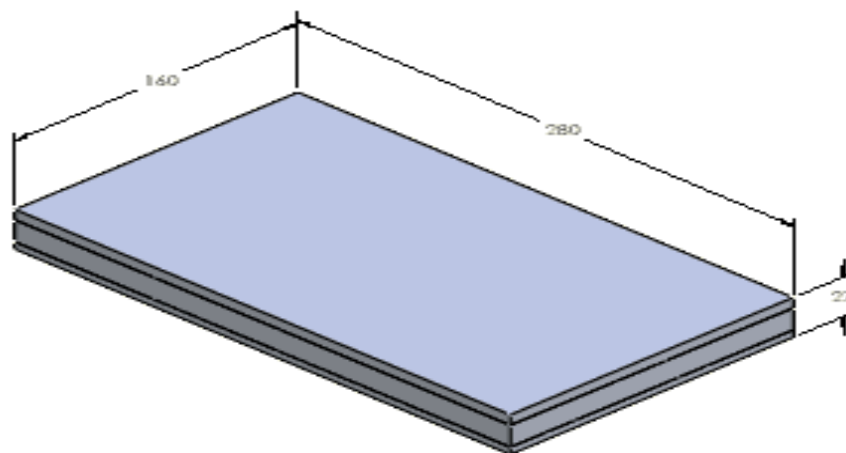
Tabel 3.3. Standar uji spesimen.

Uji Spesimen	Standar
Uji Densitas	ASTM D792
Uji Kekuatan Tarik	ASTM D638 Type-IV
Uji kekuatan Impak	ASTM E23
Uji Kekuatan Lentur	ASTM D790
Uji keausan	ASTM G99

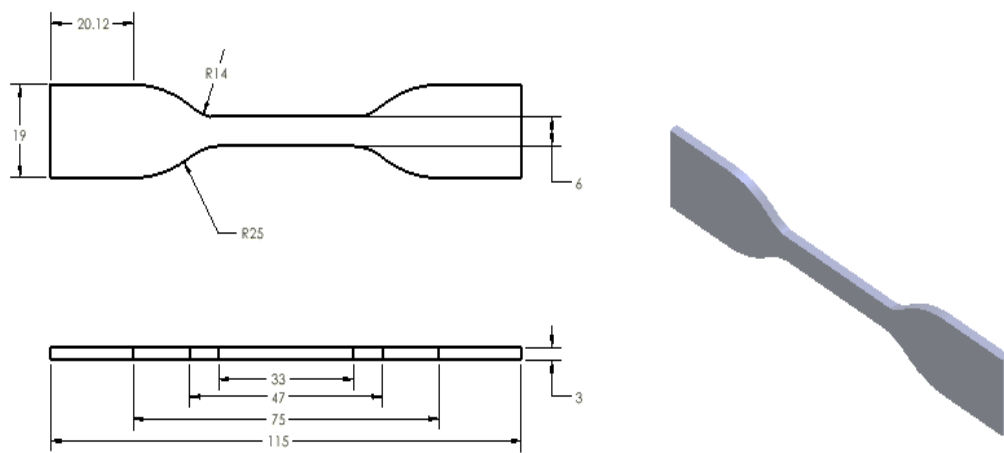
Gambar 3.2 sampai 3.7 menunjukkan dimensi desain cetakan spesimen dan dimensi spesimen uji untuk setiap pengujian mekanik, fisik dan tribologi



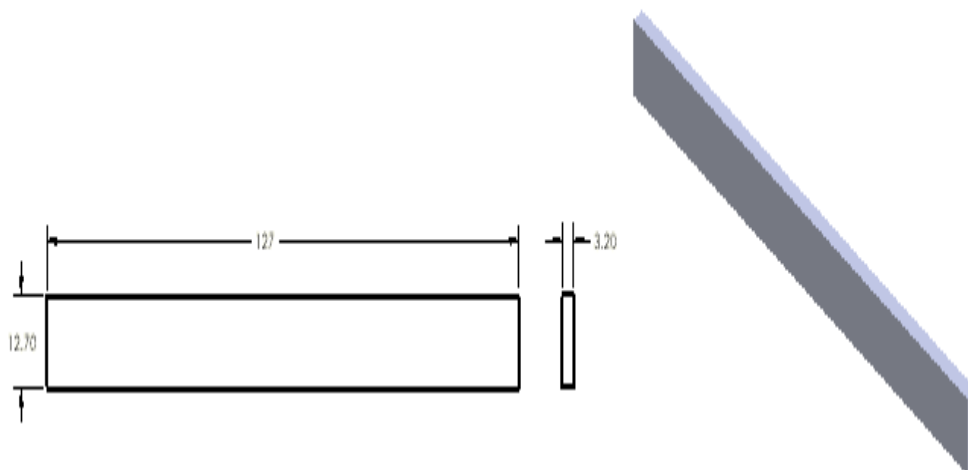
Gambar 3.2. Cetakan spesimen uji.



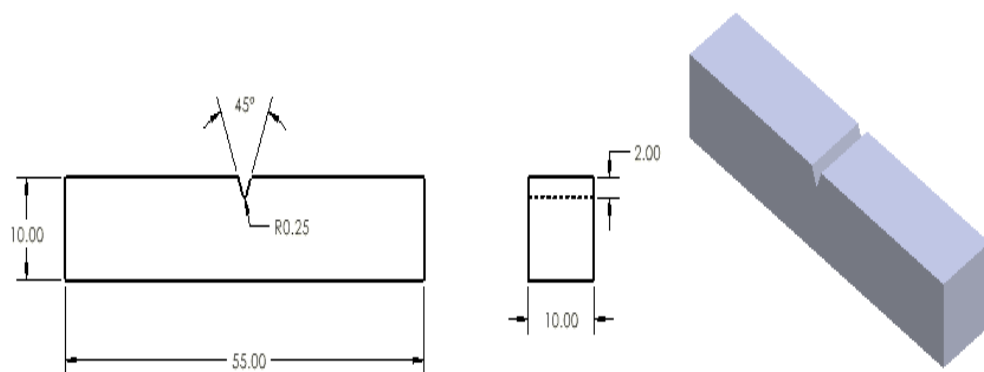
Gambar 3.3. Dimensi cetakan.



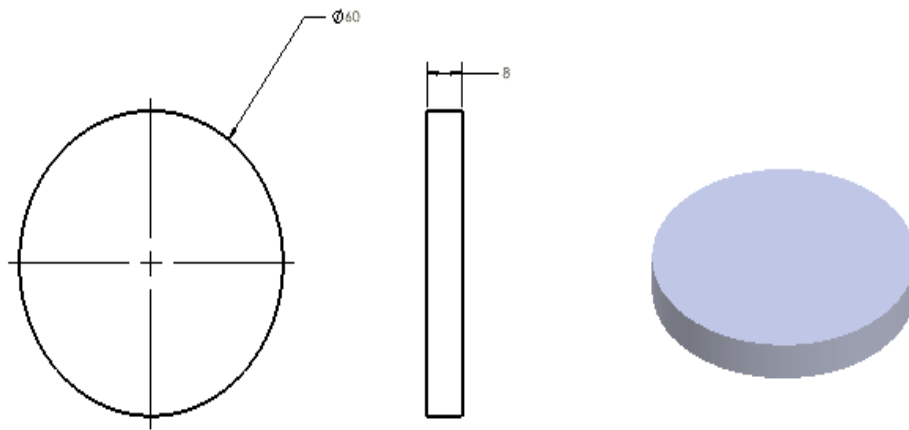
Gambar 3.4. Dimensi uji kekuatan tarik.



Gambar 3.5. Dimensi uji kekuatan lentur.



Gambar 3.6. Dimensi uji kekuatan impak.



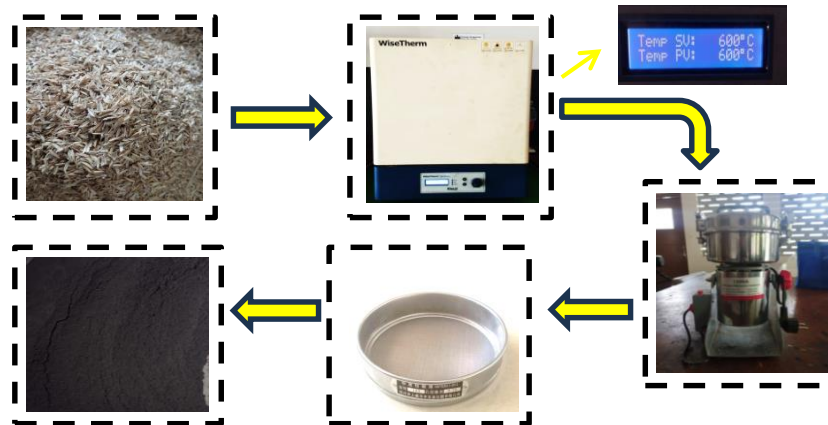
Gambar 3.7. Dimensi uji keausan *pin on disc*.

Proses permesinan dilakukan oleh peneliti di Lab. Proses produksi dan Pusat Studi Kreativitas dan Inovasi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia (UII). Desain cetakan pada masing-masing spesimen dibuat berdasarkan standar uji yang diinginkan. Cetakan spesimen uji dibuat dari material aluminium dan dilakukan proses permesinan. Tahapan tersebut dapat dilihat pada bagian bawah ini sebagai berikut :

1. Mendesain cetakan berbentuk spesimen uji yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 sampai 3.7 dan dimensi cetakan ditunjukkan pada Gambar 3.3. menggunakan perangkat lunak *SolidWorks 2023*.
2. Simulasikan proses permesinan CNC (*Computer Numerical Control*) pada desain cetakan yang telah dibuat dengan menggunakan perangkat lunak *Autodesk fusion*.
3. Merapikan dan mengurangi dimensi material aluminium menggunakan mesin frais.
4. Memutar *push button* searah jarum jam untuk menyalakan monitor.
5. Memasang material aluminium diragum mesin CNC. Setelah itu, mengukur kesejajaran benda kerja menggunakan *waterpass*.
6. Memasang dan mengganti mata pahat setiap pergantian strategi permesinan yang menggunakan flat *endmill* berdiameter 6 mm, 4 mm dan 3 mm.
7. Mengatur posisi mata pahat mulai dari sumbu x, y dan z pada benda kerja
8. Mengatur kecepatan *spindel* dan *feedrate*. Setelah itu, menyalakan *coolent* sebelum proses permesinan berlangsung.

9. Menyalakan tombol *on* pada mesin CNC. Setelah selesai proses permesinan, lalu tekan tombol *push button* untuk mematikan mesin CNC.

3.5 Metode Penyerbukan Sekam Padi



Gambar 3.8. Skematik penyerbukan sekam padi.

Proses pembakaran sekam padi dilakukan oleh peneliti di Laboratorium Proses Produksi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia (UII).

1. Pembakaran/karbonisasi sekam padi

Proses pembakaran sekam padi dilakukan dengan memasukkan wadah yang berisi sekam padi ke dalam mesin *furnice* pada temperatur 600°C selama 60 menit. Proses ini dapat ditunjukkan pada Gambar 3.8. Tujuan pembakaran ini adalah untuk menghilangkan kadar air pada sekam padi, serta mengubah sekam padi menjadi hitam yang dapat menghasilkan kandungan silika amorf yang lebih tinggi.

2. Penggilingan sekam padi

Proses penggilingan dilakukan dengan memasukkan sekam padi yang telah dikarbonisasikan di dalam mesin *furnace* ke dalam alat penepung (*Crusher*). Tahapan ini bertujuan untuk menghasilkan serbuk sekam padi dengan ukuran partikel yang tidak diketahui.

3. Penyaringan/pengayakan sekam padi

Pengayakan merupakan salah satu proses pemisahan partikel dengan mengelompokkan butiran-butiran berdasarkan perbedaan ukuran menggunakan ayakan. Tahapan ini untuk memudahkan peneliti dalam memperoleh ukuran

partikel yang diinginkan. Penelitian ini menggunakan ukuran partikel sekam padi *mesh* 100 (149 μm) yang disaring secara manual menggunakan alat saringan.

3.6 Pembuatan spesimen uji

Tahapan ini merupakan proses pembuatan spesimen uji. Tahapan awal sebelum pembuatan spesimen uji ialah menghitung volume setiap formulasi material bantalan rem. Langkah ini bertujuan untuk menentukan massa masing-masing bahan agar mempermudah proses pencampuran antara resin fenolik bakelit, serbuk sekam padi, serbuk Al_2O_3 , serbuk Fe_2O_3 dan *hexamine*. Penelitian ini menggunakan cetakan berbentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2, dengan dimensi 280 mm $\times$ 160 mm $\times$ 27 mm. Komposisi material gesek rem ramah lingkungan yang digunakan terdiri dari resin fenolik bakelit (40%), serbuk sekam padi (20%), serbuk Al_2O_3 (15%), serbuk Fe_2O_3 (15%) dan *hexamine* (10%). Nilai volume setiap material gesek rem dapat ditentukan menggunakan persamaan 3.1 sampai 3.4 sebagai berikut:

Persamaan untuk volume cetakan komposit gesekan

$$V_c = p \times l \times t \quad (3.1)$$

Persamaan untuk volume komposit gesekan (resin, penguat, pengisi dan bahan abrasif)

$$V = v \times V_c \quad (3.2)$$

Persamaan untuk massa komposit gesekan (resin, penguat, pengisi dan bahan abrasif) dengan mengacu pada persamaan massa jenis yaitu :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.3)$$

$$m = \rho \times V \quad (3.4)$$

Simbol (V_c) menunjukkan volume cetakan (cm^3), (V) adalah volume dari setiap formulasi (cm^3), (v) adalah fraksi volume (%), (m) adalah massa dari setiap formulasi (g) dan (ρ) adalah massa jenis setiap formulasi (g/cm^3).

Langkah perhitungan volume komposit gesekan ramah lingkungan pada penelitian ini, sebagai berikut:

Menghitung volume cetakan komposit gesekan

Dimensi volume cetakan uji tarik ,uji lentur , uji impak dan uji *pin on disc*.

$$\begin{aligned}
V_{\text{Tarik}} &= p \times l \times t \\
&= 115 \text{ mm} \times 19 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \\
&= 6.555 \text{ mm}^3 \\
&= 6,555 \text{ cm}^3 \\
V_{\text{Impak}} &= p \times l \times t \\
&= 55 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \\
&= 5500 \text{ mm}^3 \\
&= 5,5 \text{ cm}^3 \\
V_{\text{Lentur}} &= p \times l \times t \\
&= 127 \text{ mm} \times 12,7 \text{ mm} \times 3,2 \text{ mm} \\
&= 5.161,28 \text{ mm}^3 \\
&= 5,16128 \text{ cm}^3 \\
V_{\text{Tribometer}} &= \pi r^2 t \\
&= 3,14 \times (3 \text{ cm})^2 \times 0,8 \text{ cm} \\
&= 22,608 \text{ cm}^3
\end{aligned}$$

Total volume cetakan uji spesimen

$$\begin{aligned}
V_{\text{Total}} &= 6,555 \text{ cm}^3 + 5,16128 \text{ cm}^3 + 5,5 \text{ cm}^3 + 22,608 \text{ cm}^3 \\
&= 39,824 \text{ cm}^3
\end{aligned}$$

Menghitung massa setiap formulasi dengan persentase fraksi volume diantaranya resin fenolik (40%), sekam padi (20%), Al_2O_3 (15%), Fe_2O_3 (15%) dan hexamin (10%).

$$\begin{aligned}
\rho_{\text{fenolik}} &= 1,25 \text{ g/cm}^3 & \rho_{\text{Fe}_2\text{O}_3} &= 5,25 \text{ g/cm}^3 \\
\rho_{\text{Sekam padi}} &= 0,9 \text{ g/cm}^3 & \rho_{\text{Hexamin}} &= 1,33 \text{ g/cm}^3 \\
\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} &= 3,94 \text{ g/cm}^3
\end{aligned}$$

Perhitungan bahan fenolik

$$\begin{aligned}
V_{\text{fenolik}} &= v_{\text{fraksi fenolik}} \times V_c \\
&= 40 \% \times 39,824 \text{ cm}^3 \\
&= 15,93 \text{ cm}^3 \\
m_{\text{fenolik}} &= \rho_{\text{fenolik}} \times V_{\text{fenolik}} \\
&= 1,25 \text{ g/cm}^3 \times 15,93 \text{ cm}^3 \\
&= 19,9 \text{ g}
\end{aligned}$$

Perhitungan aluminium oksida

$$\begin{aligned}
V_{\text{Al}_2\text{O}_3} &= v_{\text{Al}_2\text{O}_3} \times V_c \\
&= 15 \% \times 39,824 \text{ cm}^3 \\
&= 5,97 \text{ cm}^3 \\
m_{\text{Al}_2\text{O}_3} &= \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} \times V_{\text{Al}_2\text{O}_3} \\
&= 3,94 \text{ g/cm}^3 \times 5,97 \text{ cm}^3
\end{aligned}$$

Perhitungan bahan sekam padi

$$\begin{aligned}
V_{\text{Sekam padi}} &= v_{\text{fraksi sekam padi}} \times V_c \\
&= 20 \% \times 39,824 \text{ cm}^3 \\
&= 7,97 \text{ cm}^3 \\
&= \rho_{\text{sekam padi}} \times V_{\text{sekam padi}} \\
&= 0,9 \text{ g/cm}^3 \times 7,97 \text{ cm}^3 \\
&= 7,17 \text{ g}
\end{aligned}$$

Perhitungan besi oksida

$$\begin{aligned}
V_{\text{Fe}_2\text{O}_3} &= v_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \times V_c \\
&= 15 \% \times 39,824 \text{ cm}^3 \\
&= 5,97 \text{ cm}^3 \\
m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} &= \rho_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \times V_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \\
&= 5,25 \text{ g/cm}^3 \times 5,97 \text{ cm}^3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 23,5 \text{ g} & &= 31,3 \text{ g} \\
 V_{\text{Hexamin}} &= v_{\text{Hexamine}} \times V_c \\
 &= 10 \% \times 39,824 \text{ cm}^3 \\
 &= 3,98 \text{ cm}^3 \\
 m_{\text{Hexamin}} &= 1,33 \text{ g/cm}^3 \times 3,98 \text{ cm}^3 \\
 &= 5,3 \text{ g}
 \end{aligned}$$

Penelitian ini menggunakan teknik manufaktur *compression molding* dalam proses pembuatan spesimen uji. Parameter-parameter yang perlu dikontrol selama proses produksi material gesek ditunjukkan pada Tabel 3.4. Namun, Penelitian ini melakukan variasi tekanan kompresi pada kompresi suhu ruang dan pemanasan. Sementara itu, parameter lainnya dijaga dalam kondisi terkontrol atau konstan.

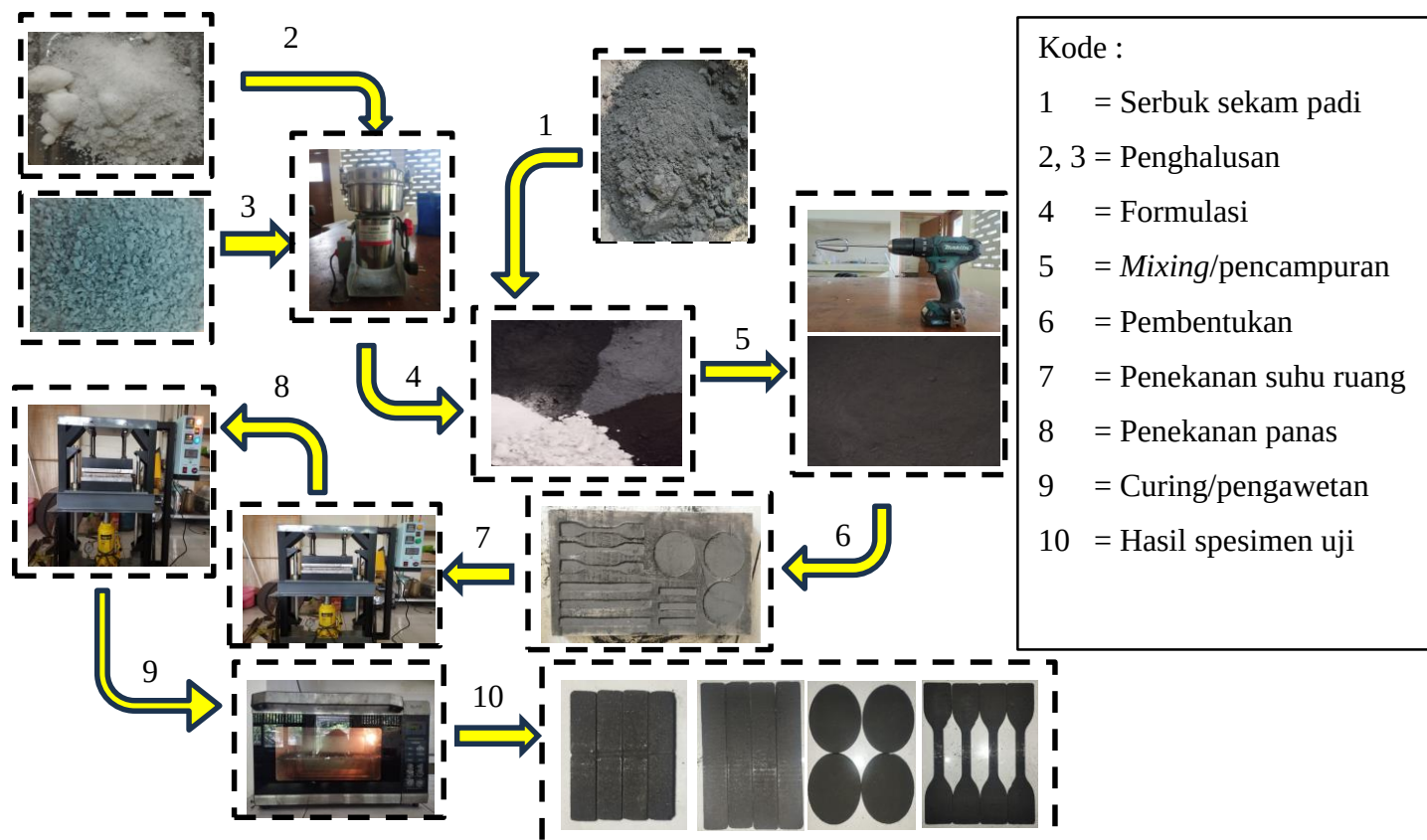
Tabel 3.4. Parameter-parameter proses produksi material gesek.

Parameter	M5	M10	M15
Durasi Pencampuran proses <i>mixer</i> (Menit)	10		
Tekanan kompresi (25°C) (MPa)	5	10	15
Durasi kompresi (25°C) (Menit)	5		
Tekanan kompresi panas (MPa)	5	10	15
Suhu kompresi panas (°C)	150		
Durasi kompresi panas (Menit)	30		
Suhu curing/pengawetan (°C)	150		
Durasi curing/pengawetan (Jam)	4		

Pembuatan spesimen uji pada penelitian ini dilakukan di Ruang Komposit Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia (UII). Gambar 3.9 menunjukkan skematik produksi material bantalan ramah lingkungan dengan metode *compression molding*. Sebelum menerapkan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 3.4, terlebih dahulu dilakukan formulasi fraksi volume dan massa masing-

masing material campuran. Semua tahapan tersebut dilakukan secara konstan dan prosedur dalam proses pembuatan spesimen sebagai berikut :

1. Menyiapkan alat dan bahan yang ditunjukkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.
2. Menghaluskan resin fenolik bakelit dan katalis *hexamine* menjadi partikel kecil menggunakan mesin penepung (*crusher*).
3. Menimbang massa pada masing-masing material dengan fraksi volume seperti resin fenolik bakelit (40%), serbuk sekam padi (20%), serbuk Al_2O_3 (15%), serbuk Fe_2O_3 (15%) dan katalis *hexamine* (10%).
4. Membersihkan cetakan terlebih dahulu untuk menghilangkan kotoran/debu yang menempel dalam cetakan. setelah itu, dilakukan penyemprotan pelumas (WD-40) pada cetakan, kemudian mengeringkan cetakan.
5. Memasukkan masing-masing komposisi material ke dalam wadah. Kemudian melakukan proses pencampuran selama 10 menit dengan menggunakan mesin bor makita.
6. Memasukkan material yang telah tercampur ke dalam cetakan secara bertahap. Setelah itu, melakukan pembentukan dengan menggunakan kayu yang berbentuk seperti dimensi spesimen uji.
7. Melakukan proses pemadatan material menggunakan mesin *hotpress* hidrolik dengan parameter tekanan, suhu, dan waktu kompresi yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.
8. Melepaskan spesimen uji dari dalam cetakan dengan alat pendorong kayu yang berbentuk dimensi spesimen, serta diberikan penekanan pada kayu tersebut.
9. Mengawetkan spesimen uji ke dalam oven pada suhu dan waktu yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.
10. Melakukan proses *finishing* pada spesimen uji impak dengan membuat tukikan menggunakan kikir.
11. Langkah-langkah tersebut dilakukan sebanyak 3 kali dengan perlakuan variasi tekanan yang berbeda. Penelitian ini menggunakan variasi tekanan kompresi cetak yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.



Gambar 3.9. Skematik pembuatan spesimen uji material gesek rem.

3.7 Pengujian Spesimen

3.7.1 Pengujian densitas

Pengujian ini bertujuan untuk mengamati dan menganalisis kerapatan material dari spesimen uji dengan metode geometri untuk mencari nilai densitas. Proses ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia (UII). Adapun prosedur yang harus dilakukan dalam proses pengujian densitas sebagai berikut :



Gambar 3.10. Timbangan digital dan mikrometer sekrup.

1. Menyiapkan alat uji dan spesimen uji.
2. Melakukan kalibrasi alat terlebih dahulu untuk memperoleh data hasil uji yang akurat.
3. Menimbang massa spesimen uji menggunakan timbangan digital, kemudian mencatat hasil dari penimbangan tersebut.
4. Mengukur tebal spesimen uji menggunakan mikrometer sekrup dengan ketelitian 0,01 mm. Setelah itu, mencatat hasil pengukuran tersebut.
5. Menghitung volume spesimen uji pada setiap percobaan dari variasi tekanan kompresi dengan persamaan 3.5.

$$V = \pi r t^2 \quad (3.5)$$

6. Menghitung densitas spesimen uji pada setiap percobaan dari variasi tekanan kompresi dengan persamaan 3.6.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.6)$$

7. Langkah-langkah tersebut dilakukan 3 kali percobaan pada setiap variasi tekanan kompresi dari spesimen uji.

3.7.2 Pengujian impak

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi penyerapan energi material yang mengalami benturan atau beban kejut sebelum patah pada spesimen uji. Proses ini dilakukan menggunakan alat impak *charpy* di Laboratorium Material Teknik Departemen Teknik Mesin dan Industri di Universitas Gajah Mada. Penelitian ini menggunakan metode *charpy* dan posisi spesimen secara horizontal dengan tukan berada di tengah. Beban pendulum sebesar 1 Kg dan lengan bandul 0,83 m. Adapun prosedur yang harus dilakukan pada pengujian ini sebagai berikut :



Gambar 3.11. Alat uji impak.

1. Menyiapkan alat pengujian dan spesimen uji.
2. Melakukan pengukuran ketebalan setiap spesimen uji menggunakan vernier kaliper dengan ketelitian 0,02 mm.
3. Melakukan kalibrasi alat uji sebelum melaksanakan pengujian, kemudian melihat sudut awal pada jarum jam penunjuk sudut.
4. Menggerakkan pendulum untuk membentur spesimen uji. Lalu melihat sudut akhir setelah spesimen terbentur oleh pendulum dan mencatat data hasil pengujian.
5. Menghitung energi serap (W) material spesimen uji pada setiap percobaan dari masing-masing variasi tekanan kompresi dengan persamaan 3.7.

$$W = m \cdot g \cdot \lambda (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (3.7)$$

6. Menghitung harga impak (HI) material spesimen uji pada setiap percobaan dari masing-masing variasi tekanan kompresi dengan persamaan 3.8.

$$HI = \frac{W}{A} \quad (3.8)$$

7. Langkah-langkah tersebut dilakukan 3 kali percobaan pada setiap variasi tekanan kompresi dari spesimen uji.

3.7.3 Pengujian tarik

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik terhadap beban tarik sebelum patah, kekakuan material dan regangan material saat putus pada spesimen uji. Proses ini dilakukan dengan menggunakan mesin kekuatan tarik bermerk *Ibertest series* TESTCOM-5/E-MD2W di instansi BBSPJIKKP (Balai Besar Standarisasi dan Pelayanan Jasa Industri Kulit, Karet dan Plastik)

Yogyakarta. Adapun prosedur yang harus dilakukan dalam pengujian ini sebagai berikut:

a. Proses pengujian



Gambar 3.12. Mesin uji tarik merk Ibertest.

1. Menyiapkan alat mesin uji dan spesimen uji. Setelah itu, melakukan kalibrasi alat sebelum pengujian.
2. Mengukur lebar spesimen menggunakan vernier kaliper digital. Kemudian melakukan pengukuran tebal spesimen yang ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13. Pengukuran spesimen uji menggunakan dial indikator.

3. Mencatat hasil pengukuran yang didapatkan dari alat ukur vernier kaliper digital dan dial indikator.
4. Menjepit spesimen uji pada grip yang ditunjukkan pada Gambar 3-14.



Gambar 3.14. Spesimen yang di jepit pada grip mesin uji tarik.

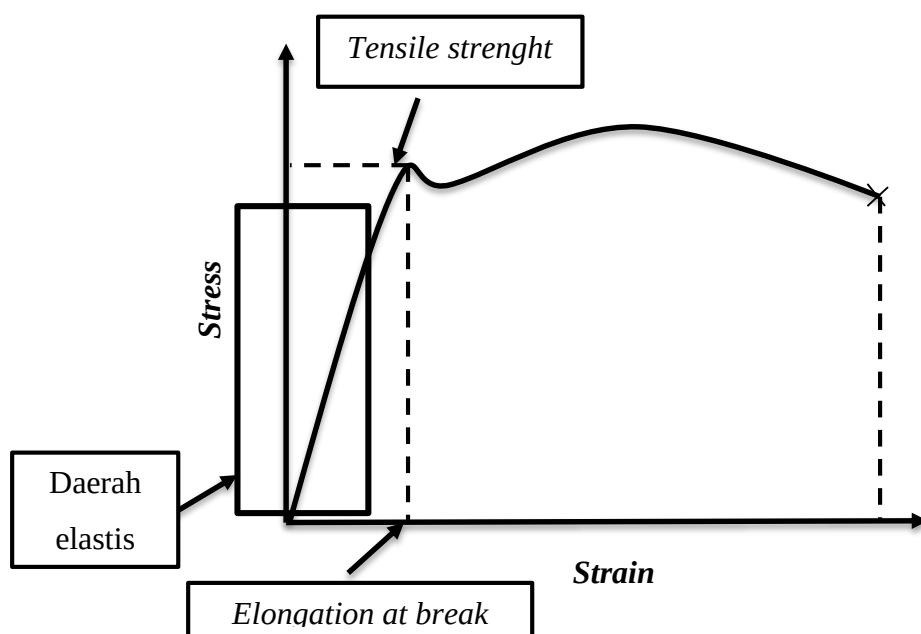
5. Mengklik *run* untuk menjalankan proses pengujian sampai spesimen mengalami putus. Kemudian mencatat dan menyimpan data hasil pengujian.
6. Memunculkan data hasil pengujian berupa grafik *load-displacement*, data beban maksimum dan kekuatan tarik maksimum sebelum.
7. Langkah-langkah tersebut dilakukan sebanyak 3 kali percobaan pada setiap variasi spesimen uji.
8. Menghitung hasil pengujian kekuatan tarik, perpanjangan putus dan modulus elastisitas. Untuk nilai tersebut menggunakan persamaan 3.9 dan persamaan 3.10.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (3.10)$$

b. Langkah untuk mengetahui dan menghitung modulus elastisitas

1. Menghitung nilai modulus elastisitas (E). Langkah pertama harus membuat kurva *stress-strain* dengan disajikan dua titik sumbu yaitu sumbu x *strain* dan sumbu y *stress*.
2. Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 3.15 menunjukkan bahwa bagian garis linear sebelum mengalami lelah di daerah elastis.



Gambar 3.15. Kurva *stress* dan *strain*.

3. Modulus elastisitas hanya berlaku pada area dalam elastis material, di mana tegangan dan regangan berbanding lurus.
4. Dari bagian linear pada dua titik di plot sebagai tegangan (σ_1, σ_2) dan regangan (ϵ_1, ϵ_2) dan nilai modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan persamaan 3.11.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3.11)$$

3.7.4 Pengujian lentur

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan pada pembebanan secara ma pada spesimen uji. Proses ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji *bermerk Tokyo Testing Machine* dengan beban maksimal 5 ton. Uji spesimen dilakukan di Laboratorium Material Teknik Departemen Teknik Mesin dan Industri di Universitas Gajah Mada. Pengujian ini dilakukan oleh menggunakan *metode three point bending* dengan pembebanan berada di titik tengah spesimen dan dua titik yang lainnya sebagai tumpuan. Adapun prosedur yang harus dilakukan pada pengujian ini sebagai berikut :



Gambar 3.16. Mesin uji bending *tokyo testing machine*.

1. Menyiapkan mesin uji bending dan spesimen uji.
2. Melakukan pengukuran tebal pada setiap spesimen uji vernier kaliper dengan ketelitian 0,05 mm.
3. Melakukan kalibrasi alat sebelum pelaksanaan proses pengujian.

4. Meletakkan spesimen uji pada kedua tumpuan yang ditunjukkan pada Gambar 3.17. Kemudian memasukkan nilai pengukuran ketebalan dan lebar spesimen ke dalam *software*.



Gambar 3.17. Posisi spesimen dengan metode *three poin bending*.

5. Mengklik *run* pada *software* dari mesin uji tersebut, bertujuan untuk melihat spesimen uji sampai mengalami deformasi retak.
6. Langkah-langkah tersebut dilakukan sebanyak 3 kali percobaan pada setiap variasi spesimen uji.
7. Menghitung nilai kekuatan lentur (σ_f) dari data hasil pengujian dengan menggunakan persamaan 3.12.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (3.12)$$

3.7.5 Pengujian gesekan dan keausan

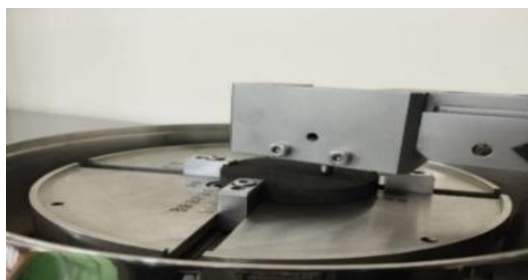
Pengujian ini bertujuan untuk menentukan volume keausan, koefisien gesek, dan massa aus dan laju keausan spesifik dalam kondisi kinerja gesekan pada spesimen uji. Proses ini dilakukan dengan menggunakan mesin tribometer di Laboratorium Konversi Energi Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia (UII). Dalam penelitian ini menggunakan metode *pin on disc* dengan spesimen uji yang berputar di piringan, kemudian pin sebagai stasioner penekan dalam kondisi terkendali. Adapun prosedur yang harus dilakukan pada pengujian ini sebagai berikut :

a. Proses percobaan



Gambar 3.18. Mesin tribometer.

1. Menyiapkan mesin uji dan spesimen uji yang ditunjukkan pada Gambar 3.18.
2. Melakukan kalibrasi dan mengatur pada mesin pengujian sebelum pelaksanaan proses pengujian agar mendapat data yang lebih akurat.
3. Menimbang spesimen uji menggunakan timbangan digital. Kemudian memasukkan nilai tersebut pada *microsoft excel*.
4. Meletakkan spesimen uji di piringan yang ditunjukkan pada gambar 3.19 dan mengatur posisi spesimen sebelum dikencangkan pada bagian penjepit yang berada di pada piringan.
5. Menempelkan pin stasioner yang ditunjukkan pada gambar 3.20. setelah itu, mengatur beban sebesar 10 N, kecepatan 200 rpm, waktu 10 menit dan *wear track* 40 mm pada *software* alat uji.



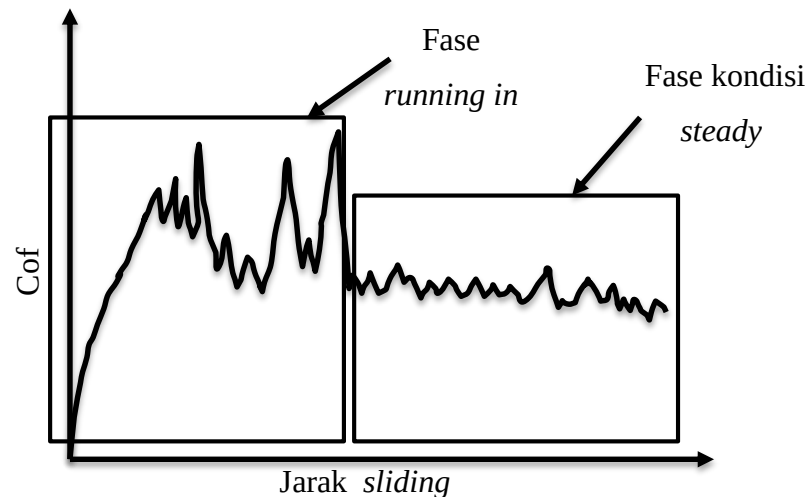
Gambar 3.19. Posisi spesimen uji.

6. Sebelum mengklik *run* harus melakukan reset tombol pada grafik yang berada di *software* mesin dengan memutar sensor.
7. Setelah selesai pengujian, menimbang kembali spesimen uji dari hasil percobaan.
8. Langkah tersebut dilakukan sebanyak 3 kali percobaan pada setiap variasi spesimen uji.

9. Menghitung laju keausan spesifik dan koefisien gesek.

b. Langkah pengambilan data hasil uji dalam kondisi *steady*

1. Mengambil data dari hasil pengujian ketika kondisi *steady* yang membuat grafik CoF-jarak *sliding* dengan plot sumbu x jarak *sliding* dan sumbu y CoF.
2. Dari Gambar 3.20 menunjukkan data hasil pengujian yang berada di area kondisi *steady*.
3. Dirata-ratakan nilai dari daerah yang berada kondisi *steady* menggunakan *excel*.
4. Dari data tersebut, mengambil nilai yang diperlukan untuk menghitung laju keausan spesifik dan CoF pada setiap percobaan.



Gambar 3.20. Skematik grafik CoF-jarak sliding.

c. Menghitung nilai laju keausan spesifik

1. Menghitung volume spesimen uji dengan dimensi silinder dengan menggunakan persamaan 3.13.

$$V_s = \pi r t^2 \quad (3.13)$$

2. Kemudian menghitung densitas spesimen uji dengan persamaan 3.14.

$$\rho_s = \frac{m_{\text{sebelum uji}}}{V_s} \quad (3.14)$$

3. Selanjutnya, menghitung massa uas (m_{aus}) pada spesimen uji dengan persamaan 3.15.

$$m_{\text{aus}} = m_{\text{sebelum uji}} - m_{\text{setelah uji}} \quad (3.15)$$

4. Menghitung volume aus (V_{aus}) pada spesimen uji dengan persamaan 3.16.

$$V_{\text{aus}} = \frac{m_{\text{aus}}}{\rho_s} \quad (3.16)$$

5. Setelah itu, menghitung nilai laju keausan spesifik (K_s) dengan persamaan 3.17.

$$K_s = \frac{V_{\text{aus}}}{F_n \times r} \quad (3.17)$$

d. Langkah menghitung nilai Cof

1. Mengambil data nilai gaya gesek (f_{friction}) dari hasil rata-rata.
2. Mengambil data nilai beban normal (F_n) dari hasil rata-rata.
3. Menghitung nilai cof dengan menggunakan persamaan 3.18.

$$\mu = \frac{f_{\text{friction}}}{F_n} \quad (3.18)$$

3.8 Variabel penelitian

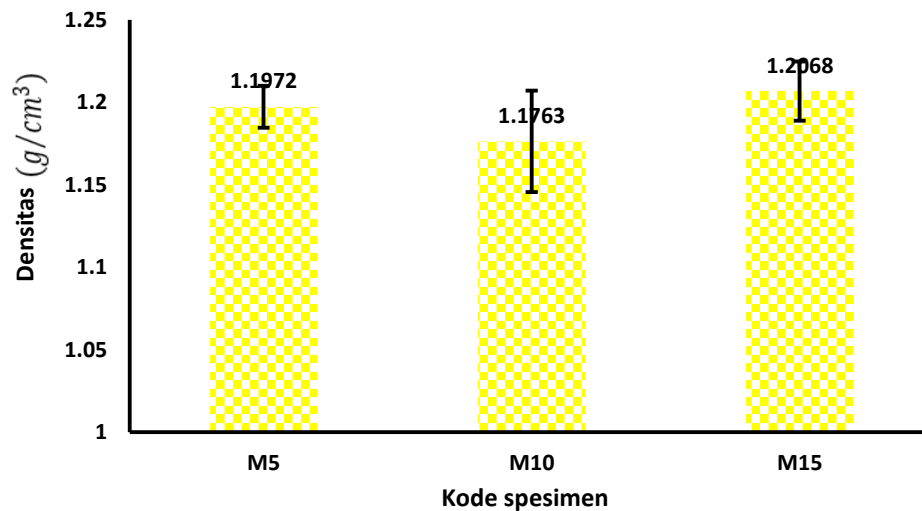
Tabel 3.5. Variabel penelitian pada spesimen uji.

Kode	Variabel bebas	Variabel terikat	Variabel kontrol
M5	5 MPa	Uji densitas, Uji impak, Uji tarik, Uji lentur, Uji gesekan dan Uji keausan	Ukuran partikel : Sekam padi (149 μm), Al_2O_3 (63 μm), Fe_2O_3 (63 μm) dan resin fenolik
M10	10 MPa		Pembakaran sekam padi 600°C selama 60 menit.
M15	15 MPa		Paramter produksi konstan dapat ditunjukkan pada Tabel 3.4.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Densitas

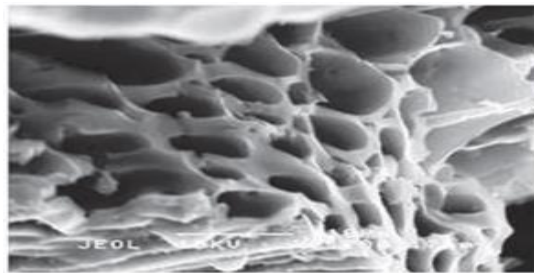


Gambar 4.1. Grafik pengujian densitas.

Gambar 4.1 menunjukkan grafik hasil pengujian densitas dengan meningkatkan tekanan kompresi yang menghasilkan nilai densitas secara non linear (tidak mengikuti tren yang konsisten). Penelitian oleh Sunardi, dkk., menyatakan bahwa peningkatan tekanan kompresi pada produksi komposit dapat meningkatkan sifat densitas [38]. Hasil pengujian densitas pada M5, M10 dan M15 adalah $1,1959 \pm 0,0127 \text{ g/cm}^3$, $1,1763 \pm 0,0308 \text{ g/cm}^3$ dan $1,2068 \pm 0,0180 \text{ g/cm}^3$. Penelitian ini menemukan adanya penurunan densitas ketika tekanan kompresi ditingkatkan, khususnya pada tekanan 10 MPa. Penurunan ini terjadi karena partikel yang berukuran lebih besar mengalami aglomerasi partikel (penggumpalan partikel) sehingga dapat melemahkan ikatan antarpartikel matriks dan penyusunnya.

Terjadinya peningkatan rongga kosong (*void*) disebabkan oleh aliran resin yang tidak terdistribusi merata antara matriks dan penyusun selama proses pemadatan rendah. Sementara itu, gas dari resin fenolik dan *hexamine* yang terperangkap di dalam cetakan pada kondisi tekanan rendah dapat menghasilkan rongga kosong yang meningkatkan porositas. Pemadatan pada tekanan rendah

sebagian besar memiliki rongga yang berukuran relatif besar. Partikel yang berukuran tidak homogen antara pengisi dan bahan abrasif selama pemadatan tekanan rendah dapat menghasilkan distribusi partikel tidak merata sehingga menurunkan densitas. Penelitian oleh Stephen, dkk., menyatakan bahwa penurunan densitas dapat dihubungkan dengan peningkatan ukuran partikel penguat dan pengisi [39]. Penelitian oleh Melvin, dkk., menunjukkan bahwa sekam padi yang dibakar pada suhu di atas 500°C memiliki struktur pori yang lebih terbuka dan luas permukaan yang meningkat, sehingga rongga menjadi lebih besar [40]. Hal tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 4.2 dengan proses pembakaran suhu 650°C.



Gambar 4.2. Struktur rongga sekam padi pada pembakaran 650°C [41].

Peneliti melakukan proses pembakaran sekam padi pada suhu 600°C yang menghasilkan struktur pori hampir menyerupai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pemadatan dengan tekanan rendah membuat partikel yang berukuran kecil tidak dapat mengisi struktur pori yang besar, sehingga dapat menurunkan densitas. Partikel yang berukuran tidak seragam, terutama partikel bahan alam yang lebih besar, akan hancur ketika mengalami tekanan kompresi tinggi. Struktur pori berfungsi untuk menahan beban tekanan kompresi. Namun, struktur pori yang terbuka dapat meningkatkan porositas, sehingga menurunkan densitas. Penelitian oleh He, dkk., melaporkan bahwa peningkatan tekanan menunjukkan efek batas yang jelas akibat struktur serat dan pengurangan rongga [42]. Pemadatan pada tekanan kompresi tinggi memungkinkan partikel kecil terdorong masuk ke dalam rongga yang lebih besar, sehingga porositas menurun dan densitas meningkat. Material komposit dengan paduan Al_2O_3 dari partikel berukuran lebih kecil pada kondisi tekanan kompresi panas tinggi dapat menunjukkan peningkatan nilai densitas. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya mengisi rongga pada partikel berukuran lebih besar [43].

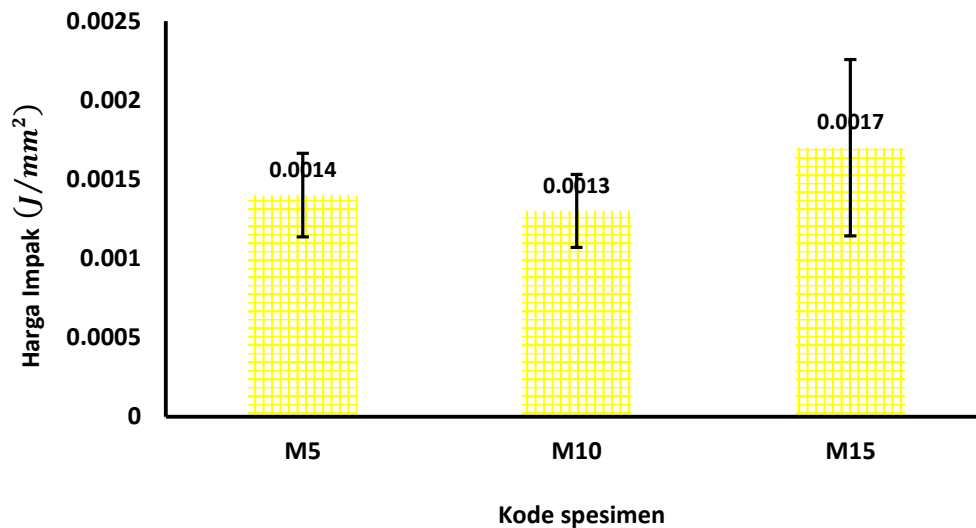
Tekanan tinggi, seperti yang digunakan oleh peneliti pada tekanan kompresi 15 MPa, dapat meningkatkan ikatan antarpartikel material. Tekanan kompresi panas yang tinggi memungkinkan resin terpolimerisasi lebih baik, sehingga dapat mengalir dan terdistribusi merata untuk mengikat struktur antarpartikel material. Pemadatan pada tekanan rendah, seperti tekanan 5 MPa menghasilkan nilai densitas lebih baik dibandingkan 10 MPa. Hal tersebut disebabkan partikel besar dari sekam padi tidak hancur. Namun, porositas tetap tinggi dan ikatan partikel masih melemah. Hal ini dapat mempertahankan nilai densitas pada kondisi tekanan kompresi rendah. Kondisi Densitas material yang dipengaruhi oleh *void* (rongga kosong) atau cacat akan berdampak terhadap sifat fisik material gesekan.

Dalam kondisi tekanan rendah terkait kelembapan material berbahan alam seperti sekam padi tidak dapat menyerap air secara sempurna, sehingga dapat menciptakan rongga baru yang dapat menurunkan densitas. Selain itu, struktur partikel sekam padi yang rusak tidak dapat menyerap air. Hal ini terjadi pada pemadatan dengan tekanan 10 MPa. Selama proses pemadatan tekanan panas yang rendah, uap air yang terkandung dalam partikel sekam padi tidak keluar dengan optimal. Kelembapan inilah yang dapat menghambat ikatan antara resin dan pengisi bahan lainnya yang membuat adhesi partikel melemah. Pemadatan tekanan panas yang rendah memungkinkan tidak merusak struktur partikel sekam padi [44]. Struktur ini yang dapat menyerap air dari kelembapan partikel sekam padi yang membuat mempertahankan densitas material, meskipun dalam proses pemadatan tekanan rendah seperti pada 5 MPa. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Nakazoto, dkk., yang menunjukkan penurunan densitas pada tekanan 10 MPa, kemudian mengalami kenaikan densitas pada tekanan 17 MPa [45].

Perbandingan densitas penelitian ini dengan spesifikasi standar material gesekan PT. KAI dan SAE J661. Penelitian ini memperoleh nilai densitas terbaik sebesar $1,2068 \text{ g/cm}^3$ pada tekanan kompresi 15 MPa. Nilai densitas dalam penelitian ini hampir mendekati hasil yang diperoleh Khafidh, dkk. sebesar $1,33 \text{ g/cm}^3$. Namun, kedua hasil tersebut diperoleh melalui metode produksi, ukuran partikel sekam padi dan bahan pengikat yang berbeda [7]. Meskipun demikian,

nilai densitas hasil pengujian ini belum memenuhi standar SAE J661 dan PT. KAI, yang masing-masing memiliki batas minimal sebesar 1,5 g/cm³ dan 1,8 g/cm³.

4.2 Pengujian Impak

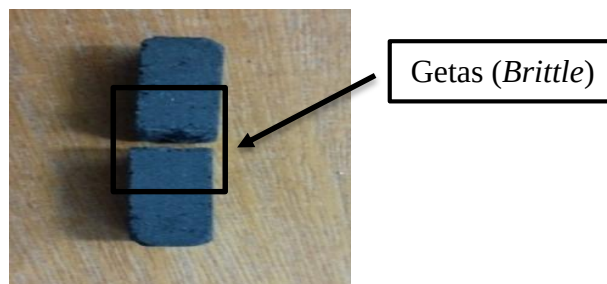


Gambar 4.3. Grafik hasil pengujian kekuatan impact.

Gambar 4.3 menunjukkan nilai harga impact dan hasil pengujian yang diperoleh menunjukkan hasil yang non linear. Hal ini dapat dikaitkan dengan temuan dari penelitian Oladukon, dkk., yang menyatakan bahwa semakin tinggi tekanan cetak kompresi, maka sifat mekanik pada material komposit gesek akan semakin meningkat [46]. Kekuatan impact merupakan salah satu bagian dari kelompok sifat mekanis material. Hasil pengujian pada harga impact material M5, M10 dan M15 adalah $0,0014 \pm 0,0002165$ J/mm², $0,0013 \pm 0,0002309$ J/mm² dan $0,0017 \pm 0,000557$ J/mm². Peningkatan porositas menyebabkan penyerapan energi material menurun, sehingga dapat mengurangi kekuatan. Hal ini disebabkan oleh pori-pori yang terbentuk akibat tekanan rendah, yang dapat menjadi titik konsentrasi tegangan dan memicu retakan mikro. Terbentuknya rongga kosong (*void*) pada material dapat membuat energi serap menurun akibat dari tumbukan yang dapat dikaitkan dengan ukuran partikel. Temuan serupa juga telah disampaikan oleh Mohammed, dkk., yang menyatakan bahwa ukuran partikel dapat mempengaruhi ketangguhan impact suatu material [47]. Penurunan

harga impact disebabkan oleh distribusi antar partikel yang tidak merata selama fase pemadatan.

Hal tersebut menunjukkan bahwa partikel yang tidak homogen dapat menyebabkan ketidakmampuan dalam distribusi beban akibat benturan. Tekanan kompresi yang rendah menyebabkan ikatan silang antarpartikel menjadi lemah, sehingga tidak dapat menahan beban tumbukan. Tekanan kompresi dapat mempengaruhi perilaku kekuatan tumbukan yang berkaitan dengan proses pembentukan ikatan silang antar partikel dan matriks. Material pada tekanan 5 MPa memiliki harga impact yang lebih baik dibandingkan tekanan 10 MPa. Hal ini disebabkan oleh struktur partikel sekam padi yang tetap utuh pada tekanan rendah, sehingga mampu menahan beban benturan. Penelitian dari Tong, dkk., yang menyatakan bahwa pembakaran sekam padi pada suhu 600°C selama 60 menit dapat meningkatkan kandungan silika hingga mencapai lebih dari 90% [28]. Peningkatan kandungan silika menyebabkan ketangguhan material menurun karena sifat getas dari silika. Kandungan tersebut akan hancur saat pemadatan tekanan tinggi. Pemadatan tekanan tinggi pada partikel berukuran kecil secara signifikan dapat menghambat perambatan retak, sehingga meningkatkan ketangguhan material.

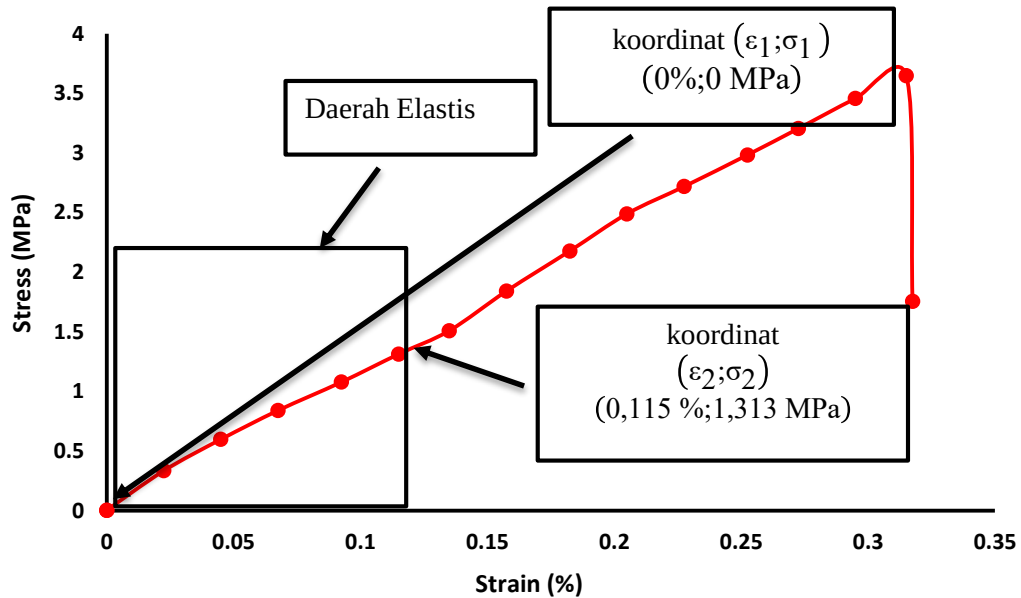


Gambar 4.4. Patah getas Kode spesimen M5-3.

Bahan aditif yang lebih kecil seperti besi oksida dan aluminium oksida pada pemadatan tekanan tinggi dapat membuat area permukaan yang lebih besar untuk berinteraksi dengan bahan matriks. Peningkatan tekanan kompresi pemadatan memperkuat ikatan antara pengisi dan matriks, sehingga meningkatkan transfer beban dan ketahanan terhadap beban bentur. Gambar 4.4 menunjukkan bagian patahan spesimen uji setelah pengujian impact, yang berbentuk patah getas tanpa adanya fenomena deformasi. Hal ini terjadi karena

sifat getas dari matriks resin dan sekam padi lebih dominan, sehingga menyebabkan material mengalami patahan getas.

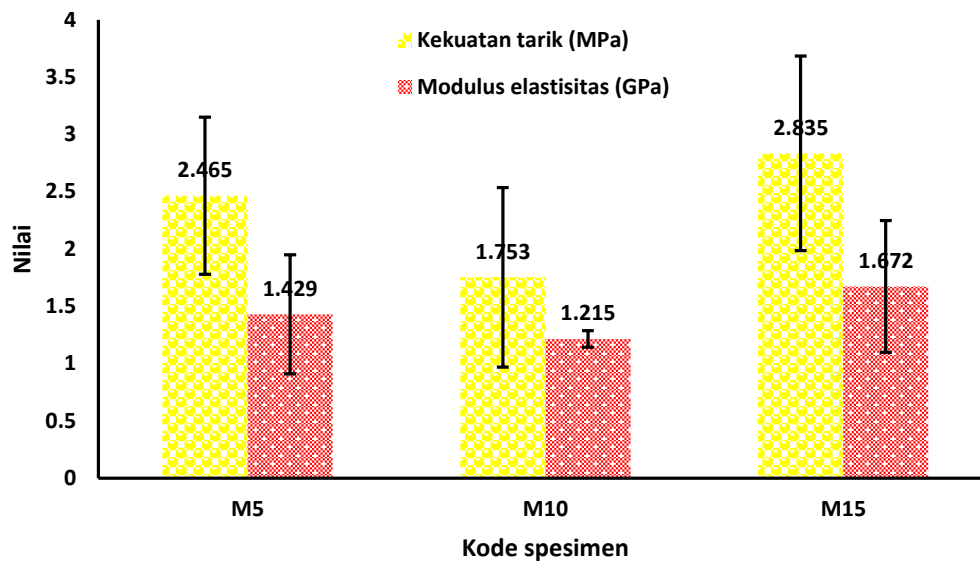
4.3 Pengujian Tarik



Gambar 4.5. Grafik *stress* dan *strain* kode spesimen M15-3.

Gambar 4.5 menunjukkan grafik hubungan antara tegangan dan regangan yang digunakan untuk menentukan nilai modulus elastisitas suatu material. Pada daerah elastis, tegangan berbanding lurus dengan regangan. Perhitungan modulus elastisitas dilakukan dengan mengambil dua titik koordinat, yaitu dari awal hingga akhir daerah elastis. Nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan 3.9 dan 3.10 Sebagai contoh, data diambil dari grafik spesimen dengan kode M15-3 sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \\
 &= \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \\
 &= \frac{1,313 \text{ MPa} - 0 \text{ MPa}}{0,000115 - 0} \\
 &= 1.147,7 \text{ MPa} \\
 &= 1,1477 \text{ GPa}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.6. Grafik pengujian kekuatan tarik dan modulus elastisitas.

Gambar 4.6 menunjukkan hasil uji kekuatan tarik dan modulus elastisitas material M5, M10 dan M15. Nilai kekuatan tarik adalah $2,465 \pm 0,685$ MPa , $1,753 \pm 0,783$ MPa, $2,835 \pm 0,849$ MPa. Sementara itu, nilai modulus elastisitas adalah $1,429 \pm 0,519$ GPa, $1,215 \pm 0,0724$ GPa dan $1,672 \pm 0,576$ GPa. Terjadinya degradasi kekuatan dan kekakuan material meskipun tekanan kompresi ditingkatkan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya rongga (*void*) yang memicu porositas, sehingga menurunkan kekuatan dan kekakuan material. Partikel sekam padi yang telah melalui proses pembakaran menjadi rapuh saat menerima tekanan kompresi tinggi. Selain itu, ukuran partikel penyusun mempengaruhi kekuatan tarik dan modulus elastisitas. Adhesi yang buruk antara matriks dan pengisi, serta aglomerasi partikel (penggumpalan partikel), menyebabkan konsentrasi tegangan tinggi. Hal ini mengakibatkan penurunan kekuatan dan kekakuan elastisitas.

Ukuran partikel yang lebih besar dari bahan alam seperti sekam padi berpengaruh saat mengalami tekanan kompresi tinggi. Kondisi ini menyebabkan struktur partikel hancur dan memunculkan porositas baru, sehingga material tidak mampu menahan beban tarik. Tekanan pada proses kompresi cetak mempengaruhi terbentuknya *void*, yaitu ruang kosong akibat udara yang terperangkap dalam cetakan. Matriks berfungsi sebagai pengikat, mentransfer beban dan memberikan kekuatan, kekakuan dan bentuk pada struktur komposit.

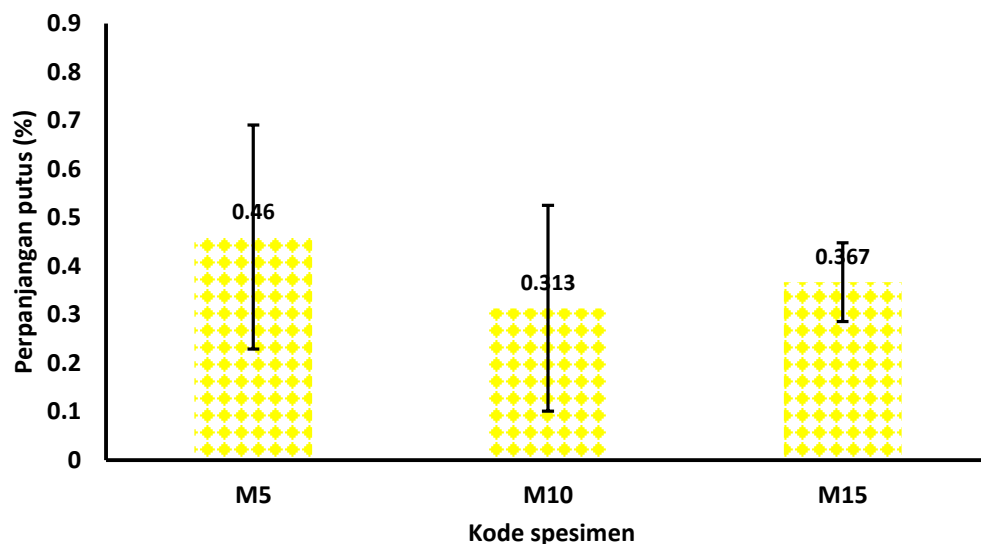
Jika peran matriks tidak optimal, maka sifat mekanik material dapat menurun [48]. Peningkatan tekanan pemadatan dapat berkaitan dengan interaksi antarpartikel antara pengisi dan matriks, serta aliran resin yang terdistribusi merata di permukaan dan membentuk ikatan antarpartikel yang kuat. Pada tekanan kompresi tinggi, partikel berukuran kecil dapat mengisi rongga besar, sehingga membuat rongga kosong mengecil dan menurunkan porositas.

Material yang mengalami pemadatan pada tekanan tinggi menyebabkan partikel matriks dan penyusunnya saling berdekatan, sehingga dapat membentuk ikatan silang partikel yang lebih kuat. Hal tersebut dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan material saat mengalami beban tarik pada tekanan 15 MPa. Sebaliknya, pada tekanan pemadatan rendah, struktur partikel sekam padi tidak hancur dan masih dapat menahan beban tarik, meskipun porositas tetap tinggi dan ikatan partikel masih lemah. Dalam kondisi pemadatan bertekanan tinggi, modulus elastisitas menjadi lebih sensitif terhadap cacat lokal seperti retakan dan aglomerasi.

Penentuan suhu tekanan kompresi panas dapat menentukan hasil akhir karakteristik material gesek rem. Penelitian ini menggunakan tekanan kompresi panas 150°C karena adanya faktor dari pelepasan gas yang dihasilkan oleh resin fenolik dan hexamin. Penggunaan pemadatan tekanan panas dengan suhu tinggi, seperti 180°C dapat mengakibatkan pelepasan gas tidak keluar secara sempurna sehingga berisiko memunculkan rongga pada struktur komposit. Cetakan yang berada dekat dengan sumber panas cenderung lebih cepat mengeras, khususnya pada lapisan resin di bagian permukaan material. Hal ini dapat bertindak sebagai penghambat pelepasan gas yang terperangkap di dalam cetakan. Suhu pemadatan tekanan panas yang rendah seperti 150°C lebih aman untuk mengontrol pelepasan gas secara bertahap sekaligus menjaga perpindahan panas tetap merata ke seluruh bagian produk [42]. Pemadatan tekanan panas dengan durasi pemadatan yang lebih lama dapat memberikan waktu yang cukup untuk pelepasan gas yang dihasilkan dari sisa volatil.

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa nilai perpanjangan putus pada material gesek berubah secara nonlinear akibat peningkatan tekanan pemadatan kompresi. Perpanjangan putus adalah seberapa besar pertambahan panjang suatu spesimen

uji material saat ditarik sampai putus. Pada tekanan pemadatan 10 MPa, nilai perpanjangan putus mengalami penurunan meskipun tekanan kompresi ditingkatkan. Hal tersebut dipengaruhi oleh memburuknya ikatan silang partikel karena aliran resin tidak terdistribusi merata sehingga tidak dapat mengikat secara optimal. Porositas dapat memengaruhi perpanjangan putus ketika suatu material mendapatkan beban tarik. Aglomerasi partikel juga dapat menurunkan nilai perpanjangan putus dan mempercepat terjadinya keretakan.

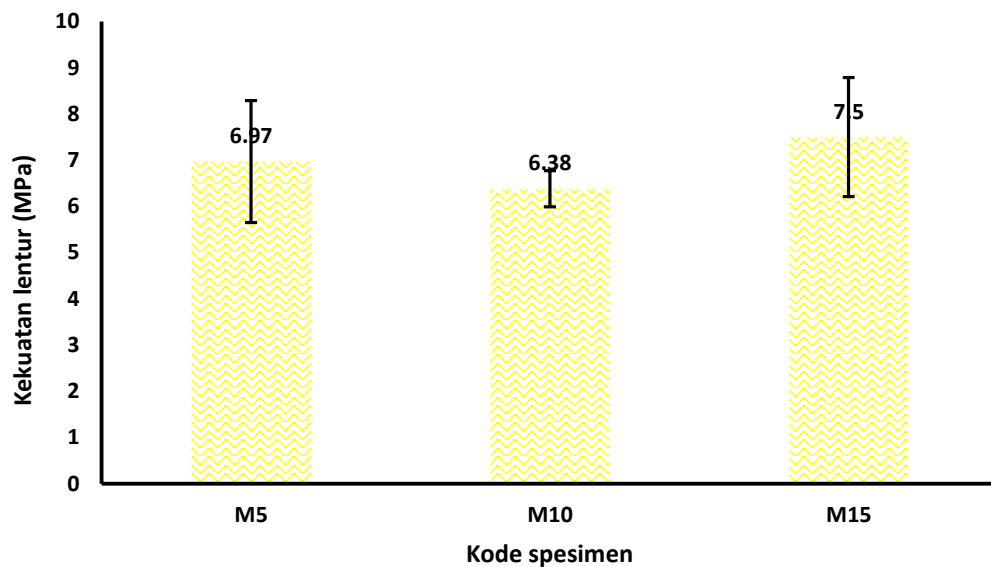


Gambar 4.7. Grafik pengujian perpanjangan putus.

Pemadatan tekanan kompresi tinggi seperti 15 MPa dapat meningkatkan nilai perpanjangan putus. Hal ini terjadi karena ikatan silang antarpartikel menjadi lebih kuat dan porositas menurun akibat partikel kecil mengisi rongga yang lebih besar. Sebaliknya, pada tekanan rendah seperti 5 MPa memperoleh nilai perpanjangan putus tertinggi. Pemadatan dengan tekanan kompresi rendah menghasilkan ikatan silang partikel yang lemah dan porositas lebih tinggi. Namun, struktur partikel sekam padi tidak hancur, sehingga mampu menahan beban tarik. Pemadatan dengan tekanan kompresi panas yang rendah dapat mempertahankan struktur partikel sekam padi, sehingga membuat nilai perpanjangan putus lebih baik. Temuan penelitian dari Li, dkk., yang menyatakan bahwa nilai perpanjangan putus sangat sensitif terhadap tekanan kompresi panas [49].

Perbandingan modulus elastisitas material rem dari standar PT. KAI dengan penelitian ini. Penelitian ini menghasilkan nilai modulus elastisitas terbaik sebesar 1,672 GPa pada tekanan kompresi 15 MPa. Standar PT. KAI memiliki modulus elastisitas material sebesar 0,24 GPa – 1,5 GPa. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian ini, nilai modulus elastisitas dapat memenuhi standar minimal dari PT. KAI.

4.4 Pengujian lentur



Gambar 4.8. Grafik Pengujian kekuatan lentur.

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa hasil kekuatan lentur yang berubah secara non linear. Nilai kekuatan lentur yang diperoleh pada material M5, M10 dan M15 adalah $6,97 \pm 0,6809$ MPa, $6,38 \pm 0,4644$ MPa, $7,50 \pm 1,0357$ MPa. Selama proses pemadatan material gesek rem, peningkatan tekanan kompresi menyebabkan penurunan kekuatan lentur pada tekanan 10 MPa. Penurunan ini disebabkan oleh aglomerasi partikel berukuran besar, serta aliran resin tidak merata, sehingga ikatan antarpartikel menjadi kurang optimal. Oleh karena itu, ukuran partikel dalam campuran material sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi kekuatan lentur material secara keseluruhan [50].

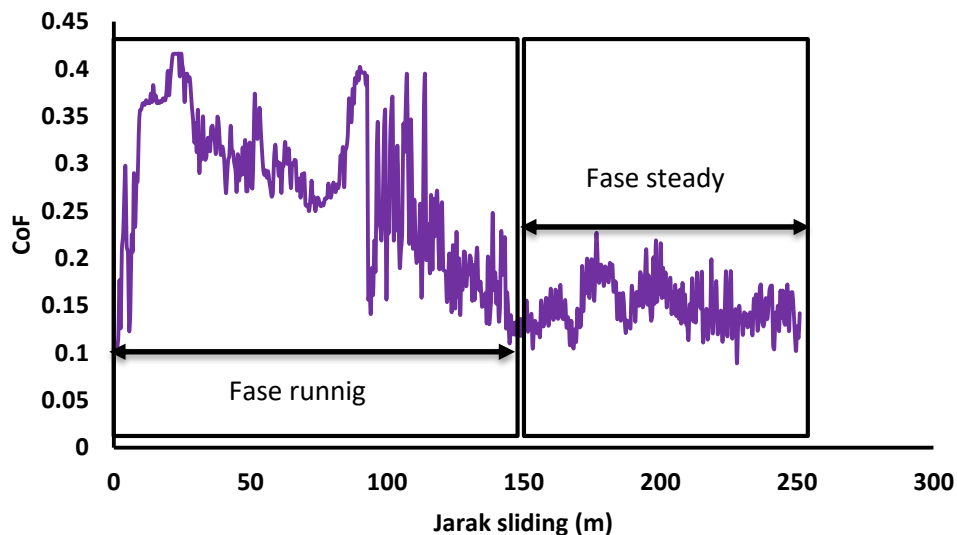
Peningkatan tekanan kompresi saat proses pemadatan material dapat mempengaruhi adhesi antara pengisi dan matriks. Hal ini terjadi karena adanya gaya tarik-menarik antarpartikel dengan ukuran berbeda yang membentuk ikatan

antarpartikel material. Di sisi lain, pemadatan dengan tekanan rendah dapat menimbulkan kelemahan antarpartikel antara sekam padi dan bahan abrasif oksidasi seperti aluminium oksida dan besi oksida. Kondisi ini menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan dan mengurangi kekuatan lentur. Sekam padi yang dibakar pada suhu 600°C memiliki kandungan silika tinggi, yang termasuk ke dalam senyawa hasil oksidasi. Kekuatan lentur menurun karena fraksi volume partikel sekam padi yang lebih besar daripada aluminium oksida dan besi oksida, sehingga kandungan silika dalam komposit lebih mendominasi. Selain itu, tekanan kompresi yang tidak optimal dapat menyebabkan terbentuknya *void* yang dapat mengurangi kekuatan material.

Kandungan silika yang bersifat getas akan hancur saat pemadatan dengan tekanan tinggi. Namun, partikel bahan abrasif tidak hancur dan mampu mengisi rongga, sehingga meningkatkan kekuatan lentur. Partikel berukuran kecil yang terdistribusi merata dapat menghambat retakan mikro akibat beban lentur, sehingga dapat meningkatkan nilai kekuatan material. Struktur partikel sekam padi yang tidak hancur dalam kondisi tekanan rendah dapat berperan dalam mempertahankan kekuatan lentur. Perubahan kekuatan lentur dipengaruhi oleh ukuran partikel, distribusi partikel pengisi dan matriks, ikatan antarmuka, serta porositas.

Perbandingan kekuatan lentur penelitian ini dengan standar PT. KAI. Nilai kekuatan lentur yang terbaik dari penelitian ini adalah 7,50 MPa pada tekanan kompresi 15 MPa. Namun, jika dibandingkan dengan standar minimal yang dimiliki oleh PT. KAI sebesar 24 MPa, nilai tersebut belum memenuhi spesifikasi yang ditetapkan.

4.5 Pengujian Koefisien Gesek (CoF)

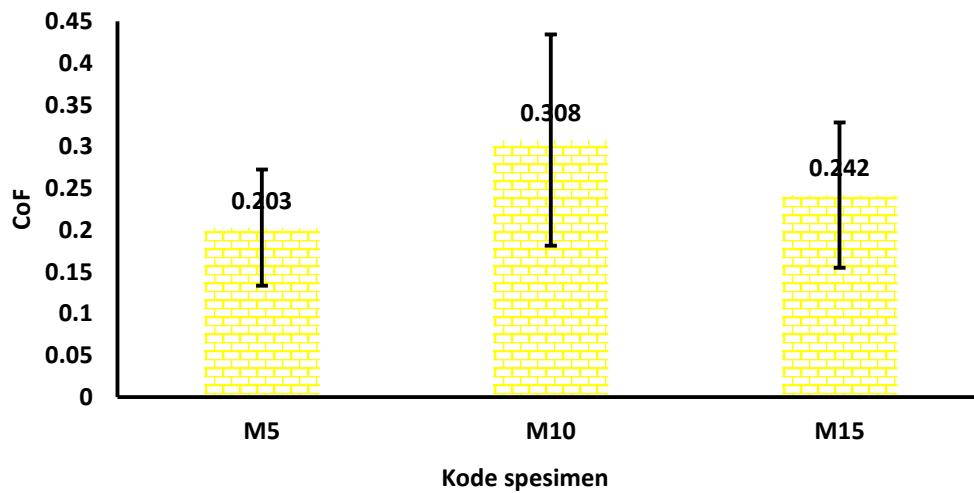


Gambar 4.9. Grafik kode spesimen M15-3.

Gambar 4.9 menunjukkan grafik dari hasil pengujian tribometer dengan metode *pin on disc*. Grafik disajikan menjadi dua titik koordinat (μ ,r). Titik koordinat sumbu x sebagai nilai koefisien gesek, sedangkan sumbu y menunjukkan nilai jarak sliding. Grafik ini digunakan untuk menentukan nilai koefisien gesek dan nilai jarak sliding pada kondisi *steady* (stabil). Masing-masing nilai ini diperlukan dalam analisis data untuk menghitung koefisien gesek dan laju keausan spesifik pada kondisi stabil.

Gambar 4.9 menunjukkan grafik hubungan antara CoF dan jarak *sliding* pada kode spesimen uji M15-3. Terdapat dua fase yang berbeda dalam perilaku gesekan yaitu fase *running in* dan fase kondisi *steady*. Fase *running in* terjadi pada awal pengujian, ketika permukaan spesimen dan pin mulai beradaptasi. Pada tahap ini, nilai CoF meningkat dan mengalami fluktuasi yang signifikan, sehingga belum stabil. Fluktuasi tersebut disebabkan oleh proses penyesuaian permukaan, seperti kekasaran, keausan dan pembentukan alur akibat gesekan. Fase tersebut berakhir pada jarak *sliding* sekitar 149 mm, di mana nilai CoF mulai menurun dan memasuki kondisi yang lebih stabil. Nilai CoF dalam fase ini masih mengalami fluktuasi, namun relatif stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa material memasuki fase *steady*. Perilaku tersebut menunjukkan konsistensi gesekan antara pin dan disk pada material komposit. Untuk analisis data, nilai

CoF yang digunakan diambil dari rata-rata pada daerah stabil yaitu antara awal hingga akhir fase *steady*.



Gambar 4.10. Grafik pengujian koefisien gesek.

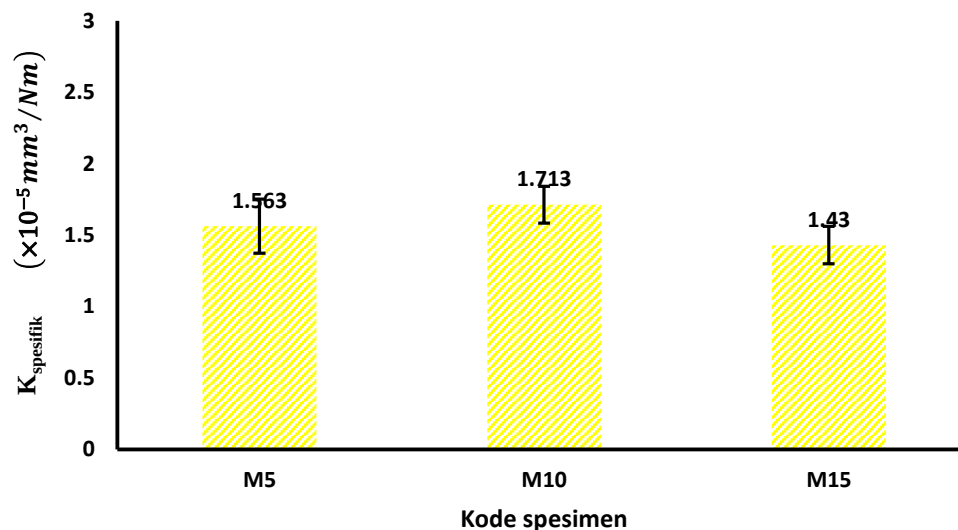
Gambar 4.10 menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompresi saat pemadatan dapat menaikkan nilai koefisien gesek. Namun, pada pemadatan tekanan kompresi 15 MPa, nilai koefisien gesek menurun. Hasil pengujian gesekan pada koefisien gesek M5, M10 dan M15 adalah $0,203 \pm 0,0697$, $0,308 \pm 0,1265$ dan $0,242 \pm 0,0871$. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Cao, dkk., yang menyatakan bahwa peningkatan tekanan kompresi dalam produksi material komposit dapat menurunkan koefisien gesek [51]. Tekanan kompresi tinggi menyebabkan partikel kecil mengisi rongga besar, sehingga menurunkan porositas dan membuat nilai koefisien gesek lebih stabil. Peningkatan tekanan kompresi saat proses pemadatan dapat memengaruhi penataan ulang partikel serbuk, sehingga menghasilkan pemadatan yang lebih optimal. Tekanan kompresi saat pemadatan menyebabkan pengisi dan pengikat tersusun ulang, sehingga memengaruhi bentuk dan ukuran pori. Tekanan kompresi cetak juga berpengaruh terhadap laju keausan spesifik dan koefisien gesek. Material gesek rem dengan partikel berukuran berbeda dapat mempengaruhi laju keausan spesifik dan koefisien gesek [52].

Ukuran partikel sekam padi yang lebih besar dapat meningkatkan kekasaran permukaan yang membuat nilai koefisien gesek meningkat dalam kondisi tekanan pemadatan rendah. Sebaliknya, tekanan kompresi tinggi dapat

merusak struktur partikel sekam padi, meskipun aliran resin dapat mengalir secara optimal, sehingga dapat mengurangi kekasaran permukaan. Kekasaran permukaan material gesekan sangat berpengaruh terhadap nilai koefisien gesek. Pada pemadatan tekanan 15 MPa, struktur sekam padi cenderung hancur. Namun, partikel yang lebih kecil seperti aluminium oksida dan besi oksida dapat mengisi permukaan material gesek secara merata. Hal ini menyebabkan nilai koefisien gesek menjadi lebih stabil, meskipun mengalami penurunan.

Perbandingan nilai koefisien gesek penelitian ini dengan standar SAE J661 dan PT. KAI. Penelitian ini menghasilkan nilai koefisien gesek yang lebih stabil yaitu 0,242 pada tekanan 15 MPa. Sementara itu, nilai koefisien gesek tertinggi diperoleh pada tekanan 10 MPa, namun ketahanan aus rendah. Koefisien gesek pada penelitian ini dapat memenuhi standar minimal dari SAE J661 dan PT.KAI sebesar 0,14 – 0,27 dan 0,14 – 0,22.

4.6 Pengujian Laju Keausan Spesifik

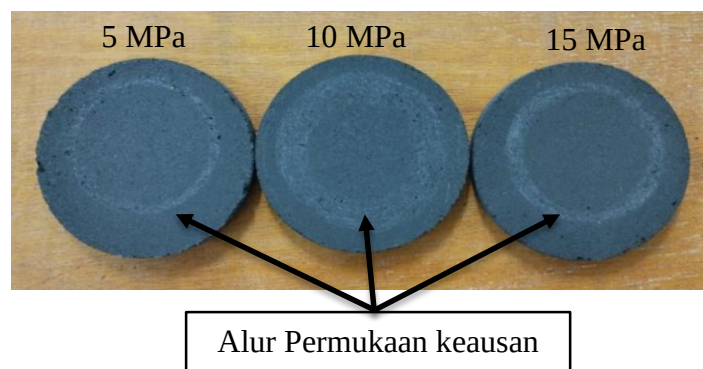


Gambar 4.11. Grafik pengujian laju keausan spesifik.

Gambar 4.11 menunjukkan hasil pengujian nilai keausan spesifik dengan peningkatan pemadatan tekanan kompresi. Nilai laju keausan spesifik material pada M5, M10 dan M15 adalah $1,563 \pm 0,1898 \text{ mm}^3/\text{Nm}$, $1,713 \pm 0,1285 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ dan $1,430 \pm 0,1313 \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Selama proses pemadatan material, peningkatan tekanan kompresi menyebabkan kenaikan laju keausan spesifik,

terutama pada tekanan 10 MPa. Hal ini disebabkan oleh aglomerasi partikel yang lebih besar dan pori-pori sekam padi yang besar. Dalam kondisi ini, partikel abrasif yang berukuran kecil tidak dapat mengisi rongga-rongga besar, sehingga porositas meningkat. Porositas yang meningkat dapat meningkatkan laju keausan spesifik sehingga mempengaruhi tingkat keausan. Selain itu, struktur pori yang besar dan terbuka dapat menghambat distribusi panas secara optimal selama pengereman, sehingga menurunkan kinerja gesekan. Partikel sekam padi yang berukuran besar cenderung memerangkap udara yang lebih banyak selama proses pemadatan. Tekanan kompresi merupakan salah satu parameter produksi material gesekan yang dapat memengaruhi terhadap laju keausan spesifik dan koefisien gesek. Penerapan tekanan kompresi memfasilitasi distribusi yang seragam dan meningkatkan sifat mekanik secara keseluruhan, serta ketahanan aus yang optimal.

Pada pemadatan tekanan tinggi, partikel abrasif berukuran kecil dapat mengisi rongga yang besar dalam struktur material, sehingga menurunkan laju keausan. Partikel kecil seperti aluminium oksida dan besi oksida berkontribusi dalam meningkatkan stabilitas gesekan yang membuat penurunan laju keausan spesifik. Peningkatan tekanan kompresi saat proses pemadatan dapat mengurangi porositas. Selain itu, partikel berukuran kecil akan lebih mudah tertanam pada permukaan material, sehingga ketahanan aus meningkat [53]. Tekanan pemadatan memiliki pengaruh utama terhadap distribusi partikel dan struktur pori pada material komposit. Pada tekanan pemadatan rendah, distribusi partikel pengisi dan matriks menjadi tidak optimal. Hal ini mengakibatkan penyebaran partikel yang buruk dan menurunkan ketahanan aus.



Gambar 4.12. Permukaan spesimen terhadap variasi pemadatan tekanan.

Gambar 4.12 menunjukkan alur permukaan keausan spesimen uji terhadap variasi pemadatan tekanan. Alur pada permukaan material terjadi akibat partikel abrasif yang menempel dan membentuk goresan pada permukaan spesimen. Proses gesekan dapat dikenali dari adanya serpihan partikel yang menempel dan membentuk lapisan pada permukaan gesekan. Pada tekanan pemadatan rendah, keausan abrasif cenderung meningkat dan menyebabkan alur pengikisan menjadi lebih besar. Sebaliknya, pemadatan tekanan tinggi seperti 15 MPa menghasilkan alur permukaan yang lebih stabil. Efek abrasif dari partikel yang terlepas selama proses pemadatan material dengan tekanan kompresi tinggi dapat mempengaruhi kinerja gesekan. Penelitian yang dilakukan oleh Sunardi, dkk., menyatakan bahwa meningkatkan tekanan cetak pada material komposit dapat menurunkan laju keausan spesifik [38].

Perbandingan nilai laju keausan spesifik penelitian ini dengan standar SAE J661. Penelitian ini memperoleh nilai laju keausan yang optimal sebesar $1,43 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ pada tekanan kompresi 15 MPa. Laju keausan spesifik yang diperoleh pada penelitian ini lebih kecil dari standar kampas rem SAE J661 sebesar $(5 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-2}) \text{ mm}^2/\text{Kg}$. Nilai standar tersebut dikonversi menjadi $5,1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ untuk menyamakan satuan dengan hasil penelitian ini.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari kesimpulan hasil penelitian ini terdapat 3 poin yaitu:

1. Peningkatan tekanan kompresi dari 5 MPa menjadi 10 MPa menurunkan nilai densitas. Sementara itu, tekanan kompresi dari 10 MPa menjadi 15 MPa dapat meningkatkan nilai densitas. Densitas material tidak selalu meningkat secara linear, namun ditentukan oleh interaksi antara tekanan, ukuran partikel, distribusi resin dan penyusun, serta porositas.
2. Peningkatan tekanan kompresi 5 MPa menjadi 10 MPa dapat menurunkan kekuatan impak, kekuatan tarik dan kekuatan lentur. Sementara itu, tekanan kompresi dari 10 MPa menjadi 15 MPa dapat meningkatkan kekuatan material. Sifat mekanik material dipengaruhi oleh distribusi matriks dan pengisi, ukuran partikel, porositas, serta kandungan silika bahan alam.
3. Peningkatan tekanan kompresi 5 MPa menjadi 10 MPa dapat meningkatkan CoF dan laju keausan spesifik. Sementara itu, tekanan kompresi dari 10 MPa menjadi 15 MPa dapat menurunkan CoF dan laju keausan spesifik. Kinerja tribologi material dipengaruhi oleh porositas, ukuran partikel, distribusi penyusun dan matriks.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

1. Melakukan pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) pada tekanan, material paduan dan metode produksi yang sama dengan penelitian ini, bertujuan untuk mengetahui struktur material dan mengetahui jumlah panas yang diserap material.

2. Melakukan partikel bahan yang berukuran seragam dan mendesain ulang proses pembakaran sekam padi, namun dapat mempertahankan silika amorf yang memiliki dampak lebih kecil dengan tekanan yang sama seperti penelitian ini.
3. Dalam menggunakan bahan paduan dari alam seperti sekam padi sangat sensitif pada proses pemadatan tekanan tinggi sehingga perlu mendesain sekam padi agar struktur partikel tidak hancur dalam kondisi tekanan tinggi.
4. Menambahkan bahan lain, terutama pada kinerja gesekan bertujuan untuk meningkatkan koefisien gesek pada proses pemadatan dengan tekanan tinggi.
5. Melakukan peningkatan pemadatan di atas 15 MPa dengan bahan dari sekam padi, aluminium oksida, besi oksida dan *hexamine* untuk mengetahui karakteristik sifat terhadap mekanik, fisik dan tribologi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. Elhafid, D. D. Susilo, and P. J. Widodo, 'Pengaruh bahan kampas rem terhadap respon getaran pada sistem rem cakram', *J. Tek. Mesin Indones.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [2] A. Imran *et al.*, 'Opportunities and challenges in the sustainable integration of natural fibers and particles in friction materials for eco-friendly brake pads', *Mech. Eng. Soc. Ind.*, vol. 4, pp. 337–367, Dec. 2024, doi: 10.31603/mesi.12271.
- [3] M. Afiefudin, R. Widodo, and R. Rusiyanto, 'Fabrication and Characterization of Asbestos Free Brake Pads Composite using Elaeocarpus Ganitrus as Reinforcement', *Automot. Exp.*, vol. 6, pp. 359–371, Aug. 2023, doi: 10.31603/ae.9367.
- [4] F. Ferdiansyah, A. S. A. Premesti, A. R. Fathichin, B. M. G. Ariani, A. H. Fahmi, and Y. W. Mirzayanti, 'Review Studi: Analisa Pemanfaatan Limbah Sekam Padi sebagai Bahan Material Maju', presented at the Prosiding SENASTITAN: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan, 2023.
- [5] A. Sellami and R. Elleuch, 'Green composite friction materials: A review of a new generation of eco-friendly brake materials for sustainability', *Environ. Eng. Res.*, vol. 29, Oct. 2023, doi: 10.4491/eer.2023.226.
- [6] S. Surid, M. A. Patwary, and M. Gafur, 'A Review on Fabrication and Physico-Mechanical Characterizations of Fiber Reinforced Biocomposites', *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 9, pp. 399–412, Sep. 2020.
- [7] M. Khafidh *et al.*, 'A study on characteristics of brake pad composite materials by varying the composition of epoxy, rice husk, Al₂O₃, and Fe₂O₃', *Automot. Exp.*, vol. 6, no. 2, pp. 303–319, 2023, doi: <https://doi.org/10.31603/ae.9121>.
- [8] C. M. R. Ghazali, H. Kamarudin, J. Shamsul, M. M. A. B. Abdullah, and A. Rafiza, 'Mechanical properties and wear behavior of brake pads produced from palm slag', *Adv. Mater. Res.*, vol. 341, pp. 26–30, 2012.
- [9] M. Suhot, M. Hassan, S. Abdul Aziz, and M. Y. Md Daud, 'Recent Progress of Rice Husk Reinforced Polymer Composites: A Review', *Polymers*, vol. 13, p. 2391, Jul. 2021, doi: 10.3390/polym13152391.
- [10] D. F. Fitriyana *et al.*, 'Pengaruh Fraksi Volume Sekam Padi, Aluminium Oksida dan Besi Oksida Terhadap Sifat Mekanik Kampas Rem dengan Matriks Epoxy', *J. Ilm. Momentum*, vol. 19, no. 2, pp. 99–105, 2023.
- [11] F. Akbulut and İ. Mutlu, 'Experimental Comparison of Manufacturing Parameters in Automotive Friction Materials', *Int. J. Automot. Sci. Technol.*, vol. 8, Mar. 2024, doi: 10.30939/ijastech..1425382.
- [12] T. Singh, A. Patnaik, R. Chauhan, I. Bíró, E. Jánosi, and G. Fekete, 'Performance Assessment of Phenolic-based Non-Asbestos Organic Brake Friction Composite Materials with Different Abrasives', *Acta Polytech. Hung.*, vol. 17, pp. 49–67, Jan. 2020, doi: 10.12700/APH.17.5.2020.5.3.
- [13] A. B. D. Nandiyanto *et al.*, 'The effects of rice husk particles size as a reinforcement component on resin-based brake pad performance: From literature review on the use of agricultural waste as a reinforcement

- material, chemical polymerization reaction of epoxy resin, to experiments', *Automot. Exp.*, vol. 4, no. 2, pp. 68–82, 2021.
- [14] W. Primaningtias, R. Sakura, Suheni, I. Syafi'i, and D. Adhyaksa, 'Asbestos-free Brake Pad Using Composite Polymer Strengthened with Rice Husk Powder', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 462, p. 012015, Jan. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/462/1/012015.
 - [15] R. D. Widodo *et al.*, 'Effect of compression molding temperature on the characterization of asbestos-free composite friction materials for railway applications.', *AIMS Mater. Sci.*, vol. 10, no. 6, 2023, doi: 10.3934/matensci.2023059.
 - [16] F. Binda, V. Oliveira, C. Fortulan, and C. dos-Santos, 'Friction elements based on phenolic resin and slate powder', *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, May 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.01.032.
 - [17] A. P. Irawan *et al.*, 'Overview of the important factors influencing the performance of eco-friendly brake pads', *Polymers*, vol. 14, no. 6, p. 1180, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14061180>.
 - [18] G. Subyakto, 'Pengaruh jenis kanvas rem dan pembebanan Pedal terhadap putaran output roda dan laju keausan Kanvas rem pada sepeda motor', *Proton*, vol. 3, no. 2, 2011.
 - [19] U. A. K. A. M. Serat, 'Penentuan parameter produksi material rem ramah lingkungan untuk aplikasi kereta api menggunakan serat tandan kosong kelapa sawit sebagai penguat', *J. Energi Dan Manufaktur Vol*, vol. 5, no. 1, pp. 1–97, 2012.
 - [20] A. A. Adem, H. Panjiar, and B. S. S. Daniel, 'The effect of nanocarbon inclusion on mechanical, tribological, and thermal properties of phenolic resin-based composites: An overview', *Eng. Rep.*, vol. 6, no. 4, p. e12861, 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/eng2.12861>.
 - [21] T. Kitinirunkul, N. Winya, and K. Prapunkarn, 'Affecting Factors of the Mechanical Properties to Phenolic/Fiber Composite', *Int. J. Mater. Metall. Eng.*, vol. 7, no. 10, pp. 766–768, 2013.
 - [22] B. Praveenkumar and S. Darius Gnanaraj, 'Case studies on the applications of phenolic resin-based composite materials for developing eco-friendly brake pads', *J. Inst. Eng. India Ser. D*, vol. 101, no. 2, pp. 327–334, 2020.
 - [23] D. Aleksendrić and A. Senatore, 'Optimization of manufacturing process effects on brake friction material wear', *J. Compos. Mater.*, vol. 46, Nov. 2012, doi: 10.1177/0021998311432489.
 - [24] A. K. Sharma and B. Bhattacharya, 'Engineering design of sustainable aluminium composite material with rice husk core', *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 14, no. 6, pp. 1372–1385, 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1998934>.
 - [25] S. Sembiring, 'Potensi Silika Sekam sebagai bahan keramik refraktori tahan pada suhu tinggi', 2017.
 - [26] A. G. Dylan, S. Sugiyarto, A. Wanto, A. Budi, and S. Sukanto, 'Pembuatan Komposit Matrik Aluminium Diperkuat Silicon Carbida Dan Rice Husk Ash Dengan Metode Metalurgi Serbuk', *LONTAR J. Tek. Mesin Undana*, vol. 10, no. 02, pp. 61–68, 2023.
 - [27] D. Carlevaris, M. Leonardi, G. Straffelini, and S. Gialanella, 'Design of a friction material for brake pads based on rice husk and its derivatives',

- Wear*, vol. 526, p. 204893, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204893>doi.org/10.1016/j.wear.2023.204893.
- [28] H. Tong, L. Qian, F.-G. Leng, and T.-L. Qiao, 'Research progress of rice husk ash in solidified soil', presented at the E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 2021, p. 02018. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129302018>.
 - [29] V. Tomášek, G. Kratošová, R. Yun, Y. Fan, and Y. Lu, 'Effects of alumina in nonmetallic brake friction materials on friction performance', *J. Mater. Sci.*, vol. 44, pp. 266–273, Jan. 2009, doi: 10.1007/s10853-008-3041-z.
 - [30] R. Talib, M. H. Basri, N. Ismail, and R. Rabilah, 'Influence of iron oxide powders on braking performance of brake friction materials', *J. Mech. Eng. JMEchE*, no. 1, pp. 129–142, 2017.
 - [31] I. Syafa'at, 'Tribologi, Daerah Pelumasan Dan Keausan', *J. Momentum UNWAHAS*, vol. 4, no. 2, 2008, doi: 10.36499/jim.v4i2.611.
 - [32] Assoc. Prof. N. Elzayady and R. Elsoeudy, 'Microstructure and Wear Mechanisms Investigation on The Brake Pad', *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 11, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.02.045.
 - [33] A. Tsujimoto *et al.*, 'Wear of resin composites: Current insights into underlying mechanisms, evaluation methods and influential factors', *Jpn. Dent. Sci. Rev.*, vol. 54, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jdsr.2017.11.002.
 - [34] P. J. A. Y. Putra, 'Studi Eksperimen Dan Analisa Pengaruh Magnesium Oksida Terhadap Wear Rate Dan Coefficient Of Friction Pada Komposit Resin Epoxy Dan Serbuk Abu Sekam Padi', 2021.
 - [35] M. Khafidh, M. A. M. Kasim, and Y. Purwaningrum, 'Analisis Sifat Mekanik dan Tribologi pada Cakram Baru dan Bekas', *ROTASI*, vol. 25, no. 4, pp. 14–22.
 - [36] E. J. Barbero, 'Fabric-Reinforced Composites', in *Introduction to Composite Materials Design*, CRC Press, 2017, pp. 303–350.
 - [37] P. Gai, A. Adisa, B. Mohammed, and A. Tokan, 'Physico-mechanical Properties of Basalt-based Brake Pad as Alternative to Ceramics Brake pad', Apr. 2023, doi: 10.36348/sjet.2022.v07i01.00X.
 - [38] Gita Novian Hermana and Widyastuti Widyastuti, 'Kompaksi Terhadap Densitas Dan Kekerasan Pada Komposit W-Cu Untuk Proyektil Peluru Dengan Proses Metalurgi Serbuk', *J. Tek. ITS*, vol. 3, no. 1, 2014, doi: 10.12962/j23373539.v3i1.5857.
 - [39] S. Sunardi, S. Hamdi, I. Saefuloh, A. Sudrajad, S. Ula, and M. Fawaid, 'Perilaku Laju Keausan dan Kekerasan Komposit Epoksi yang Diperkuat dengan Serat Gelas dan Partikel Bambu', *J. Tek. Mesin*, vol. 21, no. 2, pp. 64–72, 2024.
 - [40] S. JT, T. Oladokun, A. Adebayo, G. Adeyemi, and J. Abere, 'Effect of Particle Size on Mechanical Properties and Wear Behaviour of Brake Lining Produced from Waste Material: Sawdust', 2019.
 - [41] G. Melvin, K. F. Chai, and F. M. Tamiri, 'Characterization of carbonized waste materials: Rice husk and saw dust', presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019, p. 012002.

- [42] C. Nardon, S. W., M. Husni, and M. Amran, 'Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars', *Waste Manag. Res. J. Int. Solid Wastes Public Clean. Assoc. ISWA*, vol. 32, Mar. 2014, doi: 10.1177/0734242X14525822.
- [43] X. He, Z. Pan, and H. Li, 'A Study on the Compaction Behavior and Parameter Sensitivity of Curing Phenolic Thermal Protection Material Strips', *Polymers*, vol. 17, p. 1045, Apr. 2025, doi: 10.3390/polym17081045.
- [44] A. Ghosh and S. Chatterjee, 'Effect of Al₂O₃ content and process variables on structure and properties of Al-Al₂O₃ compacts', *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 121–128, 2014.
- [45] A. THULE and R. Shanks, *Natural fibre composites: materials, processes and properties*. Woodhead Publishing, 2014.
- [46] N. Nakazato, A. Kohyama, and Y. Kohno, 'Effects of pressure during preform densification on SiC/SiC composites', 2013.
- [47] T. Oladokun, J. T. Stephen, A. Adebayo, and D. Adeyemi, 'Effect of Moulding Pressure on Brake Lining Produced from Industrial Waste Material: Sawdust', *Eur. J. Eng. Res. Sci.*, vol. 4, pp. 62–68, Jun. 2019, doi: 10.24018/ejers.2019.4.6.1368.
- [48] K. Mohammed, R. Zulkifli, M. F. M. Tahir, and T. S. Gaaz, 'A study of mechanical properties and performance of bamboo fiber/polymer composites', *Results Eng.*, vol. 23, p. 102396, 2024.
- [49] X. Zhang *et al.*, 'Effects of pressure on densification behaviour, microstructures and mechanical properties of boron carbide ceramics fabricated by hot pressing', *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 8, pp. 6345–6352, 2017.
- [50] T. Li, Z. Song, X. Yang, and J. Du, 'Influence of processing parameters on the mechanical properties of peek plates by hot compression molding', *Materials*, vol. 16, no. 1, p. 36, 2022.
- [51] H. A. Sallal, A. A. Abdul-Hamead, and F. M. Othman, 'Effect of nano powder (Al₂O₃-CaO) addition on the mechanical properties of the polymer blend matrix composite', *Def. Technol.*, vol. 16, no. 2, pp. 425–431, 2020.
- [52] Y. Cao *et al.*, 'Effect of the mould pressure on tribological property of carbon/phenolic resin composites', presented at the 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation, Atlantis Press, 2015, pp. 1812–1815.
- [53] W. Lv, T. Wang, Q. Wang, K. K. Yap, F. Song, and C. Wang, 'Tribological and Mechanochemical properties of nanoparticle-filled polytetrafluoroethylene composites under different loads', *Polymers*, vol. 16, no. 7, p. 894, 2024.
- [54] A. Darmawan, P. Purboputro, and B. Febriantoko, 'The aluminum powder size' effect on rice plant fiber reinforced composite to hardness, wear and coefficient of friction of brake lining', *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 722, p. 012002, Jan. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/722/1/012002.

LAMPIRAN

a. Hasil Pengujian Densitas

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Diameter (mm)	massa (g)	tebal (mm)	Volume (mm ³)
M5-1	5	60	25,587	7,57	21.403,67
M5-2			25,274	7,54	21.318,85
M5-3			26,087	7,62	21.545,04
M10-1	10		24,541	7,60	21.488,49
M10-2			26,065	7,67	21.686,41
M10-3			25,729	7,68	21.714,69
M15-1	15		25,906	7,51	21.234,02
M15-2			25,392	7,57	21.403,67
M15-3			25,988	7,57	21.403,67

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Densitas g/cm ³	Standar deviasi
M5-1	5	1,1954	0,0127
M5-2		1,1855	
M5-3		1,2108	
M10-1	10	1,1421	0,0308
M10-2		1,2019	
M10-3		1,1849	
M15-1	15	1,2200	0,0180

M15-2		1,1863	
M15-3		1,2142	

Untuk mendapatkan nilai densitas dari hasil pengujian menggunakan persamaan 3.5 dan 3.6 sebagai contoh perhitungan nilai densitas mengambil data pengukuran pada kode spesimen M5-2 sebagai berikut :

Diket : m = 25,274 g

D = 60 mm

t = 7,54 mm

Volume spesimen

Densitas spesimen

$$V_s = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 t$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

$$= 3,14 \left(\frac{60 \text{ mm}}{2} \right)^2 (7,54 \text{ mm})$$

$$= \frac{25,274 \text{ g}}{21,30804 \text{ cm}^3}$$

$$= 21.308,04 \text{ mm}^3$$

$$= 1,1855 \text{ g/cm}^3$$

$$= 21,30804 \text{ cm}^3$$

b. Hasil Pengujian Impak

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Diametr (mm)	Tebal (mm)	Sudut awal(°)	Sudut akhir(°)	Energi serap(J)	A (mm ²)
M5-1	5	10	9,99	156	154	0,1221	79,9
M5-2			9,54		154	0,1221	75,4
M5-3			9,76		154,5	0.088	77,6
M10-1	10		9,67		154	0,1221	76,7
M10-2			9,48		154,5	0.0888	74,8
M10-3			9,18		154,5	0.0888	71,8
M15-1	15		9,55		154	0,1221	75,5
M15-2			9,45		154,5	0.0888	74,5
M15-3			9,82		153	0.1835	78,2

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Harga Impak (J/mm ²)	Standar deviasi
M5-1	5	0,0015	0,000265
M5-2		0,0016	
M5-3		0,0011	
M10-1	10	0,00016	0,000231
M10-2		0,0012	
M10-3		0,0012	
M15-1	15	0,0016	0,000557
M15-2		0,0012	
M15-3		0,0023	

Untuk mendapatkan harga impact (HI) dari hasil pengujian menggunakan persamaan 3.7 dan 3.8 sebagai contoh perhitungan nilai harga impact mengambil data pengukuran pada kode spesimen M5-2 sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{Diket: } m &= 1 \text{ Kg} & l &= 10 \text{ mm} \\
 g &= 9,81 \text{ m/s}^2 & t &= 9,54 \text{ mm} \\
 \lambda &= 0,83 \text{ m} & \alpha &= 156^\circ \\
 \beta &= 154^\circ
 \end{aligned}$$

Energi serap material (W)

$$\begin{aligned}
 W &= mg\lambda(\cos \beta - \cos \alpha) \\
 &= (1 \text{ Kg})(9,81 \text{ m/s}^2)(\cos(154^\circ) - \cos(156^\circ)) \\
 &= (1 \text{ Kg})(9,81 \text{ m/s}^2)(0,899 - (-0,914)) \\
 &= 0,1221 \text{ Kg.m/s}^2 \\
 &= 0,1221 \text{ J}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l &= \text{Tebal pengukuran - kedalaman takikan} \\
 &= 9,54 \text{ mm} - 2 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Harga impact (HI)

$$\begin{aligned}
 HI &= \frac{W}{A} \\
 &= \frac{0,1221 \text{ J}}{75,4 \text{ mm}^2} \\
 &= 0,0016 \text{ J/mm}^2
 \end{aligned}$$

$$A = 7,54 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$$

c. Hasil Pengujian Tarik

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas Area (mm ²)	Beban (kgf)	Beban (N)
M5-1	5	6,37	3,73	23,7689	4,499	44,1201
M5-2		6,44	3,90	25,1375	8,220	80,6107
M5-3		6,13	4,03	24,7378	5,878	57,6435
M10-1	10	6,28	3,58	22,4943	1,948	19,1034
M10-2		6,38	3,45	21,9897	4,864	47,6995
M10-3		6,38	3,65	23,2657	5,310	52,0733
M15-1	15	6,29	3,61	22,7399	4,723	46,3168
M15-2		6,42	3,45	22,1704	6,193	60,7326
M15-3		6,42	3,31	22,2288	8,065	79,0906

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Kekuatan tarik (N/mm ²)	Standar deviasi
M5-1	5	1,857	0,685
M5-2		3,208	
M5-3		2,331	
M10-1	10	0,850	0,783
M10-2		2,170	
M10-3		2,239	
M15-1	15	2,037	0,849
M15-2		2,740	

M15-3		3,727	
-------	--	-------	--

Untuk mendapatkan Kekuatan tarik (σ) dari hasil pengujian menggunakan persamaan 3.9 sebagai contoh perhitungan nilai harga impak mengambil data pengukuran pada kode spesimen M5-2 sebagai berikut :

$$\text{Diket : } l = 6,44 \text{ mm}$$

$$F = 80,6107 \text{ N}$$

$$t = 3,90 \text{ mm}$$

Luas area

Kekuatan tarik

$$A = 6,44 \text{ mm} \times 3,90 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$= 25,1375 \text{ mm}^2$$

$$= \frac{80,6107 \text{ N}}{25,1375 \text{ mm}^2}$$

$$= 3,208 \text{ N/mm}^2$$

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Panjang awal (mm)	Perubahan panjang (mm)	Perpanjangan putus (%)	Standar deviasi
M5-1	5	50	50,10	0,20	0,231
M5-2			50,32	0,64	
M5-3			50,27	0,54	
M10-1	10		50,06	0,12	0,212
M10-2			50,27	0,54	
M10-3			50,14	0,28	
M15-1	15		50,16	0,32	0,081
M15-2			50,23	0,46	
M15-3			50,16	0,32	

Untuk mendapatkan perpanjangan putus (ϵ) dari hasil pengujian menggunakan persamaan 3.10 sebagai contoh perhitungan nilai harga impak mengambil data pengukuran pada kode spesimen M5-2 sebagai berikut :

$$\text{Diket : } L_0 = 50 \text{ mm}$$

$$L_1 = 50,32 \text{ mm}$$

Perpanjangan putus

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \\ &= \frac{0,32 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} \times 100\% \\ &= 0,64\%\end{aligned}$$

Selisih perpanjangan putus

$$\begin{aligned}\Delta L &= 50,32 \text{ mm} - 50 \text{ mm} \\ &= 0,32 \text{ mm}\end{aligned}$$

Kode Spesimen	Modulus Elastisitas (GPa)	Rata-rata	Standar deviasi
M5-1	1,5906	1,429	0,519
M5-2	1,8476		
M5-3	0,8485		
M10-1	1,2857	1,215	0,072
M10-2	1,1409		
M10-3	1,2173		
M15-1	1,5865	1,672	0,5
M15-2	2,2898		
M15-3	1,1477		

d. Hasil Pengujian lentur

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Panjang span (mm)	Defleksi (mm)	Gaya max (N)
M5-1	5	12,70	3,00	51,00	0,74	14,44
M5-2			3,25		0,71	10,68
M5-3			3,20		0,78	10,83

M10-1	10		3,15		0,54	10,98
M10-2			3,20		0,57	11,13
M10-3			3,15		0,68	9,77
M15-1	15		3.15	0.73	10.38	
M15-2			3.10	0.52	11.73	
M15-3			3.15	0.76	14.14	

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Kekuatan lentur (MPa)	Standar deviasi
M5-1	5	8,49	1,323
M5-2		6,06	
M5-3		6,37	
M10-1	10	6,66	0,394
M10-2		6,55	
M10-3		5,93	
M15-1	15	8,86	1,287
M15-2		6,30	
M15-3		7,35	

Untuk mendapatkan kekuatan lentur (σ_f) dari hasil pengujian menggunakan persamaan 3.12 sebagai contoh perhitungan nilai harga impak mengambil data pengukuran pada kode spesimen M5-2 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Diket : } F_{\max} &= 10,68 \text{ N} \\ L &= 51,00 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= 3,25 \text{ mm} \\ w &= 12,70 \text{ mm} \end{aligned}$$

Momen lentur maksimum

Section modulus

$$M_{\max} = \frac{F_{\max} \times L}{4}$$

$$Z = \frac{bh^2}{6}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(10,64 \text{ N})(51 \text{ mm})}{4} &= \frac{(12,70 \text{ mm})(3,25 \text{ mm})^2}{6} \\
 &= 135,66 \text{ N.mm} &= 22,36 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Tegangan lentur/kekuatan lentur

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{M_{\max}}{Z} \\
 &= \frac{135,66 \text{ N.mm}}{22,36 \text{ mm}^3} \\
 &= 6,06 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

e. Hasil laju keausan spesifik

Kode spesimen	Tekanan (MPa)	Massa sebelum uji (g)	Massa setelah uji (g)	Densitas (g/cm ³)	Jarak sliding (m)	Volume aus (mm ³)
M5-1	5	25,587	25,570	1,1954	9.711	14,22
M5-2		25,275	25,263	1,1855	7.216,5	10,12
M5-3		26,087	26,053	1,2108	15.410,6	28,08
M10-1	10	24,541	24,507	1,1421	17.281,3	29,77
M10-2		26,065	26,017	1,2019	21.407,5	39,94
M10-3		25,729	25,693	1,1849	19.617,3	30,38
M15-1	15	25,906	25,877	1,2200	17.385,4	23,77
M15-2		25,392	25,376	1,1863	18.276,2	13,49
M15-3		25,988	25,951	1,2142	18.856,7	30,47

Kode spesimen	Tekanan (MPa)	Laju keausan spesifik ($\times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$)	Standar deviasi
M5-1	5	1,464	0,1898
M5-2		1,402	
M5-3		1,823	
M10-1	10	1,724	0,1285
M10-2		1,864	
M10-3		1,550	
M15-1	15	1,369	0,1313
M15-2		0,738	
M15-3		1,612	

Untuk mendapatkan nilai laju keausan spesifik (mm^3/Nm) dari hasil pengujian menggunakan persamaan 3.13 sampai 3.17 sebagai contoh diambil pada kode spesimen M5-2 sebagai berikut :

$$\text{Diket : } m_{\text{aus}} = 0,012 \text{ g} \quad r = 72.165 \text{ mm}$$

$$\rho_s = 1,1514 \text{ g/cm}^3 \quad F_n = 10 \text{ N}$$

Volume aus (V_{aus})

$$\begin{aligned}
 V_{\text{aus}} &= \frac{m_{\text{aus}}}{\rho_{\text{spesimen}}} \\
 &= \frac{0,009 \text{ g}}{1,1514 \text{ g/cm}^3} \\
 &= 7,82 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \\
 &= 7,82 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Laju keausan spesifik (K_{spesifik})

$$\begin{aligned}
 K_{\text{spesifik}} &= \frac{V_{\text{aus}}}{F_n \times r} \\
 &= \frac{7,82 \text{ mm}^3}{10 \text{ N} \times 72.165 \text{ mm}} \\
 &= 1,402 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}
 \end{aligned}$$

f. Hasil Pengujian Koefisien Gesek

Kode Spesimen	Tekanan (MPa)	Gaya gesek (N)	CoF	Standar deviasi
M5-1	5	1,522	0,1522	0,0697
M5-2		1,750	0,1750	
M5-3		2,868	0,2868	
M10-1	10	1,447	0,1447	0,1265
M10-2		3,178	0,3178	
M10-3		4,616	0,4616	
M15-1	15	3,502	0,3502	0,0871
M15-2		2,245	0,2245	
M15-3		1,526	0,1526	

Untuk mendapatkan nilai koefisien gesek (Cof) dari hasil pengujian menggunakan persamaan 3.18 sebagai contoh diambil pada kode spesimen M5-2 sebagai berikut :

Diket : $F_n = 10 \text{ N}$

$f_g = 1,75 \text{ N}$

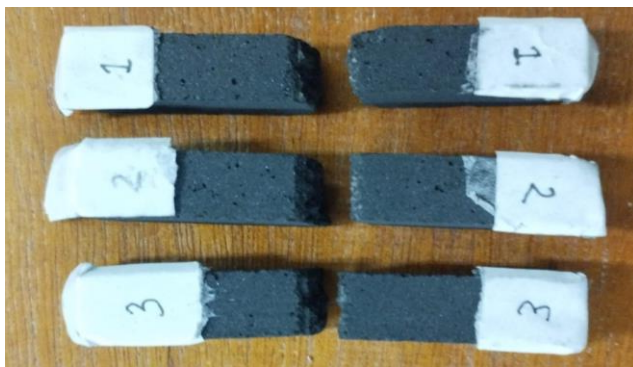
Koefisien gesek

$$\begin{aligned}
 \mu &= \frac{f_g}{F_n} \\
 &= \frac{1,75 \text{ N}}{10 \text{ N}} \\
 &= 0,175
 \end{aligned}$$

g. Gambar spesimen uji impak



Spesimen sebelum pengujian.



Spesimen impak 5 MPa setelah di uji.



Spesimen impak 10 MPa setelah di uji.



Spesimen impak 15 MPa setelah di uji.

h. Gambar spesimen uji tarik



Spesimen uji tarik sebelum di uji.



Spesimen uji tarik 5 MPa setelah di uji.

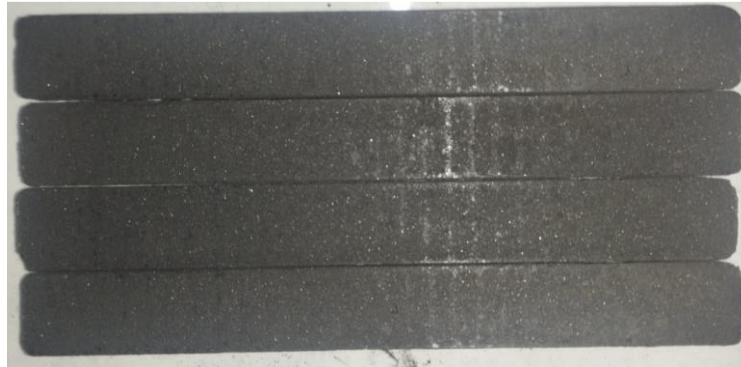


Spesimen uji tarik 10 MPa setelah di uji.



Spesimen uji tarik 15 MPa setelah di uji.

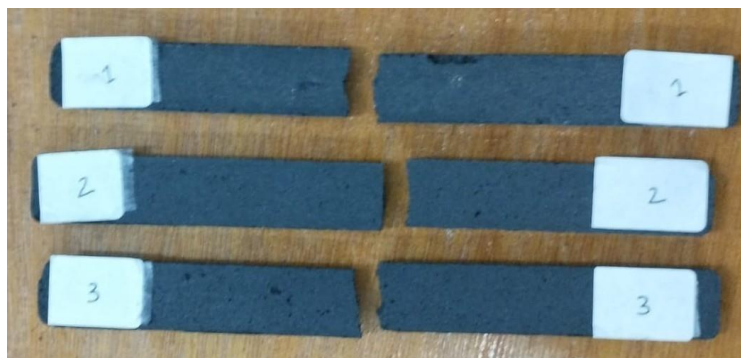
i. Gambar spesimen uji lentur



Spesimen uji lentur sebelum di uji.



Spesimen uji lentur 5 MPa setelah di uji.

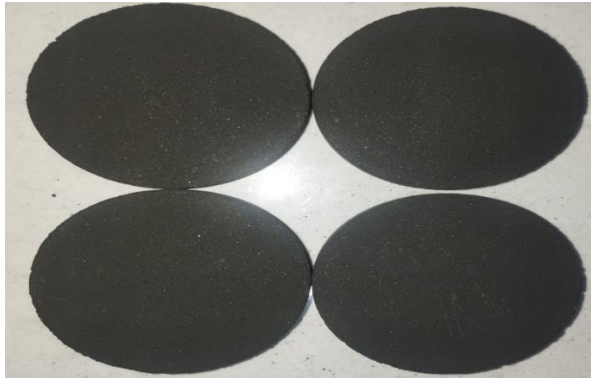


Spesimen uji lentur 10 MPa setelah di uji.



Spesimen uji lentur 15 MPa setelah di uji.

j. Gambar spesimen uji gesekan dan keausan



Spesimen uji gesekan dan keausan sebelum di uji.



Spesimen uji gesekan dan keausan 5 MPa setelah di uji.



Spesimen uji gesekan dan keausan 10 MPa setelah di uji.



Spesimen uji gesekan dan keausan 15 MPa setelah di uji.

k. Gambar spesimen uji yang cacat

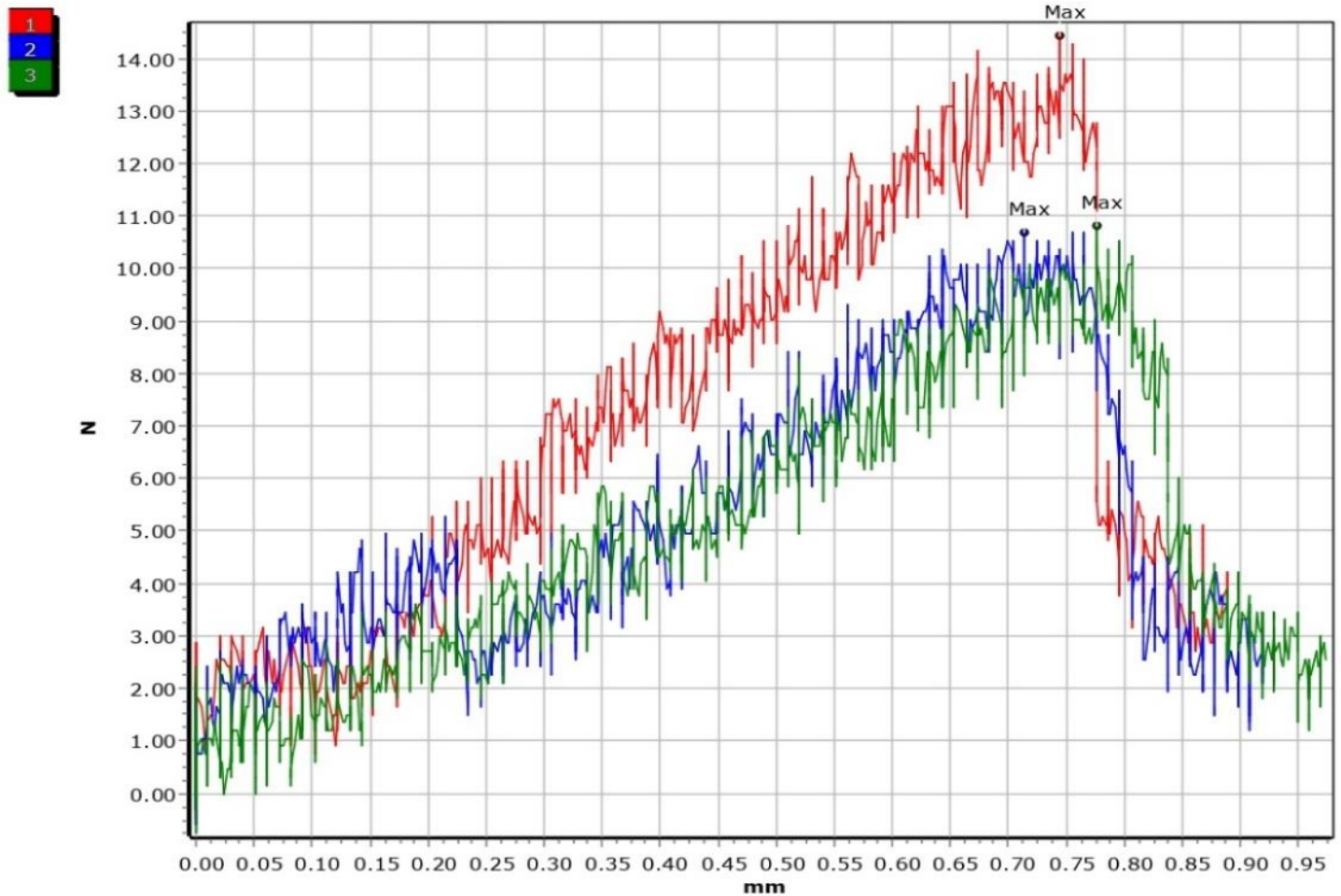




UNIVERSITAS GADJAH MADA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI
MATERIALS ENGINEERING LABORATORY

Test Date: 5/14/2025

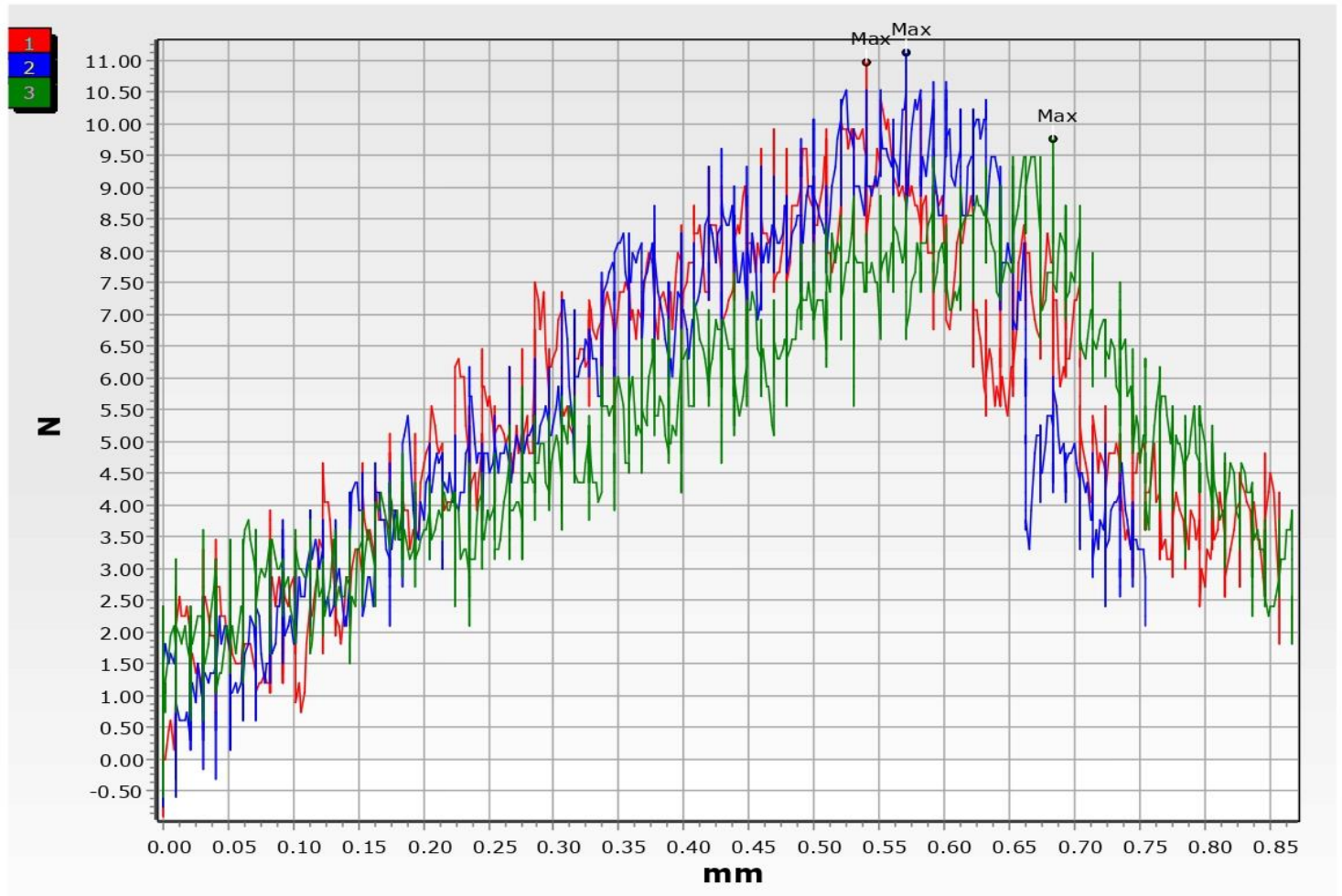
Test Num.	Material	Width (mm)	Thickness (mm)	Span (mm)	Displacement (mm)	Max. Force (N)	Bending Stress (MPa)
1	MFT5MPA-1	12.70	3.20	51.00	0.74	14.44	8.49
2	MFT5MPA-2	12.70	3.25	51.00	0.71	10.68	6.06
3	MFT5MPA-3	12.70	3.20	51.00	0.78	10.83	6.37
Average	0.0000	12.70	3.22	51.00	0.74	11.98	6.97



UNIVERSITAS GADJAH MADA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI
MATERIALS ENGINEERING LABORATORY

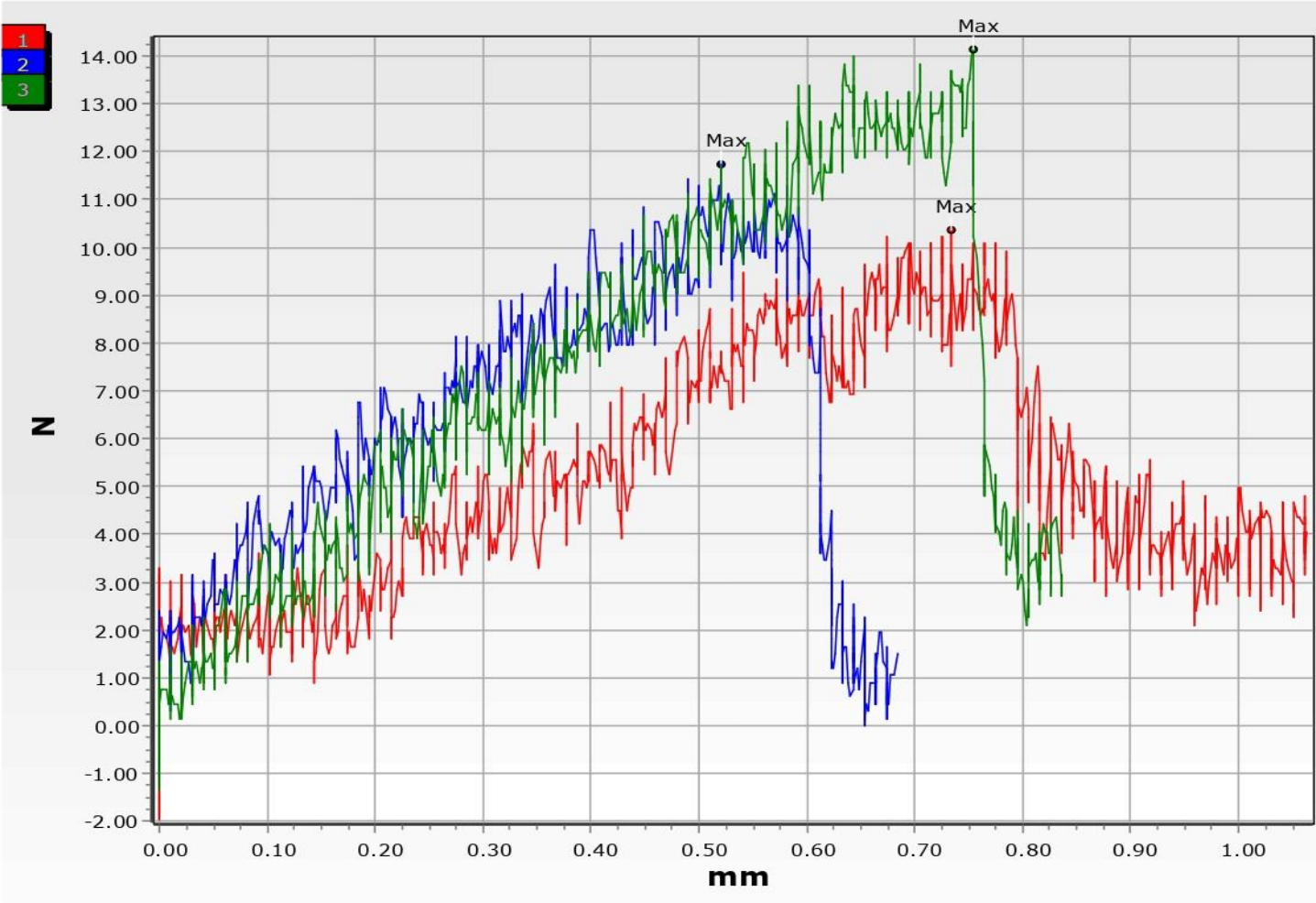
Test Date: 6/19/2025

Test Num.	Material	Width (mm)	Thickness (mm)	Span (mm)	Displacement (mm)	Max. Force (N)	Bending Stress (MPa)
1	FMT10MPA-1	12.70	3.15	51.00	0.54	10.98	6.66
2	FMT10MPA-2	12.70	3.20	51.00	0.57	11.13	6.55
3	FMT10MPA-3	12.70	3.15	51.00	0.68	9.77	5.93



Test Date: 5/14/2025

Test Num.	Material	Width	Thickness	Span	Displacement	Max. Force	Bending Stress
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)
1	FMT15MPA-1	12.70	3.15	51.00	0.73	10.38	8.86
2	FMT15MPA-2	12.70	3.10	51.00	0.52	11.73	6.30
3	FMT15MPA-3	12.70	3.15	51.00	0.76	14.14	7.35



No Pengujian : 555/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25
Test Report Number

Halaman: 1 dari 1
Page: 1 of 1

SURAT TANDA UJI

(TEST RESULT CERTIFICATE)

Nomor Pengujian
Test Report Number : 555/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25

Bahan / Barang
Material/Commodity : Komposit Friction Materials

Kondisi Contoh
Sample Condition : Baik, 3pcs spesimen

Merek / Kode
Brand/Code : 5 MPa

Diterima Tanggal
Date of entry : 25 April 2025

Mulai Diuji Tanggal
Starting date of analysis : 28 April 2025

Dibuat untuk
Name and Address of Client : Akhmad Fauzi
Jl. Kaliurang km 14.5, Kimpulan I

Nomor BAPC
BAPC Number : -, -

Nomor Contoh
Sample Number : -

Hasil Pengujian
Test Result : Sebagai berikut / As follows

No	Parameter Uji	Hasil Uji	Metode Uji
1	Kekuatan tarik, N/mm ²	1,86 ; 3,21 ; 2,33	ASTM D 638 – 14 ; Dumble type IV
2	Perpanjangan Putus, %	0,20 ; 0,64 ; 0,54	ASTM D 638 – 14 ; Dumble type IV

Yogyakarta, 09 Mei 2025
Penguji Mutu Barang Ahli Muda



Dr. Muhammad Sholeh, M.Eng
NIP. 197906112002121001

Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang telah diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik (BSrE), Badan Siber dan Sandi Negara

F-UJI-09

Rev. 2/0

No Pengujian : 556/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25
Test Report Number

Halaman: 1 dari 1
Page: 1 of 1

SURAT TANDA UJI
(TEST RESULT CERTIFICATE)

Nomor Pengujian
Test Report Number : 556/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25

Bahan / Barang
Material/Commodity : Komposit Friction Materials

Kondisi Contoh
Sample Condition : Baik, 3pcs spesimen

Merek / Kode
Brand/Code : 10 MPa

Diterima Tanggal
Date of entry : 25 April 2025

Mulai Diuji Tanggal
Starting date of analysis : 28 April 2025

Dibuat untuk
Name and Address of Client : **Akhmad Fauzi**
Jl. Kaliurang km 14.5, Kimpulan I

Nomor BAPC
BAPC Number : -, -

Nomor Contoh
Sample Number : -

Hasil Pengujian
Test Result : Sebagai berikut / As follows

No	Parameter Uji	Hasil Uji	Metode Uji
1	Kekuatan tarik, N/mm ²	0,85 ; 2,17 ; 2,24	ASTM D 638 – 14 ; Dumble type IV
2	Perpanjangan Putus, %	0,12 ; 0,54 ; 0,28	ASTM D 638 – 14 ; Dumble type IV

Yogyakarta, 09 Mei 2025
Penguji Mutu Barang Ahli Muda



Dr. Muhammad Sholeh, M.Eng
NIP. 197906112002121001

Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang telah diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik (BSrE), Badan Siber dan Sandi Negara

No Pengujian : 557/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25
Test Report Number

Halaman: 1 dari 1
Page: 1 of 1

SURAT TANDA UJI
(TEST RESULT CERTIFICATE)

Nomor Pengujian
Test Report Number : 557/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25

Bahan / Barang
Material/Commodity : Komposit Friction Materials

Kondisi Contoh
Sample Condition : Baik, 3pcs spesimen

Merek / Kode
Brand/Code : 15 MPa

Diterima Tanggal
Date of entry : 25 April 2025

Mulai Diuji Tanggal
Starting date of analysis : 28 April 2025

Dibuat untuk
Name and Address of Client : Akhmad Fauzi
Jl. Kaliurang km 14.5, Kimpulan I

Nomor BAPC
BAPC Number : -, -

Nomor Contoh
Sample Number : -

Hasil Pengujian
Test Result : Sebagai berikut / As follows

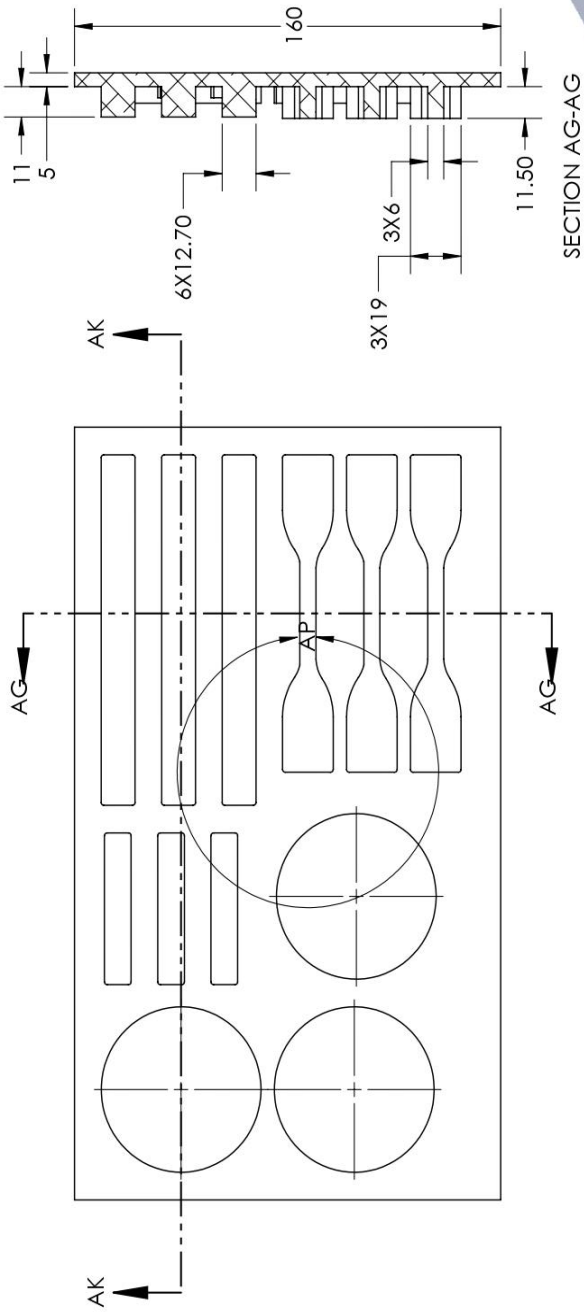
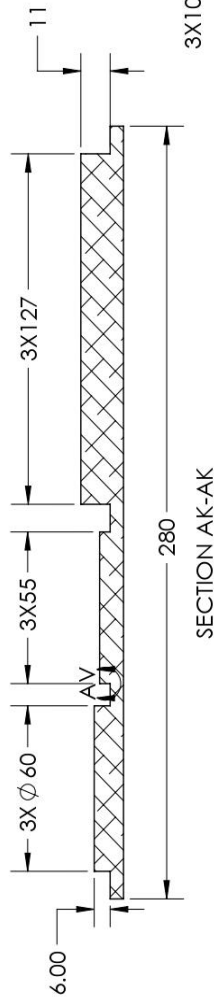
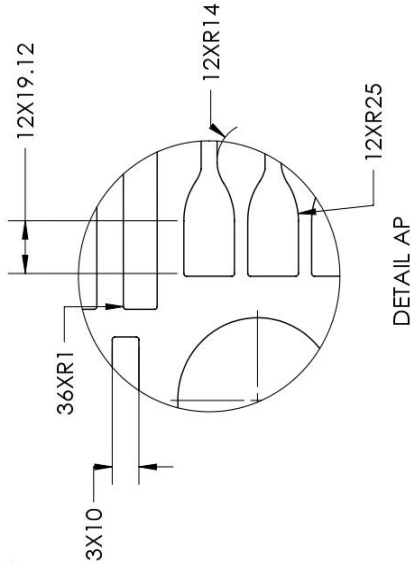
No	Parameter Uji	Hasil Uji	Metode Uji
1	Kekuatan tarik, N/mm ²	2,04 ; 2,74 ; 3,73	ASTM D 638 – 14 ; Dumble type IV
2	Perpanjangan Putus, %	0,32 ; 0,46 ; 0,32	ASTM D 638 – 14 ; Dumble type IV

Yogyakarta, 09 Mei 2025
Penguji Mutu Barang Ahli Muda



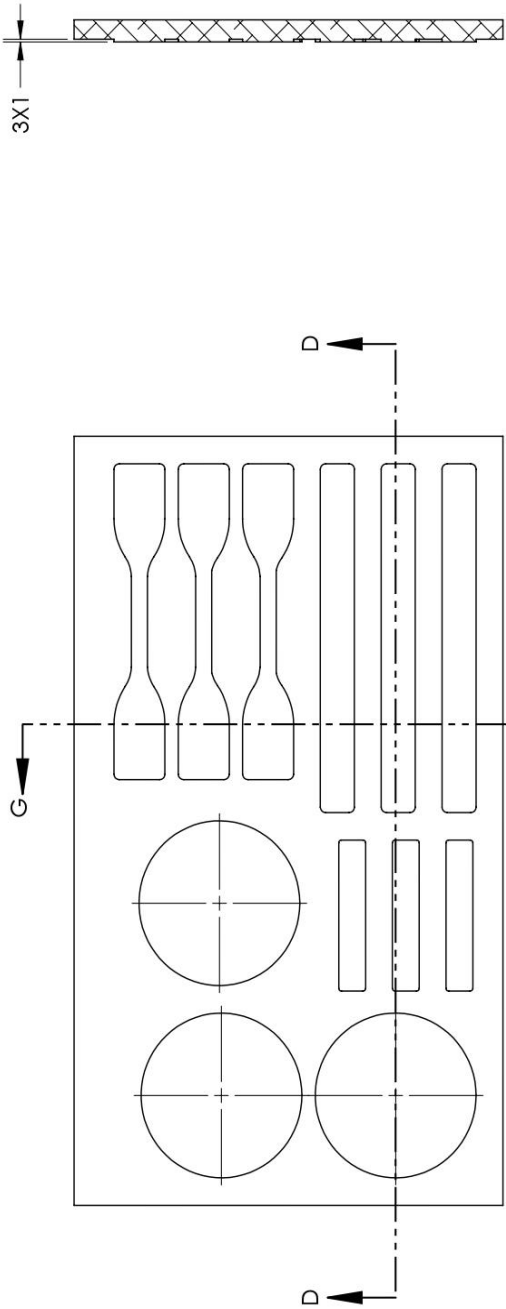
Dr. Muhammad Sholeh, M.Eng
NIP. 197906112002121001

Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang telah diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik (BSrE), Badan Siber dan Sandi Negara

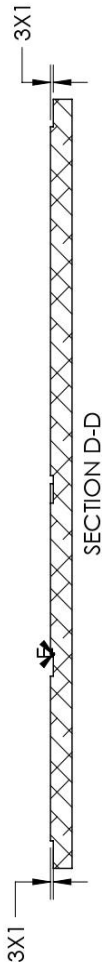


DETAIL AV
SCALE 1 : 1

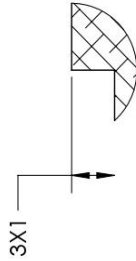
	Skala : 2:1	Digambar : Akhmad Fauzi	Keterangan :	
	Satuan Ukuran : Milimeter	Project : Drawing Spesimen Uji Tarik		
	Tanggal : 14/04/2025	Diperiksa : Dr. Ir. Muhammad Khalifah, S.T., M.T.		
Teknik Mesin UII			Project Tugas Akhir	NO. 01
				A3



SECTION G-G

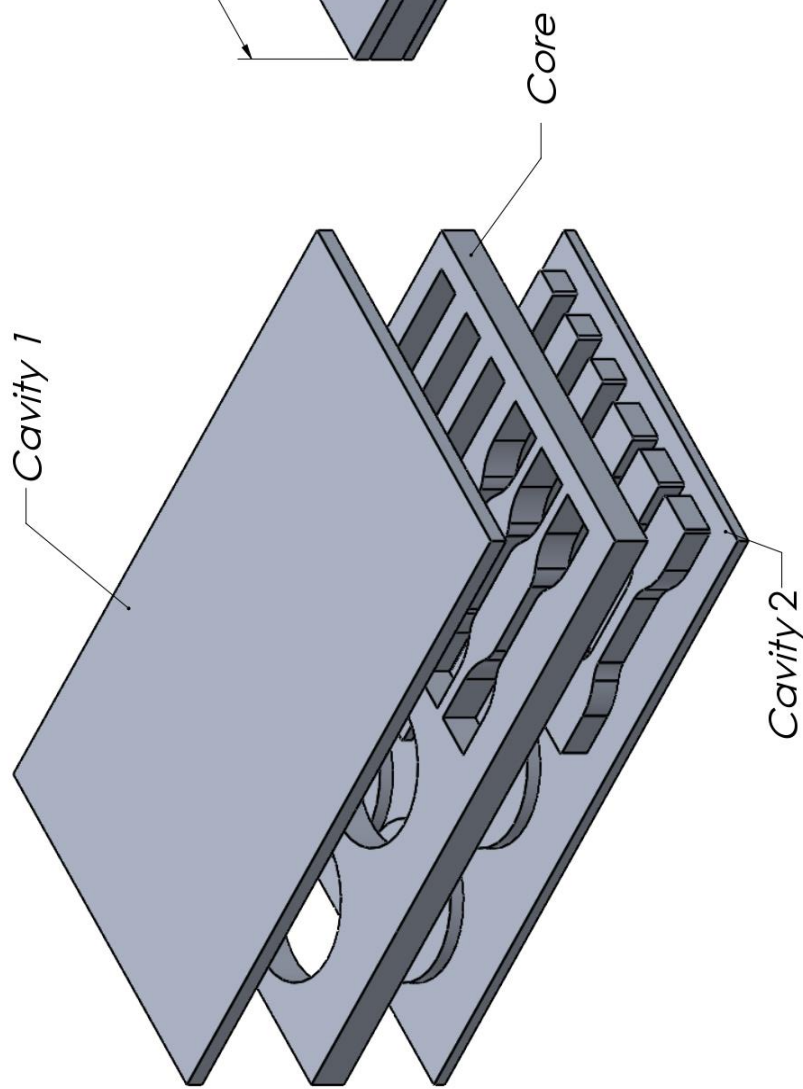


SECTION D-D



DETAIL E
SCALE 8 : 1

	Skala : 2:1	Digambar : Akhmad Fauzi	Keterangan :	
	Satuan Ukuran : Milimeter	Project : Drawing Spesimen Uji Tarik		
	Tanggal : 14/04/2025	Diperiksa : Dr. Ir. Muhammad Khalifah, S.T., M.T.	NO. 01	A3
Teknik Mesin UJI		Project Tugas Akhir		



	Skala : 2:1	Digambar : Akhmad Fauzi	Keterangan :	
	Satuan Ukuran : Milimeter	Project : Drawing Spesimen Uji Tarik		
	Tanggal : 14/04/2025	Diperiksa : Dr. Ir. Muhammad Khalidh, S.T., M.T.	NO. 01	A3
Teknik Mesin UJI		Project Tugas Akhir		