PENGARUH VARIASI SUHU PADA PRODUKSI KOMPOSIT *FRICTION MATERIALS* KAMPAS REM TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN TRIBOLOGI

LAPORAN TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin

Disusun Oleh :

Nama : Mohamad Rizky Djati Admoko
No. Mahasiswa : 20525066
NIRM : 2005110054

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA

2025

PERNYATAAN KEASLIAN

Bismillahirrahmanirrahim, dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini merupakan hasil kerja keras saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang saya cantumkan sumber referensinya. Apabila dikemudian hari terbukti pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima hukuman/sanksi sesuai hukum yang berlaku di Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 6 Juli 2025



Mohamad Rizky Djati Admoko

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

PENGARUH VARIASI SUHU PADA PRODUKSI KOMPOSIT *FRICTION MATERIALS* KAMPAS REM TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN TRIBOLOGI

LAPORAN TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Mohamad Rizky Djati Admoko

No. Mahasiswa : 20525066

NIRM : 2005110054

Yogyakarta, 6 juli 2025

Dosen Pembimbing

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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

PENGARUH VARIASI SUHU PADA PRODUKSI KOMPOSIT *FRICTION MATERIALS* KAMPAS REM TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN TRIBOLOGI

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : **Mohamad Rizky Djati Admoko**

No. Mahasiswa : **20525066**

NIRM : **2005110054**

Tim Penguji

Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP. Ketua	Tanggal : 26/08/2025
Ir. Santo Ajie Dhewanto, S.T., M.M., IPP Anggota I	Tanggal : 26/08/2025
Ir. Donny Suryawan, S.T., M.Eng., IPP Anggota II	Tanggal : 26/08/2025

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

HALAMAN PERSEMBAHAN

Puji Syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kekuatan, dan semangat dalam mengerjakan tugas akhir ini sehingga bisa diselesaikan dengan baik.

Terimakasih kepada kedua orang tua dan adik penulis yang telah mendukung penulis serta selalu memberikan semangat dan doa agar selalu berusaha meraih yang terbaik. Seindah apapun ucapan ini tidak akan mampu membalas jasa kedua orang tua penulis. Sehingga tugas akhir ini saya persembahkan untuk orang tua penulis.

HALAMAN MOTTO

"Berbudi tinggi, berbadan sehat, berpengetahuan luas, dan berfikiran bebas"

"*If you focus on your past, you won't be able to see what's in front of you*"

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur kita panjatkan kepada Allah Swt yang hanya kepada-Nya memohon pertolongan. Alhamdulillah atas segala pertolongan,rahmat, dan kasih sayang-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "PENGARUH VARIASI SUHU PADA PRODUKSI KOMPOSIT *FRICTION MATERIALS* KAMPAS REM TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN TRIBOLOGI".

Shalawat dan salam kepada Rasulullah Saw. yang senantiasa menjadi sumber inspirasi dan teladan terbaik untuk seluruh umat manusia. Penulis menyadari banyak pihak yang memberikan dukungan dan bantuan selama menyelesaikan studi dan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, sudah sepantasnya penulis dengan penuh hormat mengucapkan terimakasih dan mendoakan semoga Allah memberikan balasan terbaik kepada :

1. Kedua orangtua saya tercinta dan tersayang, yang menjadi ibu sekaligus ayah untuk saya dan adik-adik saya. Ibu sebagai surga dan dunia saya, terimakasih yang teramat besar sudah mendampingi saya hingga menyelesaikan kuliah dan bisa berada dititik ini. Terimakasih sudah menjadi ibu dan ayah yang terbaik buat kami yang selalu mengusahakan yang terbaik bagi kami. Terimakasih atas pengorbanan dan perjuangan yang tulus dalam mengusahakan perjalanan dan pencapaian hidup saya selama ini dan terimakasih untuk doa yang selalu kalian panjatkan dalam sujud untuk saya dalam menyelesaikan studi ini hingga selesai. Karya tulis dan gelar ini saya persembahkan untuk ibu tercinta.
2. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP., selaku Kaprodi Teknik Mesin selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dan tabah dalam memberikan ilmu, semangat serta arahan selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
3. Segenap dosen teknik mesin yang senantiasa tabah dan sabar dalam memberikan ilmu kepada penulis serta membantu dalam keberlangsungan akademis penulis.
4. Segenap laboran Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia yang telah

membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir.

5. Muhammad Errizky Wibowo dan Akhmad Fauzi selaku rekan kerja dalam melakukan penelitian tugas akhir ini.
6. Kepada seseorang dengan NIM 21613210 yang telah memberikan saya support dalam melaksanakan tugas akhir.
7. Sahabat-sahabat seperjuangan saya dan teman-teman Teknik Mesin UII, teman satu daerah maupun rekan-rekan lainya terimakasih sudah setia menemani saya dari awal perkuliahan hinga saat ini. Kalian semua adalah manusia-manusia hebat yang pernah saya temui. Semoga setelah ini kebahagiaan akan terus menghampiri kalian semua dan semoga setelah ini kalian akan menggapai semua angan dan cita-cita dengan kemudahan dan keberkahan dari Allah SWT, Amiin.

Akhir kata penulis menyadari bahwa tidak ada yang sempurna, Penulis menyadari bahwasannya masih melakukan kesalahan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis meminta maaf atas kesalahan serta kekurangan yang ada pada laporan ini.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan dapat dijadikan referensi demi pengembangan kearah yang lebih baik. Akhirul kalam dengan segala harapan dan doa semoga laporan ini dapat bermanfaat. Aamiin.

Wassalamualaikum Wr. Wb

Yogyakarta, 6 Juli 2025



Mohamad Rizky Djati Admoko

ABSTRAK

Pengereman kereta api merupakan proses penting yang harus dilakukan secara bertahap untuk menghindari risiko kecelakaan akibat pengereman mendadak. Kampas rem berfungsi sebagai bahan penggesek yang umumnya terbuat dari material komposit berbasis asbestos, yang meskipun memiliki sifat mekanik dan tribologi baik, penggunaan berlebihan dapat menimbulkan risiko kesehatan seperti kanker paru-paru. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui metode yang digunakan dalam proses pembuatan kampas rem, mengetahui kinerja sifat mekanik dan tribologi sekam padi terhadap variasi suhu pada spesimen kampas rem, mengetahui suhu optimal dari setiap pengujian, dan mengetahui perbandingan nilai uji terhadap penelitian sebelumnya dan standar PT. KAI.

Pada penelitian kali ini, metode yang digunakan adalah *hot compression molding* menggunakan bahan matriks resin fenolik serta bahan penyusun seperti sekam padi, katalis *hexamine*, Al_2O_3 dan Fe_2O_3. Komposit kemudian dilakukan beberapa uji karakterisasi antara lain uji densitas, tarik, impak, bending, keausan dan gesekan.

Hasil dari beberapa pengujian tersebut menunjukkan penambahan suhu terhadap metode *hot compression molding* meningkatkan nilai sifat mekanik dan tribologi. Secara keseluruhan metode *hot compression molding* merupakan pendekatan yang layak untuk memproses pembuatan kampas rem yang memiliki matrik resin fenolik. Pada penelitian ini, sifat mekanik terbaik terdapat pada spesimen dengan variasi suhu 180^{o}C.

Kata kunci: komposit, *hot compression molding*, resin fenolik, *hexamine*, Al_2O_3 dan Fe_2O_3

ABSTRACT

Train braking is an important process that must be carried out in stages to avoid the risk of accidents due to sudden braking. Brake pads function as friction materials that are generally made of asbestos-based composite materials, which although have good mechanical and tribological properties, excessive use can cause health risks such as lung cancer. The purpose of this study was to determine the method used in the process of making brake pads, to determine the performance of the mechanical and tribological properties of rice husks against temperature variations in brake pad specimens, to determine the optimal temperature of each test, and to determine the comparison of test values to previous studies and PT. KAI standards

In this study, the method used was hot compression molding using phenolic resin matrix materials and constituent materials such as rice husks, hexamine catalysts, Al_2O_3 *dan* Fe_2O_3*. The composite was then subjected to several characterization tests including density, tensile, impact, bending, wear and friction tests.*

The results of several tests showed that the addition of temperature to hot compression molding increased the mechanical and tribological properties. Overall, the hot compression molding method is a feasible approach to process the manufacture of brake linings that have a phenolic resin matrix. In this study, the best mechanical properties were found in specimens with a temperature variation of 180^oC*.*

Keywords: *composite, hot compression molding, phenolic resin, hexamine,* Al_2O_3 *and* Fe_2O_3

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING iii
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI iv
HALAMAN PERSEMBAHAN v
HALAMAN MOTTO vi
KATA PENGANTAR vii
ABSTRAK ix
ABSTRACT x
DAFTAR ISI xi
DAFTAR TABEL xiv
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR NOTASI xvii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 4
1.6 Sistematika Penulisan 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1 Kajian Pustaka 6
2.2 Dasar Teori 7

2.2.1 Kampas Rem.....7
2.2.2 Komposit 11
2.3 Pengujian Material.....21
2.3.1 Pengujian Densitas.....21
2.3.2 Pengujian Tarik.....22
2.3.3 Pengujian Impak 24
2.3.4 Pengujian Bending 26
2.3.5 Pengujian Keausan dan Gesekan 27
BAB III METODE PENELITIAN.....29
3.1 Alur Penelitian.....29
3.2 Peralatan dan Bahan.....30
3.3 Pembuatan Serbuk Sekam Padi 36
3.4 Pembuatan Spesimen Komposit 36
3.4.1 Pembuatan Cetakan Spesimen 36
3.4.2 Perhitungan *Volume* Material Komposit.....37
3.4.3 Pencetakan Spesimen Komposit 39
3.5 Proses Pengujian 40
3.5.1 Pengujian Densitas.....40
3.5.2 Pengujian Tarik.....41
3.5.3 Pengujian Impak 42
3.5.4 Pengujian Bending 44
3.5.5 Pengujian Keausan dan Gesekan 45
3.6 Analisis Data 46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....47

4.1 Pengujian Densitas 47
4.2 Pengujian Tarik.....49
4.3 Pengujian Impak 52
4.4 Pengujian Bending.....53
4.5 Pengujian Keausan dan Gesekan 55
BAB V PENUTUP.....59
5.1 Kesimpulan 59
5.2 Saran 60
DAFTAR PUSTAKA 61
LAMPIRAN 68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Spesifikasi teknik rem komposit PT. KAI. 9
Tabel 2.2. *Properties of phenolic resin*. 20
Tabel 2.3. *Properties of 99.5% aluminum oxide in room temperature*. 20
Tabel 3.1. Alat penelitian. 30
Tabel 3.2. Bahan penelitian 34
Tabel 3.3. Spesimen pada penelitian ini.....40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kampas rem kereta api 7
Gambar 2.2. Bagian-bagian kampas rem dan material penyusun. 9
Gambar 2.3. Diagram sistem pengereman kereta api 10
Gambar 2.4. Jenis komposit serat 12
Gambar 2.5. Skema pengisi partikel yang menunjang material komposit. 13
Gambar 2.6. (a) Komposit berlapis, (b) Komposit *sandwich panels*. 13
Gambar 2.7. Metode *hand lay-Up* 15
Gambar 2.8. Metode *vacum bag* 16
Gambar 2.9. Metode *pressure bag* 16
Gambar 2.10. Metode *spray up* 17
Gambar 2.11. Metode *filament winding* 17
Gambar 2.12. Metode *compression mold* 18
Gambar 2.13. Metode *injection mold* 18
Gambar 2.14. Metode *continous pulstrusion mold* 19
Gambar 2.15. *Properties of iron oxides* (Fe_2O_3) 21
Gambar 2.16. Grafik tegangan-regangan. 22
Gambar 2.17. Metode *charpy* 24
Gambar 2.18. Metode izod 25
Gambar 2.19. *Three point bending* dan *four point bending* 26
Gambar 2.20. Ilustrasi uji keausan *pin on disc* 27
Gambar 3.1. Diagram alur penelitian 29
Gambar 3.2. (a) Tampak samping (b) Tampak isometrik 37
Gambar 3.3. Proses permesinan 37
Gambar 3.4. Dimensi uji keausan 41
Gambar 3.5. Spesiemen uji densitas 41
Gambar 3.6. Dimensi spesimen uji tarik 42
Gambar 3.7. Spesimen uji tarik 42
Gambar 3.8. Alat uji tarik 42
Gambar 3.9. Dimensi spesimen uji *impact charpy* 43
Gambar 3.10. Spesimen uji impak 43
Gambar 3.11. Alat uji tarik 43

Gambar 3.12. Dimensi spesimen uji bending 44
Gambar 3.13. Spesimen uji bending 44
Gambar 3.14. Alat uji bending 45
Gambar 3.15. Dimensi uji keausan 45
Gambar 3.16. Spesimen uji keausan 46
Gambar 3.17. Alat uji keausan 46
Gambar 4.1. Diagram hasil uji densitas 47
Gambar 4.2. Diagram perbandingan nilai densitas 48
Gambar 4.3. Grafik tegangan-regangan 49
Gambar 4.4. Diagram kekuatan tarik dan modulus elastisitas 50
Gambar 4.5. Diagram perbandingan kekuatan tarik dan modulus elastisitas 51
Gambar 4.6. Diagram hargai 52
Gambar 4.7. Diagram *flexural strenght* 54
Gambar 4.8. Diagram perbandingan *fluxural strenght* 55
Gambar 4.9. Diagram Hasil uji koefisien gesek 56
Gambar 4.10. Diagram perbandingan koefisien gesek 57
Gambar 4.11. Diagram hasil uji keausan spesifik 57

DAFTAR NOTASI

1.1. V = Volume (mm^3) 21

1.2. ρ = Densitas (g/cm^3) 21

1.3. σ = Kekuatan tarik (MPa) 22

1.4. ε = Regangan (MPa) 23

1.5. E = Modulus elastisitas (MPa) 23

1.6. E_s = Energi serap (*J*) 25

1.7. HI = Harga impak (J/mm^2) 25

1.8. σ_f = *Fluxural strenght* (MPa) 26

1.9. μ = Koefisien gesek (CoF) 27

1.10. Ws = Keausan spesifik (N/mm^2) 28

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan zaman, kemajuan teknologi pun semakin mengalami pertumbuhan dan perkembangan yang pesat pada bidang otomotif. Pada saat ini Indonesia juga mengalami perkembangan di dalam dunia otomotif sehingga memberikan potensi dan pengaruh baik bagi bangsa Indonesia untuk berkreasi dalam memajukan industri otomotif [1]. Industri otomotif dan komponennya merupakan suatu industri yang berpotensi untuk berkembang di Indonesia hanya dengan melihat jumlah pengguna kendaraan.

Menurut Badan Pusat Statistik kebutuhan penggunaan kereta api lebih dominan dibandingkan dengan transportasi lainya seperti pesawat dan kapal yaitu mencapai 31,5 juta pengguna pada September 2022 sampai September 2023 [2]. Maka dari itu perindustrian otomotif harus menyiapkan segala komponen yang mencakup keselamatan para pengguna kereta api seperti kampas rem.

Pengereman adalah suatu proses memperlambat gerakan roda dengan jalan mengkonversi energi kinetik ke dalam bentuk lain. Dengan roda yang diperlambat, maka secara otomatis gerak suatu benda menjadi lambat bahkan sampai berhenti. Kereta api merupakan alat transportasi yang memiliki beberapa rangkaian gerbong dan juga menghasilkan muatan yang sangat tinggi dan juga memiliki inersia yang tinggi.

Berdasarkan hal tersebut mekanisme pengereman kereta api sengaja dilepaskan secara perlahan dan bertahap agar efek dari pengereman tersebut merata ke semua gerbong kereta. Apabila tekanan dilepaskan secara tiba-tiba, maka akan menyebabkan pengereman yang tidak merata sehingga menyebabkan rem bekerja lebih dulu dari titik keluar udara sehingga akan menyebabkan kecelakaan yang sangat besar yakni tergelincirnya roda dari rel hingga gerbong pun terguling.

Di dalam sistem pengereman kereta api terdapat kampas rem yaitu bahan yang berguna sebagai bahan penggesek yang pada umumnya terbuat dari material-material komposit seperti asbestos yang ditambahkan unsur seperti SiC dan Mn, atau Co. Bahan baku tersebut banyak sekali digunakan karena murah dan mempunyai sifat mekanik dan tribologi yang baik akan tetapi penggunaan asbestos

yang berlebihan dalam kampas rem dapat menyebabkan penyakit seperti kanker paru-paru dan kanker saluran pernafasan [3]. Selain itu, kampas rem asbes dapat mengalami pemudaran jika terkena suhu di atas 200^{o} C.

Oleh karena itu perlu dikembangkan kampas rem yang menggunakan bahan-bahan non asbes seperti bahan komposit organik yang dapat mempertahankan sifat mekanik dan sifat tribologi dari kampas rem tersebut. Pada penelitian kali ini peneliti menggunakan bahan organik yang berupa sekam padi yang memiliki kandungan silika yang tinggi dan dapat membentuk material yang memiliki kekerasan yang baik, sehingga membuat material tahan akan goresan dan tahan lama. Dan di Indonesia itu sendiri merupakan negara agraris yang merupakan penduduknya sebagian besar bertani sehingga mudah untuk menemukan sekam padi tersebut.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Khafid, dkk. Mengenai kajian material komposit kampas rem yang menggunakan variasi komposisi resin epoksi sebagai matriks, sekam padi, besi oksida (Fe_2O_3), dan aluminium oksida ($Al_2 O_3$) menyatakan bahwa penambahan sekam padi, Fe_2O_3, dan Al_2O_3 ke dalam epoksi memberikan pengaruh yang signifikan pada sifat komposit seperti kepadatan, kekerasan, kekuatan lentur, dan modulus lentur. Ketika jumlah Fe_2O_3, dan Al_2O_3 meningkat, campuran material menjadi kurang homogen mengakibatkan ketidakhomogenan material penyusun komposit. Akibatnya porositas material meningkat sedangkan densitasnya menurun [4].

Penelitian lain yang dilakukan oleh Yudhanto, dkk. membahas karakterisasi bahan kampas rem sepeda motor berbasis komposit serbuk kayu jati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu pada proses *hot compression molding* berpengaruh terhadap sifat-sifat komposit, seperti kepadatan, kekerasan, kekuatan lentur, modulus lentur, dan koefisien gesek. Pemanasan resin fenolik menyebabkan resin tersebut mencair, sehingga campuran material menjadi lebih homogen dan memengaruhi karakteristik kampas rem yang dihasilkan [5]. Dalam penelitian kali ini, peneliti mengunakan bahan yang berupa resin fenolik berbentuk serbuk, sekam padi, katalis *hexamine*, Fe_2O_3, dan Al_2O_3 sebagai penyusun utama. Metode *hot compression molding* dengan variasi suhu diterapkan untuk mengoptimalkan proses pembuatan spesimen komposit kampas rem.

1.2 Perumusan Masalah

Pelaksanaan Berdasarkan dari latar belakang yang telah disampaikan, maka didapatkan rumusan masalah pada produksi komposit *friction materials* kampas rem berbahan sekam padi :

1. Metode apa yang digunakan dalam pembuatan komposit material gesek kampas rem ?
2. Bagaimana kinerja sifat material dan sifat tribologi sekam padi sebagai bahan kampas rem terhadap variasi suhu pada spesimen uji kampas rem?
3. Berapakah suhu optimal yang digunakan dalam proses produksi kampas rem non asbes?
4. Apakah nilai dari hasil pengujian sudah sesuai terhadap standar yang digunakan?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian kali ini berfokus pada permasalahan yang ada, agar penelitian tidak melenceng maka perlu dibuat suatu batasan masalah untuk mendapatkan hasil penelitian yang spesifik, maka penulisan batasan-batasan yang dibuat sebagai berikut :

1. Produksi kampas rem non asbes menggunakan mesin *hot press* agar dapat mengontrol suhu yang digunakan dalam proses pembuatan spesimen.
2. Pembuatan spesimen menggunakan cetakan dengan dimensi menggunakan standar acuan ASTM.
3. Komposisi bahan yang digunakan dalam pembuatan kampas rem non asbes adalah resin fenolik 40%, serbuk sekam padi 20%, katalis *hexamine* 10%, alumunium oksida 15%, dan besi oksida 15%.
4. Suhu yang akan digunakan dalam membuat spesimen adalah 120^{o}C, 150^{o}C, dan 180^{o}C.
5. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian kali ini adalah pengujian densitas, uji tarik, uji impak, uji bending, uji keausan dan gesekan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian diantara lain :

1. Mengetahui metode yang digunakan dalam pembuatan komposit material gesek kampas rem.
2. Mengetahui kinerja sifat material dan sifat tribologi sekam padi terhadap variasi suhu pada spesimen uji kampas rem.
3. Mengetahui suhu optimal dari setiap pengujian terhadap pembuatan spesimen komposit material gesek kampas rem.
4. Mengetahui perbandingan nilai uji terhadap penelitian sebelumnya dan standar PT. KAI.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian diantara lain :

1. Menambah wawasan ilmu pengetahuan tentang pembuatan kampas rem berbahan dasar komposit
2. Menjadikan penelitian ini sebagai referensi untuk penelitian yang akan datang.
3. Hasil dari penelitian ini akan bermanfaat bagi perkembangan teknologi otomotif khususnya dalam pembuatan kampas rem kereta api.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada bagian ini dituliskan urut-urutan dan sistematika penulisan yang dilakukan. Berikan ringkasan mengenai isi masing-masing bab. Sistematika penulisan laporan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Terbagi atas latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi studi literatur yang memberikan penjelasan tentang landasan teori, aspek legalitas maupun aspek pendukung lainnya dalam melaksanakan penelitian

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang metode pelaksanaan penelitian mulai dari proses pengumpulan data, perolehan data, alat yang digunakan, metode pengambilan data serta analisis yang akan dilakukan terhadap data yang diperoleh.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil dan pembahasan mengenai proses pembuatan kampas rem menggunakan material komposit.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran.

DAFTAR PUSTAKA

Bab ini berisi referensi sebagai acuan dalam melakukan penelitian

LAMPIRAN

Bab ini berisi lampira-lampiran yang dibutuhkan

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Berikut adalah beberapa jurnal penelitian mengenai pengaruh variasi suhu pada produksi komposit *friction materials* terhadap sifat mekanik dan tribologi. Jurnal di bawah ini menjadi patokan yang akan diterapkan pada penelitian tugas akhir ini.

Penelitian yang dilakukan oleh Pandriana, dkk. Mengenai ulasan pembuatan komposit kampas rem dari serat alami menunjukkan bahwa metode *hot compression molding* digunakan dalam pembuatan spesimen komposit kampas rem dengan resin fenolik sebagai matriks. Suhu dan tekanan yang dilakukakan pada proses *hot compression molding* mempengaruhi pematangan dari resin fenolik sehingga ikatan antar material menjadi optimal, yang berdampak pada sifat mekanik, sifat fisik, dan sifat tribologi dari suatu spesimen [6].

Penelitian yang dilakukan oleh Khafid, dkk. Mengenai kajian karakteristik material komposit kampas rem dengan memvariasikan komposisi epoksi, sekam padi, Al_2O_3 dan Fe_2O_3 menunjukkan bahwa penggunaan sekam padi berpengaruh positif terhadap nilai densitas, keausan, koefisien gesek, dan stabilitas thermal [4].

Penelitian yang dilakukan oleh Subagia, dkk. Mengenai pengaruh temperatur sinter terhadap kekerasan dan keausan kampas menunjukkan bahwa suhu yang digunakan dalam proses sintering adalah 200^{o}C, 250^{o}C, dan 300^{o}C. Hasilnya, pada proses sintering 200^{o}C menurunkan koefisien gesek yang signifikan. Selain itu, pada temperatur 300^{o}C memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh variasi suhu sintering memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas produksi komposit kampas rem [7].

Jurnal lain yang ditulis oleh Wahyudi, dkk. Membahas pengaruh variasi temperatur sintering terhadap kekerasan komposit kampas rem dengan variasi suhu 125^{o}C, 175^{o}C, dan 225^{o}C. Hasil uji menunjukkan nilai kekerasan rata-rata yang memenuhi standar kampas rem SAE J661. Sehingga variasi suhu sintering berpengaruh pada bahan yang digunakan, karena peningkatan suhu dan dan proses pendinginan secara perlahan dapat menurunkan kekerasan alumunium. Selain itu, resin phenolic akan cepat mengeras (sifat *thermosetting*) pada saat peningkatan

temperatur sintering [8].

Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya, ditemukan bahwa beberapa pengujian seperti uji tarik, uji bending, dan uji impak belum dilakukan, serta suhu optimal dalam pembuatan komposit kampas rem belum ditentukan. Selain itu, penelitian-penelitian tersebut menggunakan metode yang berbeda, sedangkan penelitian ini menerapkan metode *hot compression molding*. Oleh karena itu, penulis merumuskan ide untuk melakukan penelitian dengan judul "Pengaruh Variasi Suhu pada Produksi Komposit *Friction Materials* Kampas Rem terhadap Sifat Mekanik dan Tribologi." Penelitian ini menggunakan metode *hot compression molding* dengan tiga variasi suhu, yaitu 120°C, 150°C, dan 180°C. Selanjutnya, dilakukan serangkaian pengujian untuk menganalisis pengaruh variasi suhu tersebut terhadap sifat mekanik dan tribologi komposit.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kampas Rem

Kampas rem atau *brake pad* merupakan komponen pada kendaraan yang berguna untuk memperlambat dan menghentikan laju dari kendaraan melalui gesekan dengan *disc brake* atau tromol saat rem diinjak. Pada saat berkendara dengan kecepatan tinggi kampas rem memiliki beban yang mencapai 90% dari komponen lainnya [9].



Gambar 2.1. Kampas rem kereta api [9].

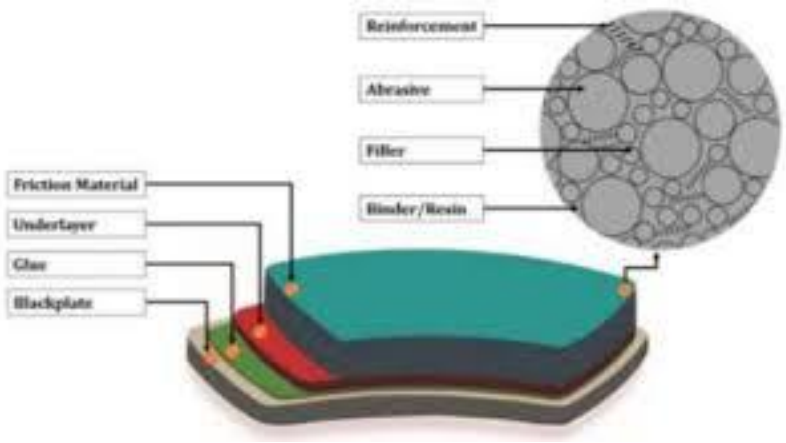
Lapisan gesek merupakan suatu bagian yang sangat penting dalam pembuatan kampas rem. Lapisan gesek terbuat dari suatu bahan yang memiliki sifat kekerasan, ketahanan aus, ketahanan korosi, kekuatan tarik dan koefisien gesek

yang baik. Kriteria bahan gesek sendiri telah di standarisasi sesuai dengan penggunaanya oleh badan-badan standarisasi baik nasional maupun internasional. Bahan gesek sendiri dapat digunakan untuk membuat kampas rem sepeda motor mobil, truk, kereta api, dan pesawat terbang [10].

A. Bagian- bagian Kampas Rem

Material komposit kampas rem terdiri dari beberapa bagian yang terdiri dari *friction material* atau bahan gesek yang menjadi salah satu bahan terpenting dalam pembuatan kampas rem, dibawahnya terdapat *underlayer* yang di tempatkan diantara *friction material* dan *backplate*, fungsi dari *underlayer* adalah untuk mengurangi getaran yang disebabkan oleh gesekan pada saat *friction material* menyentuh *disk*. *Backplate* pada kampas rem berfungsi sebagai memberikan kekakuan pada kampas rem yang diperlukan untuk terus bergerak disepanjang kaliper paduan.

Friction material pada kampas rem terdiri dari bahan *reinforcement/*penguat berupa sekam padi*, binder/*pengikat berupa resin fenolik*, filler*/pengisi berupa besi oksida, dan bahan abrasif berupa alumunium oksida. *Binder* adalah bahan yang menyimpan semua komponen pada kampas rem yang harus memiliki koefisien gesek yang stabil dan tinggi, tahan terhadap suhu tinggi dan perubahan suhu yang cepat, dan ringan. *Reinforcement* atau bahan penguat adalah bahan berserat yang ditambahkan ke pengikat untuk meningkatkan kualitas mekaniknya. Selain itu, daya taham kampas rem dipengaruhi oleh jenis bahan penguat yang digunakan. *Filler* digunakan untuk mengisi celah antara komponen bantalan rem dengan yang lainnya, sedangkan abrasif digunakan untuk memodifikasi koefisien gesekan. Masa pakai kampas rem meningkat seiiring dengan peningkatan koefisien gesekan [11] .



Gambar 2. 2 Bagian-bagian kampas rem dan material penyusun komposit material gesek [11].

B. Standar Kampas Rem Kereta Api

Pada Aplikasi sistem pengereman, bahan kampas rem harus dibuat sesuai dengan memenuhi standar keamanan, ketahanan, ketahanan serta mampu melakukan pengereman secara halus. Selain itu kampas rem harus memiliki koefisien gesek yang tinggi, keausan kecil, memiliki karakter yang kuat, dan dapat meredam getaran saat terjadi pengereman [12]. Sifat mekanik suatu kendaraan menyatakan kemampuan suatu bahan mampu untuk menerima beban gaya tanpa adanya kerusakan yang terjadi pada komponen tersebut. Maka dari itu diperlukan untuk mendapatkan standar acuan tentang spesifikasi dari kampas rem yang mempunyai nilai kekerasan, keausan, bending dan sifat mekanik lainnya serta memiliki nilai yang mendekati standar keamanan pada kampas rem. Spesifikasi tersebut harus memenuhi kriteria rem komposit yang dikeluarkan oleh PT. KAI sebagai berikut.

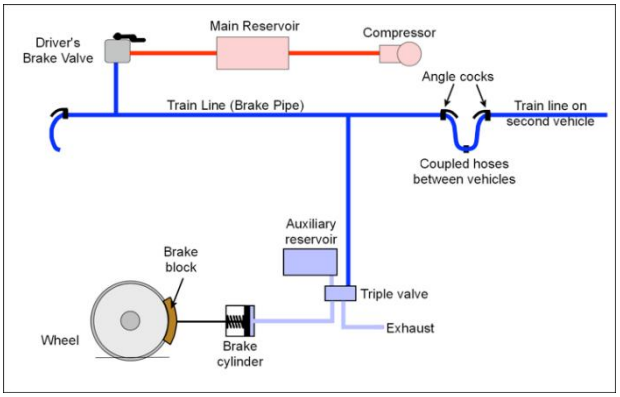
Tabel 2.1. Spesifikasi teknik rem komposit PT. KAI [13].

No	Sifat Fisik & Mekanik	Spesifikasi Teknik PT. KAI
1	Berat Jenis, gr/cm^3	1.8 – 2.4
2	Koefisien gesek	0.14 – 0.22
3	*Hardness*, HRR	70 – 105
4	Kekuatan Tarik, N/mm^2	24 – 40
5	*Fluxural Strenght*, N/mm^2	Min. 25
6	*Shear strength*, N/mm^2	15 – 35

7	*Modulus of elasticity*, N/mm^2	240 – 1500
8	*Thermal conductivity*	Min. 0.8
9	Ketahanan panas Operasional a. 250^{o}C b. 500^{o}C	a. Tidak meleleh dan tidak terbakar untuk pemakaian kontinyu b. Boleh terbakar namun tidak menimbulkan nyala api

C. Sistem Pengereman Kereta Api

Sistem pengereman banyak digunakan pada kendaraan komersial seperti motor, mobil, kereta api, dan lainya. Untuk sistem pengereman kereta api sendiri menggunakan sistem pengereman udata atau yang dikenal sebagau *direct air brake system*. Pengereman terjadi ketika udara bertekanan yang dihasilkan kompressor dilarikan melalui *brake pipe* dan masuk ke *air reservoir tank*, kemudian udara tersebut dialirkan ke sistem pengereman dan mendorong piston pada *brake cylinder* yang menekan blok rem ke roda [14].



Gambar 2.3. Diagram sistem pengereman kereta api [14].

D. Faktor Kerusakan Kampas Rem

Berikut adalah beberapa faktor yang menyebabkan kerusakan pada kampas rem

1. Keausan material kampas rem akibat gesekan terus-menerus dengan roda pada saat pengereman, yang menyebabkan penurunan ketebalan dan performa kampas rem.
2. Pengaruh suhu tinggi selama proses pengereman, yang dapat menyebabkan perubahan struktur mikro pada material roda dan kampas rem. Hal ini

membuat permukaan menjadi getas dan rentan terhadap retak serta mengelupas, yang juga berdampak pada kampas rem

3. Kontaminasi oleh partikel asing atau bahan yang tidak diinginkan pada permukaan kampas rem atau roda, yang dapat mengurangi efektivitas pengereman dan mempercepat kerusakan Keausan Lelah (*Surface Fatigue Wear*)
4. Kualitas dan komposisi material kampas rem, terutama jika menggunakan filler logam berat yang dapat menyebar ke lingkungan dan menimbulkan polusi, serta mempengaruhi sifat mekanik dan keausan kampas Keausan Erosi (*Erosion Wear*)
5. Kerusakan pada komponen sistem pengereman lain, seperti katup rem, kaliper, atau silinder roda, yang dapat menyebabkan distribusi gaya pengereman tidak merata dan mempercepat keausan kampas rem.

2.2.2 Komposit

Material komposit adalah material yang terdiri dari dua bahan atau lebih yang tetap terpisah dan berbeda dalam level makroskopik selagi membentuk komponen tunggal sehingga dapat menghasilkan sebuah material yang mempunyai sifat mekanik dan memiliki karakteristik yang berbeda dari material pembentuknya. Bahan yang menyusun komposit terdiri dari penguat atau *reinforce* dan pengikat atau *matriks.* Penguat pada komposit berfungsi sebagai penerima beban struktural sehingga menghasilkan sifat kekuatan dan kekauan pada komposit. Sedangkan pengikat berfungsi sebagai pengikat serat-serat, menurunkan densitas, menyalurkan beban, melindungi abrasi, memberikan ketahanan terhadap lingkungan dan memberikan ketahanan secara umum pada material komposit [15].

A. Klasifikasi Komposit Berdasarkan Material Penguat

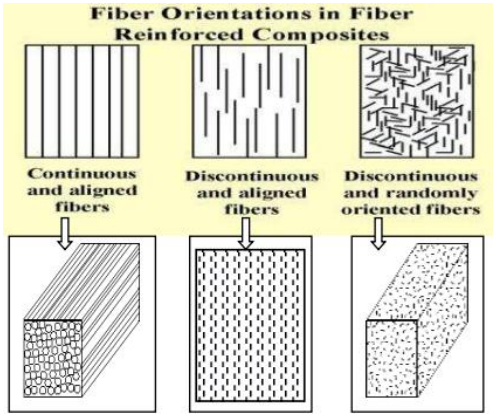
Komposit memiliki beberapa jenis penguat yang digunakan dalam proses pembuatan. Material komposit terdiri dari komposit berpenguat serat, partikular, dan *laminated* [15]. Berikut beberapa penjelasan terkait klasifikasi komposit berdasarkan material penguat.

1. Komposit berpenguat serat (*fiber reinforced composite*)

Komposit berpenguat serat atau *fiber reinforced composite* adalah komposit yang menggunakan serat dan bahan dasar fabrikasi sebagai bahan

penguat, misalnya serat dan resin sebagai perekat. Serat yang digunakan untuk memperkuat matriks dapat berupa serat pendek, panjang, atau kontinu, dengan ukuran yang disesuaikan dengan kebutuhan. Konsentrasi dari serat sendiri yang dicampurkan pada matriks mencapai 70% fraksi volume. Komposit serat juga terbagi menjadi beberapa jenis, sebagai berikut:

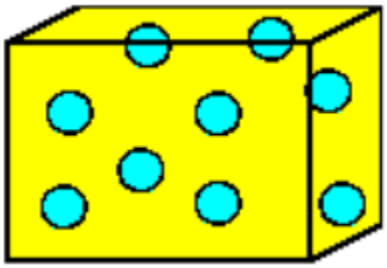
a. Serat panjang dan searah (*continous and aligned fiber*)
b. Serat pendek dan searah (*discontinous and aligned fiber*)
c. Serat pendek dan random (*discontinous and randomly oriented fiber*)



Gambar 2.4. Jenis komposit serat [16].

2. Komposit berpenguat partikular

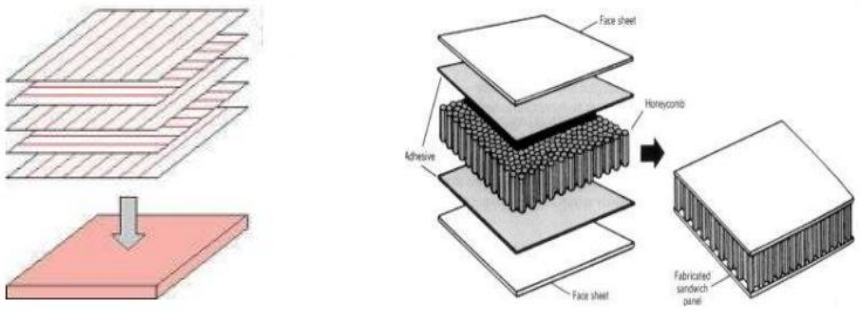
Komposit berpenguat partikular adalah komposit yang menggunakan penguat dalam bentuk partikel-partikel yang menyebar di dalam matriks. Konsentrasi yang digunakan dalam komposit ini mencapai (20 – 40)% fraksi volume. Pengisi-pengisi partikel antara lain adalah: Sic, SiC, B4C, TiC, TiB, TiB2, SiO2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3. Keungulan material komposit partikular memiliki kekuatan komposit yang lebih seragam pada berbagai arah, dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan suatu material serta menghalangi pergerakan dislokasi.



Gambar 2.5. Skema pengisi partikel yang menunjang material komposit [16].

3. Komposit *laminated*

Komposit *laminated* adalah merupakan jenis komposit yang terdiri dari dua lapis atau lebih yang digabungkan menjadi satu dan pada setiap lapisannya memiliki karakteristik tertentu. Komposit berlapis dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu komposit lapisan (*laminar composite*) dan *sandwich panels*. Komposit lapisan adalah lapisan dua dimensi yang memiliki kekuatan yang lebih tinggi. Contohnya *plywood*, *laminated glass* yang sering digunakan sebagai bahan bangunan. Sementara *sandwich panels* dua lapisan dengan lapisan luar yang kuat. Dua lapisan tersebut dipisahkan oleh inti material yang kurang padat (memiliki modulus elastisitas dan kekuatan yang lebih rendah).



(a) (b)

Gambar 2.6. (a) Komposit berlapis, (b) Komposit *sandwich panels* [16].

B. Klasifikasi Komposit Berdasarkan Matriks

Matriks dalam struktur komposit berasal dari bahan polimer atau logam. Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai fraksi volume terbesar (dominan). Syarat matriks yang digunakan pada komposit adalah matriks harus bisa meneruskan beban, sehingga serat harus bisa melekat pada matriks dan kompatibel antara serat dan matriks. Matriks dalam komposit juga berguna untuk melindungi dan mengikat serat agar dapat berkerja dengan baik. Selain dari itu, matriks juga berfungsi sebagai pelapis serat.

Menurut Clyne dan Hull, matriks yang digunakan dalam pembuatan komposit dapat dikelompokkan atas tiga [15], adalah sebagai berikut:

1. *Metal Matrix Composite* (matriks logam)

Metal matrix composite (MMC) adalah salah satu jenis komposit yang

memiliki matriks logam. MMC mulai dikembangkan pada tahun 1996. Awal penelitian ini digunakan pada industri penerbangan.

2. *Ceramic Matrix Composite* (matriks keramik)

Ceramic matriks composite merupakan material dua fasa dengan satu fasa sebagai penguat dan fasa satunya berfungsi sebagai matriks dimana matriks tersebut terbuat dari keramik. Penguat yang digunakan dalam pembuatan CMC adalah oksida, karbida, dan nitrit. Proses pembuatan CMC yaitu menggunakan proses *dimox* yaitu merupakan pembentukan 12 komposit dengan reaksi oksidasi leburan logam untuk pertumbuhan matriks keramik di sekeliling filler.

3. *Polymer Matrix Composite* (matriks polimer)

Polimer merupakan matriks yang paling banyak digunakan pada pembuatan material komposit. Karena memiliki ketahanan terhadap korosi dan lebih ringan. Matriks polimer dibagi menjadi 2 jenis yaitu termoset dan termoplastik. Perbedaan dari keduanya adalah termoset tidak dapat didaur ulang sedangkan termoplastik dapat didaur ulang sehingga penggunaan polimer termoplastik banyak digunakan. Jenis-jenis termoplastik yang biasa digunakan adalah *polypropylene* (PP), *polystryrene* (PS), *polyethylene* (PE), dan lain-lain.

C. Metode Pembuatan Komposit

Menurut Setyanto, secara garis besar metode pembuatan komposit terdiri dari dua metode, yaitu proses cetakan terbuka (*open-mold process*), dan proses cetakan tertutup (*closed mold processes*) [17].

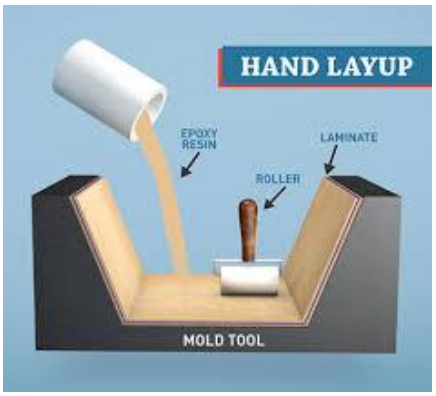
1. Open Mold Process

Open mold process merupakan proses pembuatan komposit dimana pada saat proses pembuatan berlangsung cetakan tidak ditutup atau dalam kondisi terbuka. *Open Mold Process* terdiri dari beberapa metode, sebagai berikut:

a. Hand Lay-Up

Hand lay-up merupakan metode yang paling sederhana dan juga merupakan metode terbuka dari proses pembuatan komposit. Adapun proses pembuatan dengan metode ini adalah dengan cara menuangkan

resin ke dalam serat yang berbentuk rajutan, anyaman, atau kain, kemudian memberi tekanan sekaligus meratakannya menggunakan rol atau kuas. Pada proses tersebut dilakukan berulang hingga mencapai ketebalan yang diinginkan, pada proses ini juga resin berkontak langsung dengan udara dan juga proses pencetakan dilakukan menggunakan suhu ruang. Keuntungan dari proses ini adalah mudah dilakukan, cocok digunakan pada komponen besar, dan volumenya rendah. Metode *hand lay-up* ini biasanya digunakan pada produksi pembuatan bodi kapal, bodi kendaraan, bilah turbin angin, perahu dan lain-lain.

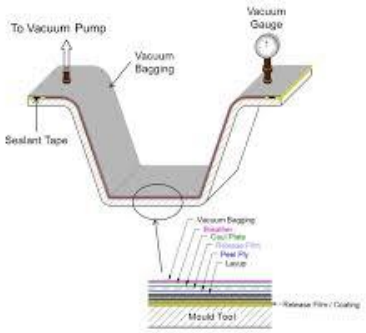


Gambar 2.7. Metode *hand lay-up* [18].

b. Vakum bag

Vakum bag merupakan proses penyempurnaan dari *hand lay-up*, fungsi dari penggunaan vakum ini adalah untuk menghilangkan udara yang terperangkap dan kelebihan resin. Pada proses ini pompa vakum digunakan untuk menghisap udara yang ada didalam wadah dimana komposit akan dilakukan proses pencetakan. Dengan di vakumkan maka udara yang ada diluar penutup plastik akan menekan kearah dalam. Maka dari itu udara yang berada didalam komposit dapat di minimalisirkan.

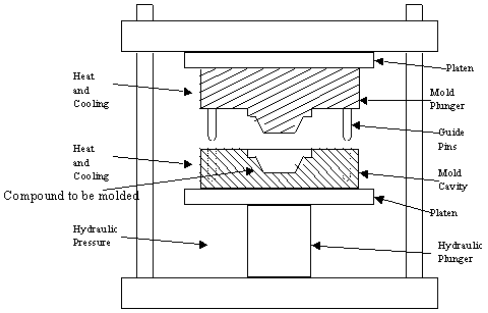
Dibandingkan dengan *hand lay-up*, metode vakum memberikan penguatan konsentrasi yang lebih tinggi, adhesi yang lebih baik, dan kontrol yang lebih terhadap rasio resin. Metode vakum biasanya digunakan pada produksi kapal pesiar, komponen mobil balap, perahu dan lain-lain.



Gambar 2.8. Metode *vacum bag* [19].

c. Pressure bag

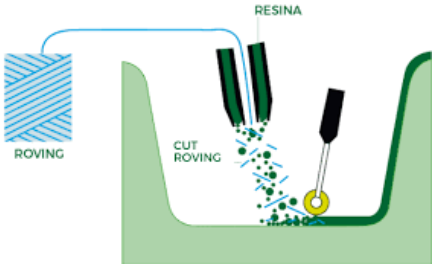
Pressure bag memiliki kesamaan terhadap metode *vacum bag*, namun cara ini tidak menggunakan pompa melainkan menggunakan udara atau uap bertekanan yang dimasukkan melalui wadah elastis. Wadah ini kemudian berkontak pada komposit yang akan dilakukan pemrosesan. Biasanya tekanan yang diberikan sebesar 30 sampai 50 psi. Metode *pressure bag* biasanya digunakan pada produksi pembuatan tangki, wadah, turbin angin dan *vessel*.



Gambar 2..9 Metode *pressure bag* [20].

d. Spray-up

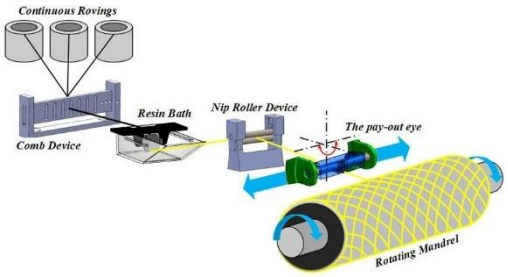
Spray up merupakan metode cetakan terbuka yang dapat menghasilkan bagian-bagian yang kompleks dan lebih ekonomis dari *hand lay-up*. Proses *spray-up* dilakukan dengan cara penyemprotan serat yang telah melewati tempat pemotongan. Sementara resin yang telah dicampur dengan katalis juga disemprotkan secara bersamaan pada wadah pencetakan *spray-up* yang telah disiapkan sebelumnya. Selanjutnya adalah dengan membiarkan mengeras pada kondisi suhu ruang. Metode *spray-up* biasanya digunakan pada produksi panel-panel, bodi karavan, sampan dan bak mandi.



Gambar 2.10. Metode *spray up* [21].

e. Filament winding

Filament winding merupakan metode dimana fiber tipe *roving* atau *single strand* dilewatkan melalui wadah yang berisi resin, kemudian fiber tersebut akan diputar sekeliling mandrel yang sedang bergerak dua arah, arah radial dan arah tangensial. Proses ini dilakukan secara berulang, sehingga cara ini didapatkan lapisan serat sesuai keinginan. Metode *filament winding* digunakan dalam produksi pipa silinder, *driver shaft*, tangki air dan tiang-tiang kapal pesiar.



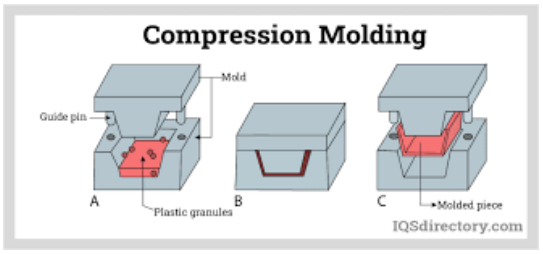
Gambar 2.11. Metode *filament winding* [22].

2. Closed Mold Processes

Closed mold process merupakan proses pembuatan komposit dimana pada saat proses pembuatan berlangsung cetakan ditutup atau dalam kondisi tertutup. *Closed Mold Process* terdiri dari beberapa metode, sebagai berikut:

a. Proses cetakan tekan (*compression molding*)

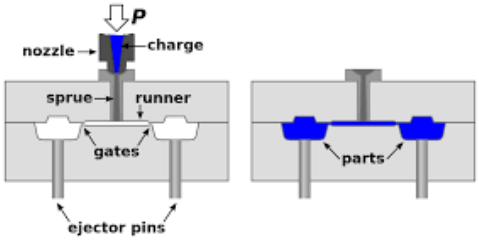
Proses pencetakan ini menggunakan alat press *hydraulic* sebagai penekannya. Serat yang telah dicampur dengan resin dimasukkan kedalam cetakan yang telah dibuat sebelumnya, kemudian dilakukan penekanan dan pemanasan. Metode ini digunakan dalam produksi alat rumah, kontainer besar, alat listrik dan kerangka sepeda [17].



Gambar 2.12. Metode *Compression Mold* [23].

b. Injection molding

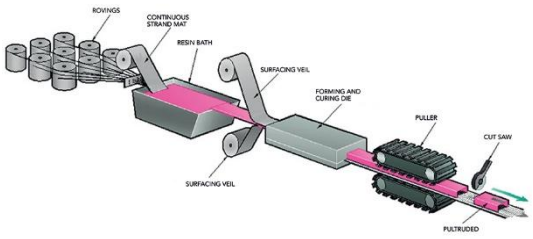
Metode ini juga dikenal sebagai reaksi pencetakan cairan atau pelapisan tekanan tinggi. Fiber dan resin dimasukkan kedalam rongga cetakan bagian atas, kondisi temperatur juga dijaga supaya tetap dapat mencairkan resin. Resin cair berserta fiber akan mengalir ke bagian bawah, kemudian dilakukan injeksi oleh mandrel ke arah *nozel* menuju cetakan.



Gambar 2.13. Metode *injection mold* [24].

c. Continous pultrusion

Fiber jenis *roving* dilewati melalui wadah berisi resin, kemudian secara kontinu dituangkan kedalam cetakan dan diawetkan, kemudian dilakukan pengerolan sesuai dengan dimensi yang diinginkan. Atau juga bisa dilakukan penarikan serat dari suatu jaring atau *creel* melalui bak resin, kemudian diawetkan pada cetakan yang telah dipanaskan. Fungsi dari cetakan adalah mengontrol resin, melengkapi pengisian serat, dan mengeraskan bahan menjadi bentuk akhir melewati cetakan.



Gambar 2.14. Metode *continous pulstrusion mold* [25].

D. Komposisi

Pembuatan kampas rem umumnya terdiri dari bahan *reinforcement*/penguat, *binder*/pengikat, *filler*/pengisi, dan bahan abrasif. Sifat mekanik yang diharapkan pada pembuatan kampas rem antara lain memiliki ketahanan terhadap korosi, memiliki kekerasan, kekuatan tarik, dan ketahanan panas yang baik. Sedangkan untuk sifat tribologi yang diinginkan yaitu memiliki keausan spesifik yang kecil dan keofisien gesek yang tinggi [11].

Pada penelitian kali ini, peneliti menggunakan sekam padi sebagai bahan *filler/*pengisi. Sekam padi telah dikenal sebagai sumber silika. Kandungan kimia sekam padi adalah 15-20% silika, 25-30% lignin, dan 50% selulosa. Namun abu sekam padi sendiri mengandung kadar silika yang lebih tinggi yaitu 89,17% [26]. Kandungan silika yang tinggi dan lignin yang rendah pada abu kampas rem sendiri dapat menghasilkan bahan kampas rem yang memiliki sifat mekanik dan ketahanan aus seperti bahan keramik [27].

Resin fenolik digunakan sebagai *binder*/pengikat pada proses pembuatan komposit kampas rem dikarenakan resin fenolik sendiri memiliki ketahanan terhadap panas dan air sehingga sangat cocok digunakan pada metode pembuatan kampas rem. Resin fenolik juga termasuk resin yang memiliki kategori polimer termoset. Penggunaan resin fenolik juga berbarengan dengan penggunaan katalis *hexamine.* Penggunaan katalis *hexamine* sendiri bertujuan untuk pengeras (*hardener*) yang membantu proses polimerisasi dan pengerasan pada resin fenolik. Katalis *hexamine* sendiri dapat mempercepat pembentukan ikatan pada resin, sehingga meningkatkan kekuatan dan stabilitas termal pada resin fenolik [28]. Resin fenolik dikenal memiliki ketahanan terhadap panas dan air, serta tidak memiliki zat racun. Resin fenolik biasanya digunakan sebagai bahan pelapis, laminasi, pengikat batu gerinda, atau pengikan logam dan kaca [29].

Tabel 2.2. *Properties of phenolic resin* [29].

Tensile Strength	85 MPa
Tensile Modulus	10500 Mpa
Compresive Strength	190 MPa
Water Absorption	5-10 mg at 24h, 23oC

Alumunium oksida (Al_2O_3) dengan *mesh* 220 berfungsi sebagai bahan abrasif. Senyawa ini termasuk dalam kelompok material aplikasi karena memiliki sifat-sifat yang mendukung pemanfaatanya dalam beragam peruntukan. Senyawa ini merupakan insulator listrik yang baik, sehingga digunakan sebagai isolator suhu tinggi, karena memiliki kapasitas panas yang tinggi. Sifat lain dari alumunium oksida sendiri adalah membantu menstabilkan koefisien gesek pada proses pengereman tinggi, dapat mengurangi hilangnya keausan dari kampas rem dan memiliki titik lebur yang tinggi.

Tabel 2.3. *Properties of 99.5% aluminum oxide in room temperature* [30].

99.5% Aluminum Oxide			
Mechanical	**Units of Measure**	**SI/Metric**	**(Imperial)**
Density	gm/cc (lb/ft^3)	3.89	(242.8)
Porosity	% (%)	0	(0)
Color	—	ivory	—
Flexural Strength	MPa (lb/in^{2}x10^3)	379	(55)
Elastic Modulus	GPa (lb/in^{2}x10^6)	375	(54.4)
Shear Modulus	GPa (lb/in^{2}x10^6)	152	(22)
Bulk Modulus	GPa (lb/in^{2}x10^6)	228	(33)
Poisson's Ratio	—	0.22	(0.22)
Compressive Strength	MPa (lb/in^{2}x10^3)	2600	(377)
Hardness	Kg/mm^2	1440	—
Fracture Toughness K_{IC}	MPa•m$^{1/2}$	4	—
Maximum Use Temperature (no load)	°C (°F)	1750	(3180)
Thermal			
Thermal Conductivity	W/m°K (BTU•in/ft^2•hr•°F)	35	(243)
Coefficient of Thermal Expansion	10^{-6}/°C (10^{-6}/°F)	8.4	(4.7)
Specific Heat	J/Kg•°K (Btu/lb•°F)	880	(0.21)
Electrical			
Dielectric Strength	ac-kv/mm (volts/mil)	16.9	(420)
Dielectric Constant	@ 1 MHz	9.8	(9.8)
Dissipation Factor	@ 1 kHz	0.0002	(0.0002)
Loss Tangent	@ 1 kHz	—	—
Volume Resistivity	ohm•cm	>10^{14}	—

Besi oksida (Fe_2O_3) dengan mesh 220 berfungsi sebagai bahan *Reinforcement*/penguat. Besi oksida memiliki banyak pengaplikasian terhadap teknologi seperti pigmen, katalis, bahan abrasif, dan lain-lain [31]. Ketika ditambahkan ke dalam pembuatan komposit besi oksida biasanya digunakan

sebagai bahan pengisi atau penguat. Penggunaan besi oksida sendiri terbukti meningkatkan sifat mekanik komposit kampas rem, seperti meningkatkan kekerasan dan mengurangi tingkat keausan. Selain itu, penggunaan besi oksida sebagai pengisi dapat mengurangi biaya pembuatan kampas rem dan dapat menghasilkan koefisien gesek yang tinggi [32]. Besi oksida sendiri memiliki kepadatan 5.24 g/cm^3, titik didih pada suhu 3,414^o C dan titik lebur berada di suhu 1,565C.

Fe_2O_3	Iron oxide
Density	5.24 g/cm³
Molecular Weight/ Molar Mass	159.69 g/mol
Boiling Point	3,414 °C
Melting Point	1,565 °C
Chemical Formula	Fe_2O_3

Gambar 2.15. *Properties of iron oxides (Fe_2O_3)* [33].

2.3 Pengujian Material

2.3.1 Pengujian Densitas

Uji densitas merupakan pengujian material untuk mengetahui massa suatu benda atau zat per satuan volume. Tujuan dilakukannya pengujian densitas terhadap spesimen komposit kampas rem dikarenakan untuk memastikan kualitas, kekuatan dan ketahanan dari komposit kampas rem, serta untuk memastikan material yang dihasilkan memenuhi standar keamanan dan performa dari kampas rem tersebut [34]. Pada penelitian kali ini, peneliti menggunakan perhitungan geometri untuk mencari nilai massa dan nilai volume dikarenakan bentuk spesimen tersebut memiliki bentuk tetap. Nilai densitas suatu benda dapat kita temui dengan cara massa dibagi dengan volume. Secara matematis pengujian densitas dapat dirumuskan [35].

Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai volume (V):

$$V = \pi r^2 t \tag{1. 1}$$

Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai densitas (ρ):

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1. 2}$$

Keterangan :

ρ = Densitas

m = Massa

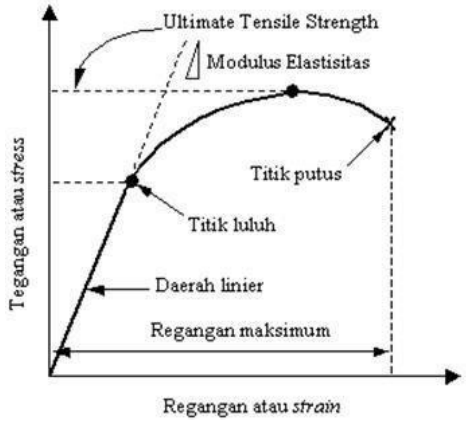
V = *Volume*

r = Jari-jari

t = Tinggi

2.3.2 Pengujian Tarik

Pengujian tarik adalah suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan tarik (*tensile strength*) pada suatu material dengan cara memberikan beban secara lambat atau cepat. Prinsip kerja dari pengujian tarik sendiri adalah menarik sebuah spesimen dengan alat penarik yang dilengkapi dengan alat pencatat data, dengan cara memberikan gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujung benda sampai spesimen tersebut putus [36]. Tujuan dilakukannya pengujian tarik pada kampas rem untuk memastikan material komposit kampas rem memiliki kekuatan tarik yang sesuai agar tahan terhadap gaya tarik dan tegangan selama proses pengereman terjadi, sehingga kampas rem dapat berfungsi dengan aman dan memiliki umur penggunaan yang lama dalam sistem pengereman kereta api [29]. Hasil dari uji tarik adalah grafik tegangan- regangan, contohnya pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Grafik tegangan-regangan [37].

Besar tegangan tarik diperoleh dari pembagian beban dan luas penampang daerah yang dikenai beban, secara matematis dapat dirumuskan [38].

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{1. 3}$$

Keterangan:

σ = Tegangan Tarik (N/mm^2)

F = Gaya (N)

A = Luas Penampang (mm^2)

Pengujian tarik juga menghasilkan nilai regangan, yaitu nilai perbandingan perubahan panjang spesimen dan panjang akhir spesimen setelah dikenai tegangan. Nilai regangan adalah proporsional. Persamaanya sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{lo} = \left(\frac{L - l_0}{l_0}\right) \quad (1.4)$$

Keterangan :

ε = Regangan

ΔL = Perubahan panjang spesimen (mm)

L_0 = Panjang awal spesimen

L = Panjang daerah ukur (mm)

Pada daerah proporsional yaitu daerah dimana tegangan-regangan yang terjadi masih sebanding. Defleksi yang terjadi masih bersifat elastis dan masih berlaku hukum *Hooke*. Besar nilai modulus elastisitas komposit yang juga merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan [39]. Persamaan yang digunakan untuk mencari nilai modulus elastisitas sebagai berikut.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.5)$$

Keterangan :

E = Modulus elastisitas (N/mm^2)

σ = Tegangan Tarik (N/mm^2)

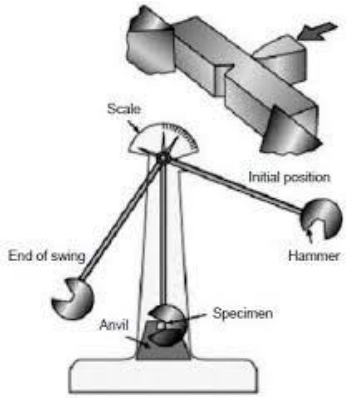
ε = Regangan (mm)

2.3.3 Pengujian Impak

Pengujian impak adalah suatu pengujian yang digunakan untuk menentukan sifat-sifat suatu material yang mendapatkan beban dinamis. Tujuan dilakukannya pengujian impak adalah untuk memastikan spesimen komposit kampas rem memiliki ketangguhan yang baik, sehingga kampas rem tahan terhadap gaya kejutan yang terjadi selama proses pengereman berlangsung dan tidak mudah mengalami retak atau patah [40]. Ada dua jenis pengujian impak yang didesain dan masih digunakan sampai sekarang untuk mengukur energi impak yang biasa disebut dengan ketangguhan akibat takikan (*notch toughness*) yakni cara *Charpy* dan cara *Izod* [41].

1. Metode *Charpy*

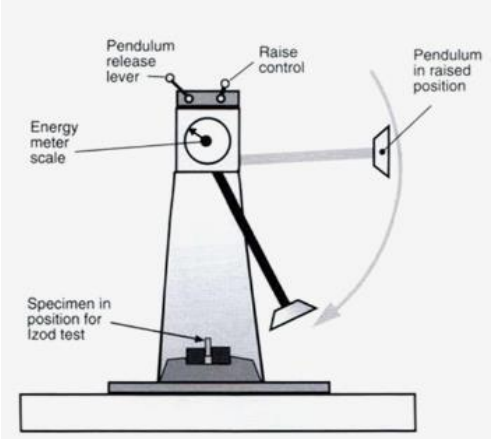
Metode *charpy* merupakan pengujian impak dengan meletakkan posisi spesimen uji pada tumpuan dengan posisi *horizontal*/mendatar dan arah pembebanan berlawanan dengan arah takikan. Berikut ilustrasi metode *charpy* yang ditampilkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17. Metode *charpy* [42].

2. Metode *Izod*

Metode *Izod* merupakan pengujian impak dengan meletakkan posisi spesimen uji pada tumpuan dengan posisi dan arah pembebanan searah dengan arah takikan. Berikut ilustrasi metode izod yang ditampilkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18. Metode *izod* [43].

Pada Pengujian impak didapatkan data untuk menghitung energi impak, yaitu energi yang diperlukan untuk mematahkan spesimen pengujian impak. Persamaan energi impak sebagai berikut [44].

$$E_s = m \times g \times \lambda(cos\,\beta - cos\,\alpha) \qquad (1.\,6)$$

Keterangan :

E = Energi serap *impact*

m = Massa pendulum (kg)

g = Kecepatan gravitasi pendulum (m/s)

λ = Besaran yang mengontrol karakteristik bahan kerja (J)

α = Sudut awal pendulum (^{0})

β = Sudut akhir pendulum (^{0})

Persamaan yang digunakan untuk menentukan harga impak (HI) :

$$HI = \frac{E}{A} \qquad (1.\,7)$$

Keterangan :

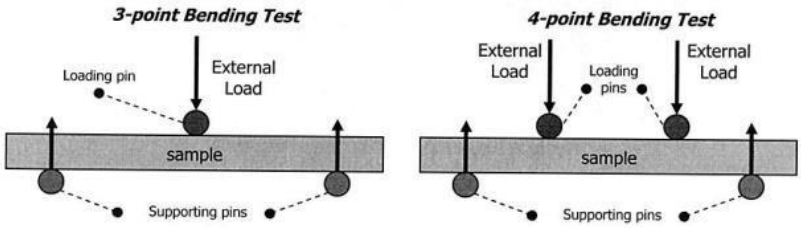
HI = Harga *impact* (J/mm^2)

E = Energi serap *impact* (J)

A = Luas penampang dibawah takik (mm^2)

2.3.4 Pengujian Bending

Uji lentur atau *bending test* merupakan pengujian material dengan memberikan tekanan untuk mengukur kekuatan lentur pada suatu material. Pengujian ini dilakukan dengan cara menekukkan spesimen dan mengukur gaya atau beban yang diperlukan. Tujuannya dilakukannya pengujian bending adalah untuk memastikan kampas rem memiliki kekuatan lentur yang cukup agar spesimen komposit kampas rem dapat menahan gaya lentur selama proses pengereman, sehingga spesimen kampas rem berfungsi dengan aman dalam proses pengereman berlangsung [45]. Terdapat dua metode pengujian bending yang sangat umum digunakan, yaitu *three point bending* yang menggunakan satu titik penekanan dan dua tumpuan, serta *four point bending* yang memiliki dua titik penekanan dan dua titik tumpuan.



Gambar 2.19. *Three point bending* dan *four point bending* [46].

Pada metode pengujian *Three point bending* memiliki kelebihan yaitu memilki kemudahan dalam persiapan serta melaksanakan pengujian. Cara kerja *three point bending* sendiri adalah spesimen uji diberikan beban pada satu titik yang berada ditengah spesimen dan memiliki tumpuan di dua penyangga. Persamaan dari *three point bending* sebagai berikut [47].

Persamaan yang digunakan untuk mencari *flexural strenght* :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (1.\ 8)$$

Keterangan :

σ_f = *Flexural strenght* (N/mm^2)

F = Besar gaya tekan (N)

L = Panjang bentang/*span* (mm)

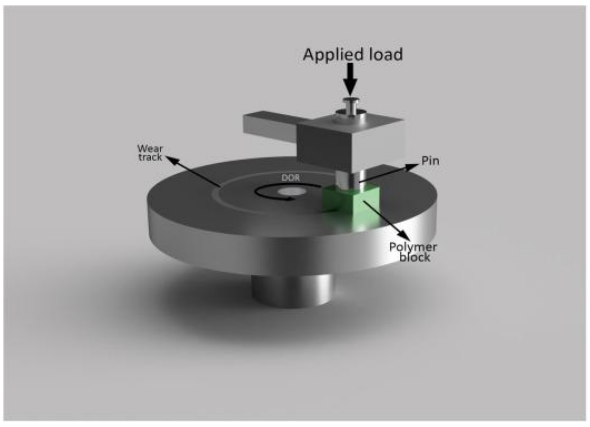
b = Lebar spesimen (mm)

d = Tebal spesimen (mm)

2.3.5 Pengujian Keausan dan Gesekan

Uji Keausan merupakan suatu pengujian karateristik fisik yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar tingkat keausan dari suatu permukaan material terhadap gesekan atau goresan [48]. Uji keausan juga dapat dikategorikan sebagai pengujian yang bersifat kritis pada pengaplikasian kampas rem guna untuk memastikan kampas rem komposit memiliki daya tahan terhadap keausan, umur pakai, dan keamanan yang sesuai dengan standar keamanan sebelum digunakan pada kendaraan [49]. Pada Penelitian kali ini peneliti menggunakan *metode pin on disc*.

Metode *pin on disc* sendiri merupakan metode karakteristik koefisien gesek, gaya gesekan, dan tingkat keausan antara dua bahan. Metode *pin on disc* sendiri terdiri dari pin dibawah beban yang diterapkan dengan sebuah *disc* yang berputar. Biasanya pin yang digunakan berbentuk bulat untuk menyederhanakan geometri dari suatu kontak. Cara kerja dari metode ini adalah beban akan diberikan pada pin. Pin tersebut bergerak ke bawah menyentuh spesimen yang diputar pada *disc* yang digerakkan oleh motor penggerak [50].



Gambar 2.20. Ilustrasi uji keausan *pin on disc* [51].

Pada uji keausan didapatkan data untuk menghitung nilai koefisien gesek dan nilai keausan spesifik, dari data tersebut didapatkan nilai ketahanan spesimen terhadap keausan. Menurut persamaan yang digunakan untuk mencari koefisien gesek dan nilai keausan spesifik sebagai berikut [52].

Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai koefisien gesek (μ):

$$\mu = \frac{f}{N} \tag{1. 9}$$

Keterangan :

μ = Koefisien gesek

f = *Friction force* (N)

N = Beban (N)

Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai keausan spesifik (Ws):

$$Ws = \frac{\Delta V}{N \times D} \tag{1. 10}$$

Keterangan :

Ws = Keausan spesifik (mm^2/N)

ΔV = Volume aus (mm^2)

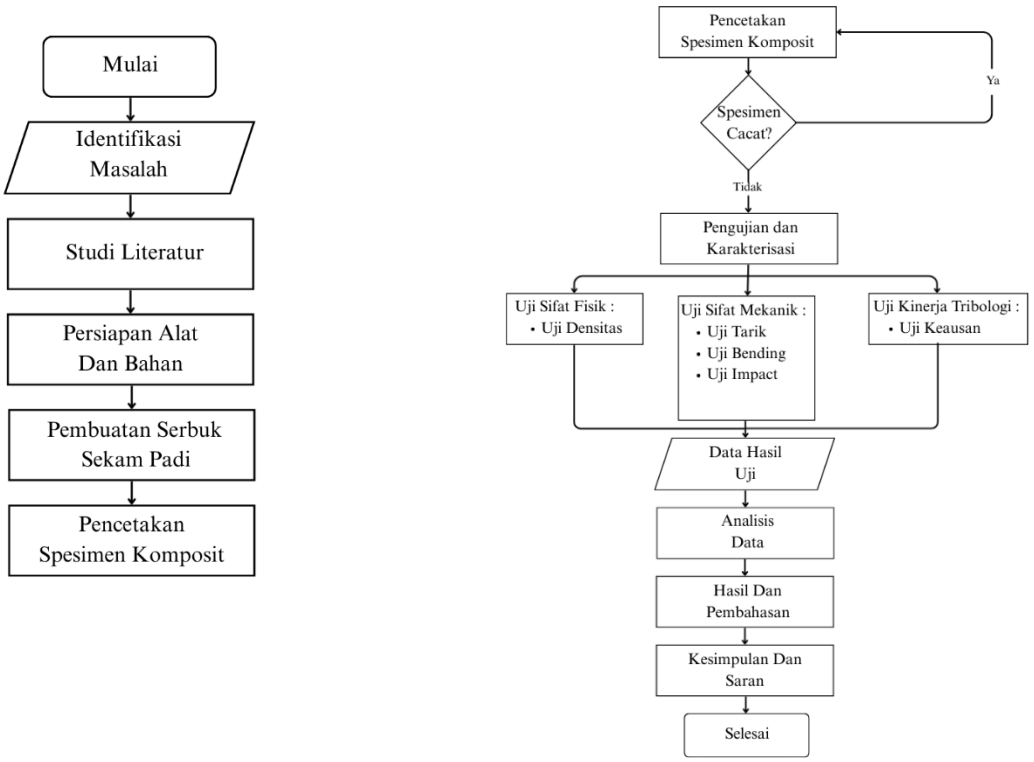
N = Beban (N)

D = Jarak sliding (mm)

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Proses Penelitian pada tugas akhir ini memiliki alur yang ditunjukan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alur penelitian.

3.2 Peralatan dan Bahan

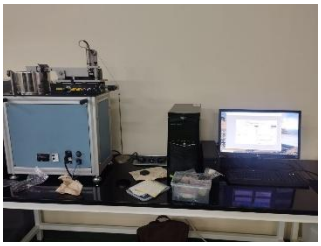
Berikut ini adalah daftar alat dan bahan yang digunakan sebagai pendukung proses penelitian ini, Seperti yang terdapat pada Tabel 3.1 dan 3.2.

Tabel 3.1. Alat penelitian.

No	Nama Alat	Gambar	Fungsi
1.	Cetakan		Cetakan digunakan untuk mencetak spesimen komposit sesuai dengan bentuk dan ukuran yang dibutuhkan, terbuat dari alumunium 5051.
2.	Gelas Plastik		Gelas plastik digunakan sebagai wadah untuk menimbang berat bahan-bahan penyusun komposit sebelum dimasukkan ke wadah pencampuran.
3.	Alat Penepung (*Crusher*)		Alat penepung digunakan untuk menghaluskan sekam padi sesuai dengan ukuran partikel yang diinginkan.

No	Nama Alat	Gambar	Fungsi
4.	Ayakan		Ayakan berfungsi sebagai penyaring serbuk sekam padi guna memisahkan partikel yang tidak sesuai, sehingga diperoleh partikel berukuran 100 *mesh* yang sesuai kebutuhan.
5.	*Oven*		*Oven* digunakan untuk megeringkan kandungan air pada sekam padi dan untuk mengawetkan spesimen yang sudah dicetak.
6.	*Hand Mixer*		*Hand mixer* digunakan sebagai alat pengaduk bahan-bahan spesimen komposit.
7.	Timbangan Digital		Timbangan digunakan untuk menimbang berat bahan material komposit berdasarkan hitungan fraksi volume dengan tingkat ketelitian 0,1 gram.

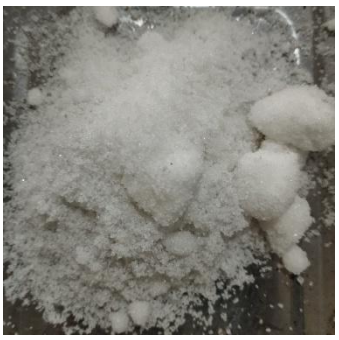
No	Nama Alat	Gambar	Fungsi
8.	Wadah Pencampuran		Wadah pencampuran berfungsi sebagai wadah tempat pencampuran semua bahan spesimen komposit dan wadah tersebut berbentuk baskom.
9.	Mesin Hidraulik *Hot Press*		Mesin ini digunakan sebagai alat press untuk mencetak komposit dengan penekanan panas.
10.	Alat Pelepas Spesimen		Alat ini digunakan untuk melepaskan spesimen dari cetakan setelah proses pengepresan.
11.	Amplas		Digunakan untuk mengamplas sisa dari proses pembuatan cetakan.

No	Nama Alat	Gambar	Fungsi
12.	Obeng		Untuk melepas cetakan.
13.	Sarung Tangan Las		Digunakan untuk memegang cetakan setelah dilakukannya proses pengepresan.
14.	Alat Uji Keausan		Melakukan pengujian keausan dan gesekan.
15.	Alat Uji Bending		Melakukan pengujian bending.

No	Nama Alat	Gambar	Fungsi
16.	Alat Uji Tarik		Melakukan uji tarik.
17.	Alat uji impak *charpy*		Melakukan pengujian impak *charpy*.

Tabel 3.2. Bahan penelitian.

No	Nama Bahan	Gambar	Fungsi
1.	Sekam Padi		Berfungsi Sebagai bahan pengisi pada pembuatan spesimen kampas rem.

No	Nama Bahan	Gambar	Fungsi
2.	Resin fenolik		Berfungsi sebagai matriks dalam pembuatan spesimen kampas rem.
3.	Katalis *Hexamine*		Berfungsi sebagai pengeras pada resin fenolik.
4.	Alumunium Oksida		Berfungsi sebagai bahan abrasif dalam pembuatan spesimen kampas rem.
5.	Besi Oksida		Berfungsi sebagai bahan penguat dalam pembuatan spesimen kampas rem.

No	Nama Bahan	Gambar	Fungsi
6.	Pelumas Cetakan		Berfungsi sebagai pelapis cetakan agar tidak mengalami lengket pada saat pelepasan cetakan.

3.3 Pembuatan Serbuk Sekam Padi

Proses pertama dalam pembuatan serbuk sekam padi adalah pembakaran sekam padi yang dilakukan dengan menggunakan mesin *furnice* dengan temperatur yang digunakan 600^{o}C dengan estimasi waktu pembakaran selama 60 menit. Pembakaran sekam padi sendiri memiliki kegunaan untuk menghilangkan kadar air pada sekam padi, serta mengubah warna sekam menjadi hitam yang dapat menghasilkan senyawa silika yang lebih tinggi.

Setelah proses pembakaran, sekam padi akan digiling menggunakan alat penggiling (*crusher*) sampai sekam padi tersebut menjadi material serbuk, sehingga menghasilkan struktur material gesek yang bagus.

Proses terakhir dalam pembuatan sekam padi adalah pengayakan yang dilakukan secara manual. Pengayakan sekam padi bertujuan untuk memisahkan partikel sekam padi dengan mengelompokkan butirannya berdasarkan ukuran dari ayakan. Jenis ukuran yang digunakan dalam proses pengayakan yakni terdiri dari *mesh* 60, 80, dan 100. Pada penelitian ini, ukuran *mesh* dari sekam padi yang digunakan adalah 100.

3.4 Pembuatan Spesimen Komposit

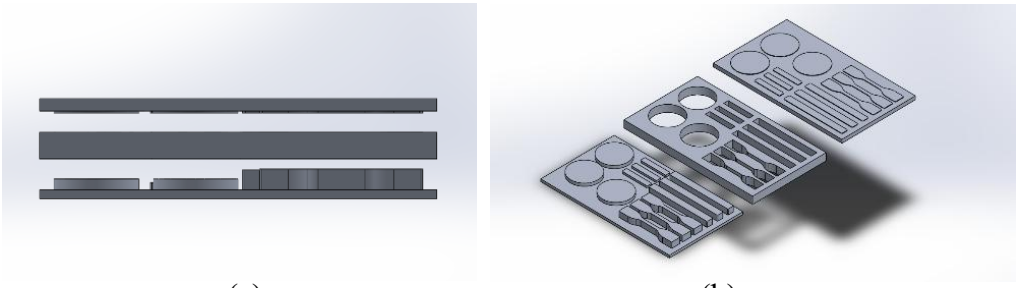
3.4.1 Pembuatan Cetakan Spesimen

Pada penelitian kali ini, dimensi pembuatan cetakan spesimen mengikuti standar acuan ASTM dari masing-masing spesimen uji yang telah ditentukan. Bahan yang digunakan untuk membuat cetakan spesimen adalah alumunium 5051.

Proses pembuatan cetakan spesimen sendiri memiliki 2 tahapan, yakni:

1. Proses desain cetakan

Proses desain cetakan merupakan proses pertama dalam pembuatan cetakan spesimen. Proses desain sendiri menggunakan *software Solidworks* dengan acuan dimensi menggunakan standar ASTM.



(a) (b)

Gambar 3.2. (a) Tampak samping (b) Tampak isometrik.

2. Proses Pemesinan

Proses pemesinan merupakan tahap selanjutnya dari proses desain. Proses ini dilakukan di Laboratorium Pusat Studi Inovasi dan Kreativitas Prodi Teknik Mesin UII dengan menggunakan mesin *CNC Milling*. Sebelum masuk proses pemesinan, desain dimasukkan ke *software Autodesk Fusion* 360 untuk mendapatkan *NC program* guna menjalankan mesin.



Gambar 3.3. Proses permesinan.

3.4.2 Perhitungan *Volume* Material Komposit

Pada penelitian ini, peneliti menggunakan *volume* penyusun material komposit yang terdiri dari resin fenolik 40%, sekam padi 20%, katalis *hexamine* 10%, alumunium oksida 15%, dan besi Oksida 15%. Terdapat beberapa tahap

dalam menentukan *massa* (m) pada *volume*:

Tahap pertama, mencari *volume* dari cetakan komposit (Vc).

$V_{uji\ tarik} = p \times l \times t$ $= 115mm \times 19mm \times 3mm$ $= 6555\ mm^3$ $= 6{,}555\ cm^3$	$V_{uji\ lentur} = p \times l \times t$ $= 125\ mm \times 12{,}7mm \times 3{,}2mm$ $= 5161{,}28\ mm^3$ $= 5{,}16128\ cm^3$
$V_{uji\ impak} = p \times l \times t$ $= 55mm \times 10mm \times 10mm$ $= 5555\ mm^3$ $= 5,55\ cm^3$	$V_{uji\ keausan} = \pi\ r^2 t$ $= 3{,}14 \times (3\ cm)^2 \times 0{,}8cm$ $= 22{,}608\ cm^3$

Total *volume* cetakan uji spesimen.

$$V_{total} = 6{,}555\ cm^3 + 5{,}16128\ cm^3 + 5{,}55\ cm^3 + 22{,}608\ cm^3 = 39{,}823\ cm^3$$

Tahap kedua, menghitung fraksi *volume* diantaranya resin fenolik (40%), serbuk sekam padi (20%), alumunium oksida (15%), besi oksida (15%), dan katalis *hexamine* (10%).

$V_{fenolik} = V_{fenolik} \times V_c$ $= 40\ \% \times 39{,}823\ cm^3$ $= 15{,}93\ cm^3$	$m_{fenolik} = p_{fenolik} \times V_{fenolik}$ $= 1{,}25\ g/\ cm^3 \times 15{,}93\ cm^3$ $= 19{,}9\ g$
$V_{sekam} = V_{sekam\ padi} \times V_c$ $= 20\ \% \times 39{,}823\ cm^3$ $= 7{,}97\ cm^3$	$m_{sekam} = p_{sekam} \times V_{sekam}$ $= 0{,}9\ g/\ cm^3 \times 7{,}97\ cm^3$ $= 7{,}17\ g$

$V_{Al_2o_3} = V_{Al_2o_2} \times V_c$ $= 15\ \% \times 39{,}823\ cm^3$ $= 5{,}97\ cm^3$	$m_{Al_2o_3} = p_{Al_2o_2} \times V_{Al_2o_2}$ $= 3{,}94\ g/\ cm^3 \times 5{,}97\ cm^3$ $= 23{,}5\ g$
$V_{Fe_2o_3} = V_{Fe_2o_3} \times V_c$ $= 15\ \% \times 39{,}823\ cm^3$ $= 5{,}97\ cm^3$	$m_{Fe_2o_3} = p_{Fe_2o_3} \times V_{Fe_2o_3}$ $= 5{,}25\ g/\ cm^3 \times 5{,}97\ cm^3$ $= 31{,}3\ g$
$V_{hexam} = V_{hexam} \times V_c$ $= 10\ \% \times 39{,}823\ cm^3$ $= 3{,}98\ cm^3$	$m_{hexam} = p_{hexam} \times V_{hexam}$ $= 1{,}33\ g/\ cm^3 \times 3{,}98\ cm^3$ $= 5{,}3\ g$

3.4.3 Pencetakan Spesimen Komposit

Proses pencetakan spesimen memiliki beberapa metode, berikut metode yang peneliti gunakan dalam proses pencetakan spesimen :

1. Menyiapkan beberapa alat yang akan digunakan seperti gelas plastik, *hand mixer*, timbangan digital, baskom (wadah pencampuran), dan cetakan spesimen.
2. Menyiapkan bahan yang akan digunakan dalam proses pencetakan seperti serbuk sekam padi yang telah di haluskan, resin fenolik, katalis *hexamine*, alumunium oksida, besi oksida, dan WD-40 (pelapis anti lengket).
3. Membersihkan cetakan dari debu atau kotoran dan melapisi cetakan dengan menggunakan WD-40 pada setiap lapisan cetakan berfungsi sebagai anti lengket sehingga memudahkan melepas spesimen pada cetakan.
4. Menimbang komposisi resin fenolik, sekam padi, katalis *hexamine*, alumunium oksida, dan besi oksida sesuai dengan fraksi *volume* yang telah ditentukan. Kemudian, menuangkan material tersebut ke dalam gelas plastik yang sudah disiapkan diatas timbangan digital.
5. Menuangkan semua bahan-bahan yang sudah ditimbang ke dalam baskom,

kemudian mengaduk bahan tersebut menggunakan *hand mixer* selama 5 menit.

6. Menuangkan bahan-bahan yang sudah dicampurkan ke dalam cetakan.
7. Bahan yang sudah dimasukkan kedalam cetakan, kemudian di *press* dengan menggunakan mesin *Hydraulic Hot Press* tanpa adanya perlakuan panas selama 5 menit guna untuk memadatkan bahan-bahan campuran tersebut.
8. Setelah proses pengepresan, cetakan diambil kembali guna dilakukan proses pengisian bahan-bahan komposit, kemudian dilakukan proses pengepresan dengan menggunakan perlakuan panas selama 30 menit.
9. Setelah dilakukannya proses pengepresan, cetakan diambil dari mesin *Hydraulic Hot Press* serta dilakukannya proses pendinginan terhadap cetakan, kemudian melepas material komposit dari spesimen menggunakan alat pelepas yang berupa kayu yang dibentuk dengan menyesuaikan ukuran dari spesimen agar mempermudah pelepasan.
10. Proses pembuatan selesai, kemudian mengulangi langkah-langkah tersebut untuk membuat variasi lain dan pembuatan spesimen yang mengalami cacat.
11. Setelah itu, dilakukannya proses pengujian.

Berdasarkan hasil proses percetakan spesimen yang telah dilaksanakan terdapat beberapa variabel penelitian. Berikut adalah variabel penelitian yang ditampilkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Spesimen pada penelitian ini.

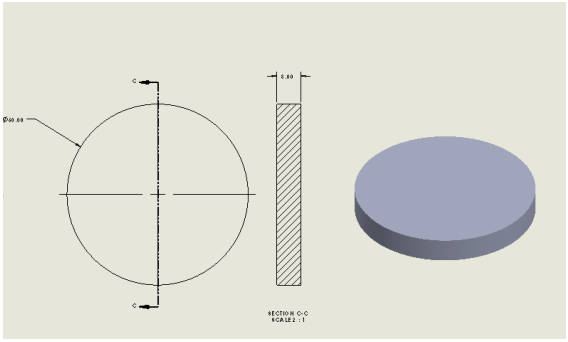
Variabel Penelitian			
Kode Spesimen	Variabel bebas	Variabel Terikat	Variabel Control
A120	Suhu 120^{o}C	Pengujian densitas, Pengujian tarik, Pengujian Impak, Pengujian bending, dan Pengujian keausan dan gesekan	Fraksi volume yang digunakan Yaitu 40%, 10%, 20%, 15% dan 15%, tekanan 10 Mpa, matriks yang digunakan yaitu resin fenolik, dan waktu pengepresan 30 menit.
A150	Suhu 150^{o}C		
A180	Suhu 180^{o}C		

3.5 Proses Pengujian

3.5.1 Pengujian Densitas

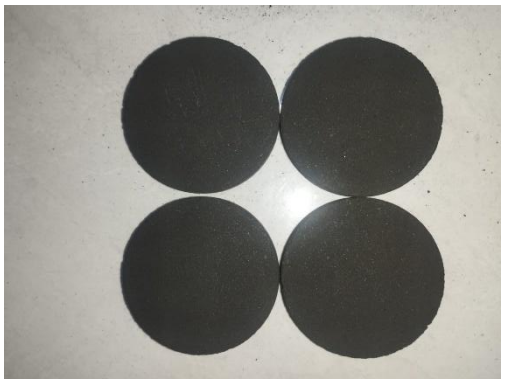
Pengujian densitas pada penelitian kali ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Universitas Islam Indonesia. Gambar 3.4 merupakan standar yang

digunakan pada pengujian ini mengacu pada ASTM D792.



Gambar 3.4. Dimensi uji keausan.

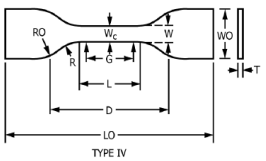
Pengujian densitas dilakukan menggunakan cara *geometri* yaitu mengukur dan menimbang berat spesimen untuk mengetahui *volume* dan tingkat kerapatan dari sebuah spesimen. Untuk penimbangan berat spesimen digunakan timbangan dengan ketelitian 0,001. Spesimen pengujian densitas terdapat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Spesimen uji densitas.

3.5.2 Pengujian Tarik

Pengujian tarik pada penelitian kali ini dilakukan di Laboratorium BBKKP (Balai Besar Kulit, Karet, dan Plastik). Gambar 3.6 merupakan standar yang digunakan dalam pengujian ini mengacu pada ASTM D638-14 tipe IV.



TYPE IV

Specimen Dimensions for Thickness, *T*, mm (in.)[A]

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV[B]	Type V[C,D]	
W—Width of narrow section[E,F]	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02)[B,C]
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02)[C]
WO—Width overall, min[G]	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO—Width overall, min[G]	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO—Length overall, min[H]	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length[I]	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010)[C]
G—Gage length[I]	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5)[J]	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04)[C]
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

iTeh Standards
(https://standards.iteh.ai)

Gambar 3.6. Dimensi spesimen uji tarik [53].

Alat yang digunakan pada pengujian tarik adalah UTM (*universal testing* machine*) ibertest series TESTCOM-5/EMD2W*. Cara pengujian tarik yang dipakai adalah menjepit kedua tepi spesimen dan diposisikan secara vertikal. Mesin *ibertest* akan menarik spesimen hingga terputus. Pada saat bersamaan mesin *ibertest* akan menampilkan hasil tegangan melalui *Software* yang digunakan untuk menjalankan mesin tersebut. Dari proses pengujian tersebut didapatkan beberapa data yang dugunakan untuk mencari nilai tegangan tarik (σ), regangan, dan modulus elastisitas. Spesimen uji tarik dan alat uji tarik ditampilkan pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8.



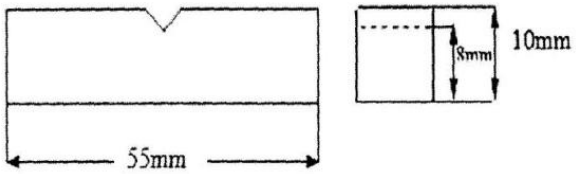
Gambar 3.7. Spesimen uji tarik.



Gambar 3.8. Alat uji tarik.

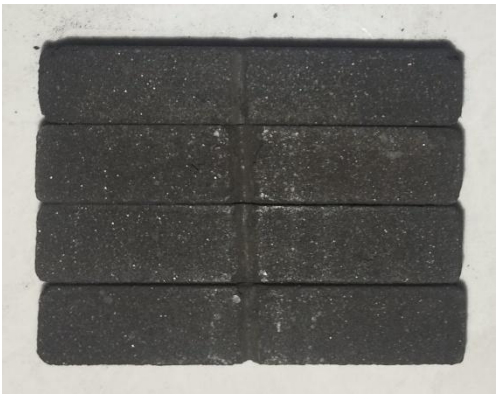
3.5.3 Pengujian Impak

Pengujian impak bertujuan untuk mengetahui nilai ketangguhan impak dari material. Pengujian impak ini dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik Dapartemen Teknik Mesin UGM. Gambar 3.9 merupakan standar yang digunakan dalam pengujian ini mengacu pada pada ASTM E23-23.



Gambar 3.9. Dimensi spesimen uji *impact charpy* [54].

Metode yang digunakan adalah metode *charpy* dengan kampuh V. Pada pengujian impak didapatkan data setelah bandul menghantam spesimen. Data tersebut dimasukkan ke perhitungan untuk mendapatkan nilai energi serap guna untuk mencari nilai harga impak dari spesimen tersebut. Spesimen uji impak dan alat pengujian impak terdapat pada Gambar 3.10 dan Gambar 3.11.



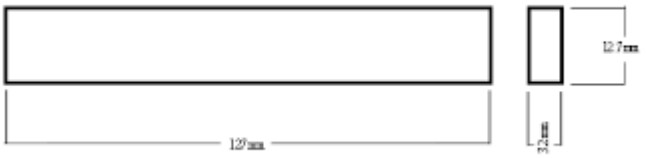
Gambar 3.10. Spesimen uji impak.



Gambar 3.11. Alat uji tarik.

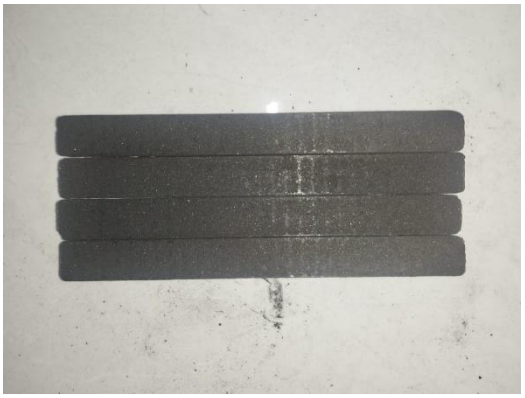
3.5.4 Pengujian Bending

Pengujian bending bertujuan untuk mengetahui nilai *flexural strenght* dari material. Pengujian bending ini dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik Departemen Teknik Mesin UGM. Gambar 3.12 merupakan standar yang digunakan dalam pengujian ini mengacu pada ASTM D790-17.



Gambar 3.12. Dimensi spesimen uji bending [55].

Metode yang digunakan adalah metode 3 *point bending test* dan pembebanan *face band*. Pembebanan dilakukan sampai spesimen mengalami patah dan panel pada mesin berhenti naik. Dari pengujian tersebut terdapat beberapa data yang digunakan untuk mencari nilai *flexural strenght*. Spesimen uji bending dan alat pengujian bending terdapat pada Gambar 3.13 dan Gambar 3.14.



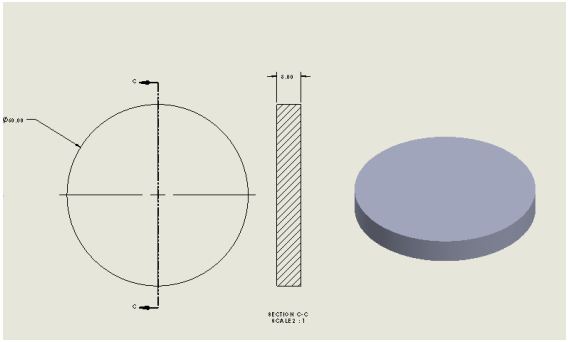
Gambar 3.13. Spesimen uji bending.



Gambar 3.14. Alat uji bending.

3.5.5 Pengujian Keausan dan Gesekan

Pengujian keausan pada penelitian kali ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Universitas Islam Indonesia. Gambar 3.15 merupakan standar yang digunakan pada pengujian ini mengacu pada ASTM G99.

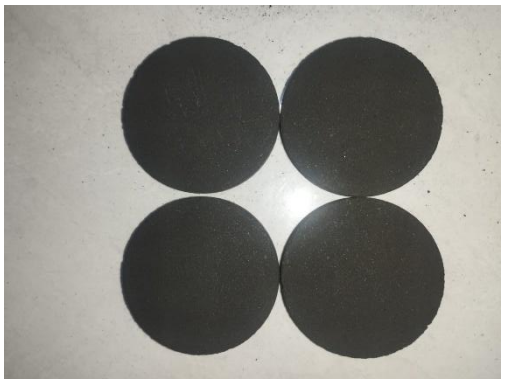


Gambar 3.15. Dimensi uji keausan.

Pengujian keausan dengan menggunakan metode *pin on disc* dilakukan dengan memasang pin dan spesimen pada cekam yang ada dialat uji. Setelah itu, menentukan wear track, beban, waktu dan *RPM* pada *software* khusus pengujian. Pin pada mesin tribologi akan memutar membentuk *wear track* yang berupa lingkaran sampai batas waktu yang telah ditentukan sebelum dilakukannya pengujian. Dari proses pengujian tersebut diperoleh data yang akan digunakan untuk mencari nilai dari koefisien gesek dan *wear spesific.* Spesimen uji dan alat pengujian keausan terdapat pada Gambar 3.16 dan Gambar 3.17.



Gambar 3.16. Spesimen uji keausan.



Gambar 3.17. Alat uji keausan.

3.6 Analisis Data

Analisis data akan dilakukan berdasarkan dari hasil percobaan yang dilakukan dengan cara membandingkan percobaan dari spesimen dengan variasi suhu 120^{o}C, 150^{o}C dan 180^{o}C. Masing-masing spesimen dilakukan tiga kali pengujian yang sama. Hasil yang digunakan pada pembahasan adalah rata-rata dari ketiga pengujian tersebut.

Setelah diketahui hasil dari pengujian masing-masing spesimen kemudian hasil tersebut dimasukkan kedalam diagram sehingga diketahui perbedaan dari spesimen dengan variasi 120^{o}C, 150^{o}C dan 180^{o}C baik terkait pengujian sifat fisik, mekanik dan tribologi. Setelah dilakukannya perbandingan antar spesimen maka, tahap selanjutnya dari analisis data yaitu membandingkan nilai optimal dari setiap pengujian dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya dan standar acuan yang digunakan.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Densitas

Hasil pengujian Densitas menggunakan standar ASTM D792. Sebelum melakukan pengujian, spesimen diukur dan ditimbang untuk mendapatkan nilai massa dari spesimen tersebut. Dari data tersebut dilakukan perhitungan untuk mengetahui hasil dari kerapatan spesimen tersebut atau yang biasa disebut dengan densitas. Berikut adalah perhitungan dari salah satu variasi dari pengujian keausan.

Spesimen A120-1 (Spesimen 1 suhu 120°C)

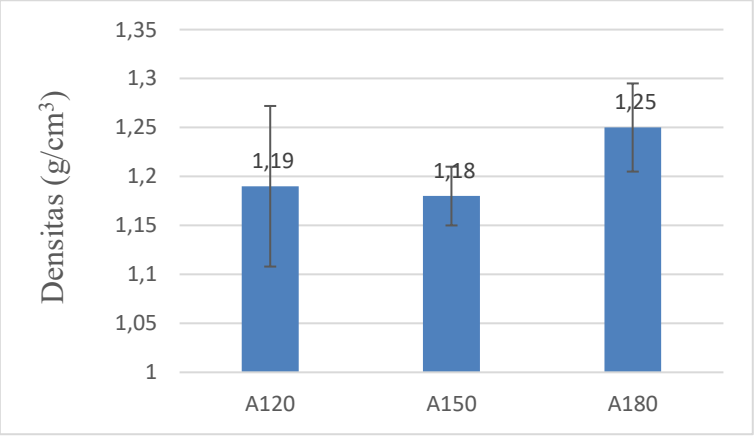
Diketahui m = 28,017 g, volume (V) = 22.184,1 mm^3, r = 30 mm, t = 7,85 mm.

Menentukan volume (V) dan nilai densitas (ρ) :

$$V = 3{,}14 \times 30^2 \times 7{,}85 = 22.184{,}1 \text{ mm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{26{,}017}{22.184{,}1} = 0{,}001171 \text{ g/mm}^3 = 1{,}17 \text{ g/cm}^3$$

Selanjutnya, seluruh hasil perhitungan densitas setiap variasi dirata-ratakan dan disimpulkan menjadi satu dalam diagram batang yang dapat mewakilkan dari data masing-masing variasi. Berikut adalah diagram batang dari hasil perhitungan densitas yang ditampilkan pada Gambar 4.1.

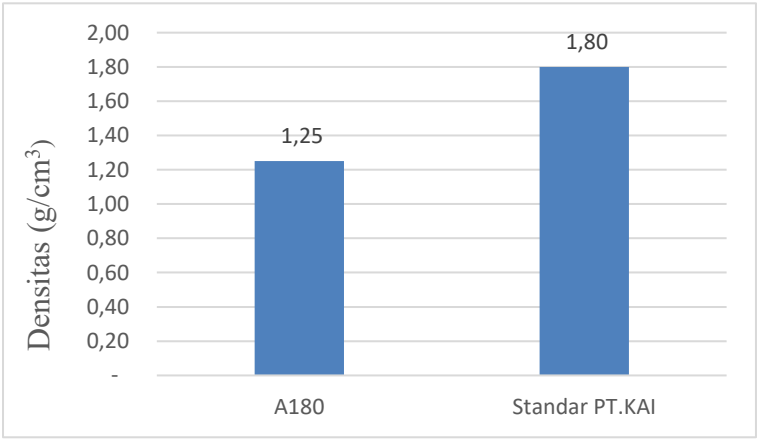


Gambar 4.1. Diagram hasil uji densitas.

Dari diagram hasil uji diatas, terlihat bahwa dari setiap variasi suhu mempengaruhi densitas spesimen yang diuji. Spesimen dengan variasi suhu 150°C memiliki densitas terkecil dengan nilai rata-rata 1,18 g/cm^3. Pada spesimen dengan variasi suhu 120°C, memiliki nilai rata-rata sebesar 1,19 g/cm^3. Dan setelah itu pada variasi 180°C, memiliki nilai yang paling optimal dibandingkan dengan suhu 120°C

dan 150ºC yaitu dengan rata-rata densitas sebesar 1,25 g/cm^3.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Anggreni, setiap kenaikan variasi suhu pada komposit umumnya menghasilkan nilai densitas yang lebih tinggi. Hal ini menyebabkan komposit menjadi lebih padat, mengurangi porositas, dan meningkatkan kerapatan struktural [56]. Namun, tren tersebut tidak sepenuhnya sesuai dengan hasil pengujian. Pada variasi suhu 150°C, nilai densitas justru mengalami penurunan. Penurunan ini mungkin disebabkan oleh terjadinya lelehan lokal pada resin, yang membuat struktur spesimen menjadi kurang stabil dan meninggalkan rongga yang belum sepenuhnya tertutup. Akibatnya, densitas yang dihasilkan belum optimal. Selanjutnya, pada variasi suhu 180°C, nilai densitas kembali meningkat. Peningkatan ini terjadi karena proses pemanasan yang lebih optimal menyebabkan spesimen mengalami pemadatan ulang. Selain itu, matriks resin mencair dan mengisi rongga kosong di antara serat atau partikel, sehingga porositas menurun, nilai densitas kembali naik, dan ikatan antar komponen menjadi lebih baik.



Gambar 4.2. Diagram perbandingan nilai densitas.

Pada Gambar 4.2 ditampilkan diagram hasil perbandingan antara nilai densitas optimal yang diperoleh dan nilai dari standar dari PT. KAI. Nilai densitas standar acuan PT. KAI, yaitu 1,8–2,4 g/cm³, digunakan sebagai acuan dalam pembuatan kampas rem. Pada pengujian dengan variasi suhu 180°C, nilai densitas yang diperoleh adalah 1,25 g/cm³. Berdasarkan acuan dari standar PT. KAI nilai tersebut belum memenuhi standar yang telah ditetapkan.

4.2 Pengujian Tarik

Hasil pengujian tarik menggunakan standar ASTM D638-14 tipe IV, Spesimen diberikan beban sebesar F secara bertahap dan kontinu hingga mencapai *Fmax* yang ditunjukkan oleh mesin UTM. Selanjutnya, ketebalan spesimen dan panjang awal dari spesimen diukur dengan jangka sorong. Dari berbagai data tersebut, diperoleh hasil berupa grafik tegangan-regangan dan tabel hasil pengujian. Berikut adalah perhitungan dari salah satu variasi dari pengujian tarik.

Spesimen A180-3 (Spesimen 3 suhu 180^{o}C)

Diketahui F = 44,7 N, luas penampang (A) = 21,131 mm^2, panjang awal (l) = 50 mm, perubahan panjang (l_o) = 50,16 mm.

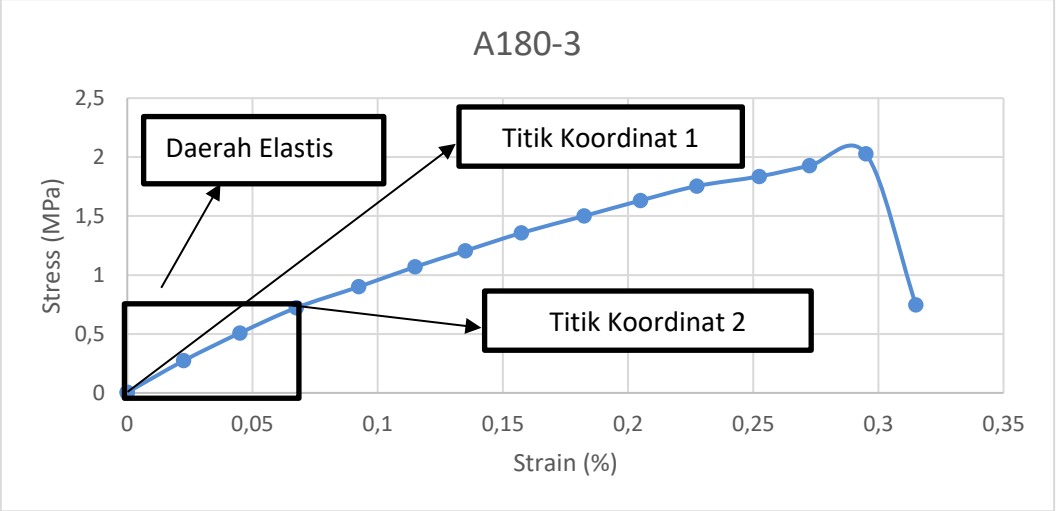
Menentukan Kekuatan tarik (σ) :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{44,7}{21,131} = 2,12 \text{ MPa}$$

Menentukan regangan (ε) :

$$\varepsilon = \frac{l_o - l}{l_o} = \frac{50,16-50}{50} \times 100\% = 0,32\ \%$$

Setelah mendapat nilai hasil perhitungan tegangan tarik dan regangan maka dibuatlah grafik tegangan-regangan yang digunakan untuk mencari nilai modulus elastisitas dari spesimen. Berikut grafik tegangan-regangan dari salah satu variasi spesimen.

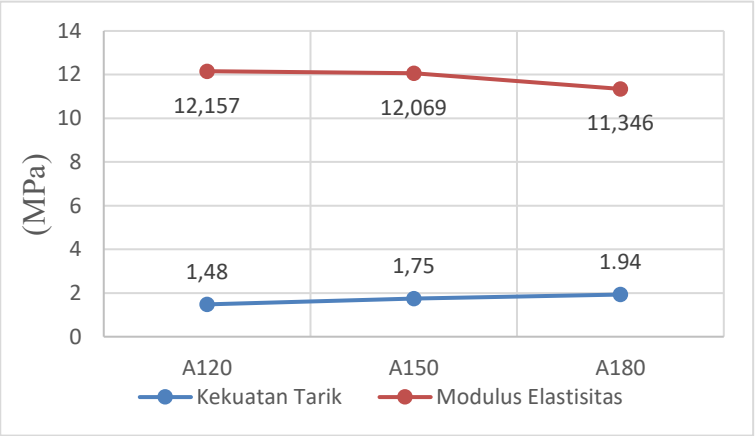


Gambar 4.3. Grafik tegangan-regangan

Menentukan modulus elastisitas (Y) :

$$Y = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{0{,}72168 - 0{,}00260}{0{,}0675 - 0} = 10{,}653 \text{ MPa}$$

Selanjutnya, seluruh hasil perhitungan tegangan tarik dan modulus elastisitas dari seluruh spesimen disimpulkan menjadi satu dalam diagram batang yang dapat mewakilkan dari data masing-masing variasi.

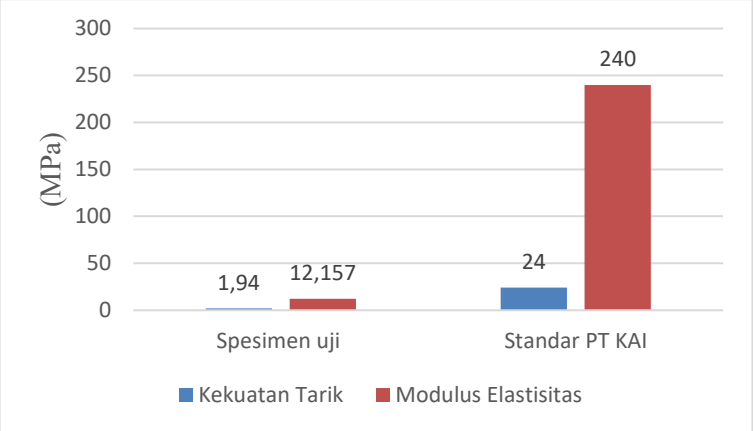


Gambar 4.4. Diagram kekuatan tarik dan modulus elastisitas.

Pada Gambar 4.4 diagram tegangan tarik dan modulus elastisitas, terlihat bahwa dari setiap variasi suhu mempengaruhi kekuatan tarik spesimen yang diuji. Spesimen pada suhu 120°C memiliki kekuatan tarik terkecil dengan nilai rata-rata 1,46 MPa. Pada spesimen dengan variasi suhu 150 °C, nilai kekuatan tarik naik menjadi 1,72 MPa. Dan setelah itu pada variasi 180 °C, memiliki nilai kekuatan tarik yang optimal nilai 1,94 MPa. Pada spesimen tersebut menunjukkan kekuatan maksimum dari material komposit yang diuji. Pada spesimen variasi 120°C memiliki nilai modulus elastisitas yang besar yaitu 12,157 MPa. Sedangkan untuk spesimen dengan variasi 150°C, memiliki nilai modulus elastisitas 12,069 MPa. Sedangkan variasi 180°C memiliki nilai modulus elastisitas yang kecil dari pada spesimen dengan variasi suhu 120°C dan 150°C, dengan nilai 11,346 MPa.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Saputra R, seiring dengan kenaikan suhu yang dialami oleh spesimen kekuatan tarik yang didapat semakin meningkat begitu pula dengan nilai regangan, akan tetapi nilai dari modulus elastisitasnya akan menurun [57]. Pada pengujian ini hasil dari perhitungan kekuatan tarik, regangan, dan modulus elastisitas sesuai dengan tren yang ada. Pada suhu 180°C memiliki nilai kekuatan tarik sebesar 1,94 MPa, nilai regangan sebesar 0,32% dan nilai modulus elastisitas 11,346 MPa. Pada suhu 180°C proses *hot compression* dapat

meningkatkan kekuatan tarik dari komposit kampas rem dengan memperbaiki struktur mikro dan ikatan antar partikel sehingga membuat spesimen memiliki kepadatan tinggi dan memiliki porositas yang rendah, akan tetapi juga dapat menurunkan modulus elastisitas karena mengalami degradasi elastisitas pada material kampas rem. Pada suhu 120^{o}C dan 150^{o}C memiliki nilai kekuatan tarik dan nilai regangan yang lebih kecil dari pada suhu 180^{o}C. Akan tetapi, memiliki nilai modulus elastisitas yang tinggi dikarenakan proses pencairan pada resin belum optimal sehingga ikatan antar partikel melemah dan mudah mengalami kerusakan, akan tetapi material masih kaku dan mampu menahan degradasi elastis dengan baik sebelum terjadinya kerusakan pada spesimen.



Gambar 4.5. Diagram Perbandingan kekuatan tarik dan modulus elastisitas.

Pada Gambar 4.5 ditampilkan diagram hasil perbandingan antara nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas optimal yang diperoleh dan standar dari PT. KAI. Nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas standar acuan PT. KAI, yaitu 24 MPa dan 240 MPa, digunakan sebagai acuan dalam pembuatan kampas rem. Berdasarkan diagram tersebut, pada pengujian dengan variasi suhu 180°C, memiliki nilai kekuatan tarik optimal diantara spesimen uji lainnya dengan nilai yang diperoleh adalah 1,94 MPa dan nilai modulus elastisitas optimal yang didapatkan pada suhu 120^{o}C yaitu dengan nilai 12,175 MPa. Dari hasil tersebut spesimen uji belum memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh PT. KAI.

4.3 Pengujian Impak

Spesimen pada pengujian impak akan dihantam bandul dengan ketinggian, sudut, serta berat yang sudah ditentukan. Standar yang digunakan adalah ASTM E23 dengan metode pengujian impak *charpy*. Pada pengujian ini didapatkan data sudut setelah hantaman bandul. Selanjutnya sudut ini digunakan untuk perhitungan energi yang diserap saat spesimen dihantam oleh bandul. Setelah mendapatkan hasil energi serap perhitungan tersebut digunakan untuk mencari nilai harga impak yang menentukan ketangguhan impak spesimen. Berikut adalah perhitungan energi yang diserap dan harga impak pada salah satu spesimen.

Spesimen A120-1 (Spesimen 1 suhu 120°C)

Diketahui sudut α = 156, sudut β = 154, luas penampang = 80 mm^2, panjang lengan = 0.83, dan berat bandul = 1kg.

Menentukan energi serap (E) :

$$E = m \times g \times R(\cos\beta - \cos\alpha)$$

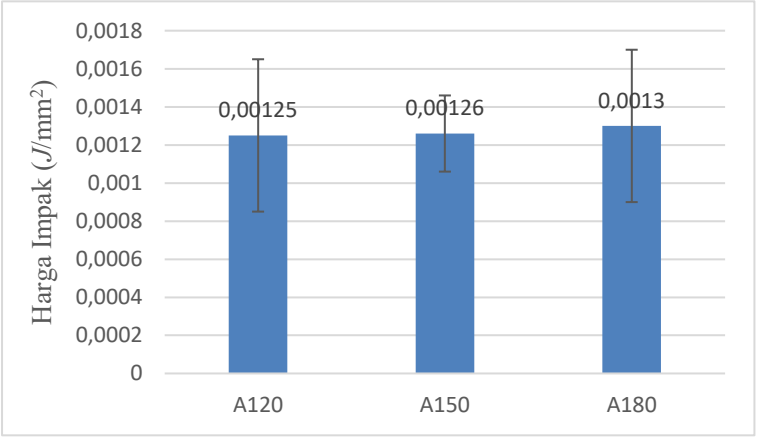
$$E = 9{,}81 \times 0{,}83(\cos 154 - \cos 156)$$

$$E = 8{,}142(-0{,}898 - (-0{,}913)) = 0{,}122\ J$$

Menentukan Harga *impact* (HI) :

$$\text{HI} = \frac{E}{A} = \frac{0{,}122\ J}{80\ mm^2} = 0{,}00153\ J/\text{mm}^2$$

Selanjutnya, seluruh hasil perhitungan harga impak dari seluruh spesimen disimpulkan menjadi satu dalam diagram batang yang dapat mewakilkan dari data masing-masing variasi. Berikut adalah diagram batang dari hasil perhitungan harga impak.



Gambar 4.6. Diagram harga impak.

Dari diagram harga impak di atas, terlihat bahwa variasi suhu pada spesimen yang diuji memiliki pengaruh terhadap nilai harga impak yang dihasilkan. Spesimen pada variasi suhu 120ºC memiliki harga impak sebesar 0,00125 *J*/mm^2. Pada spesimen yang menggunakan suhu 150ºC, tegangan bending mengalami kenaikan menjadi 0,00126 *J*/mm^2. Namun pada spesimen yang menggunakan suhu 180 ºC, mengalami peningkatan dengan nilai kekuatan impak mencapai 0,00132 *J*/mm^2. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sidiq M.F. Mengkaji tentang optimalisasi suhu sintering terhadap sifat mekanis komposit kampas rem menyatakan bahwa bahwa nilai dari kekuatan mekanik meningkat seiring dengan peningkatan suhu [58]. Pada pengujian tersebut tren yang dialami sesuai dengan realita pengujian dimana setiap kenaikan suhu maka nilai harga impak mengalami kenaikan dan mendapat hasil yang optimal pada suhu 180ºC, dikarenakan resin mengalami proses pencairan yang optimal sehingga menghasilkan kepadatan pada spesimen, memiliki porositas rendah, dan nilai uji impak yang lebih baik dari pada suhu 120ºC dan 150ºC.

4.4 Pengujian Bending

Hasil pengujian bending menggunakan standar pengujian ASTM D790-17, pada pengujian spesimen dikenai oleh beban secara bertahap dan terus menerus hingga mencapai nilai *Pmax* yang ditunjukkan oleh mesin UTM. Berdasarkan nilai tumpuan (L) yang sudah ditentukan sebelum pengujian, nilai *flexural strenght* bisa didapatkan melalui perhitungan. Berikut adalah salah satu perhitungan pada uji bending.

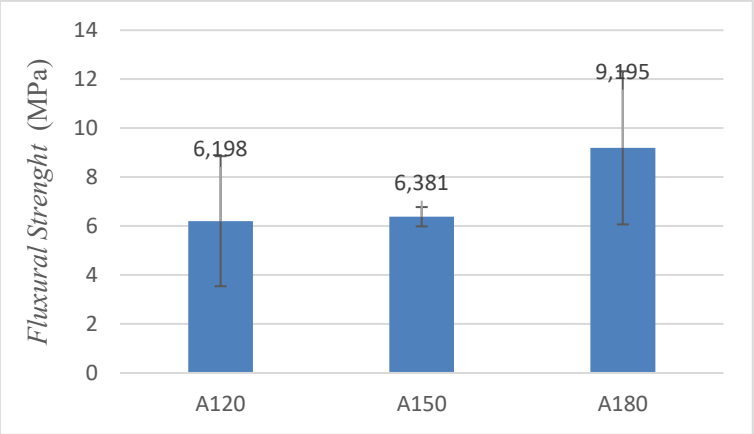
Spesimen A120-1 (Spesimen 1 suhu 120ºC)

Diketahui F = 7,82 N, panjang span (L) = 5,1 mm, lebar (b) = 12,7 mm, tebal (d) = 3,3mm, dan defleksi (δ) = 0,57 mm.

Menentukan *flexural strenght* (σf) :

$$\sigma f = \frac{3\,FL}{2bd^2} = \frac{3\times7{,}82\times5{,}1}{2\times12{,}7\times3{,}3^2} = 0{,}432 \text{ MPa}$$

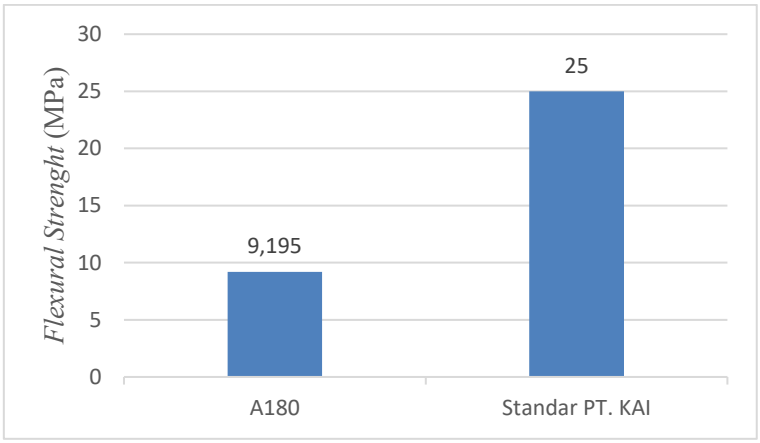
Selanjutnya, seluruh hasil perhitungan tegangan bending dikumpulkan dalam tabel hasil pengujian dan bisa dilihat memalui diagram berikut.



Gambar 4.7. Diagram *flexural strenght.*

Dari diagram *flexural strenght* di atas, terlihat bahwa variasi suhu pada spesimen yang diuji memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai *flexural strenght* yang dihasilkan. Spesimen pada variasi suhu 120^{o}C memiliki *flexural strenght* 6,198 MPa menunjukkan bahwa material memiliki ketahanan lentur yang baik. Pada spesimen yang menggunakan suhu 150^{o}C, *flexural strenght* mengalami peningkatan menjadi 6,381 MPa. Namun pada spesimen yang menggunakan suhu 180^{o}C, mengalami peningkatan yang signifikan dengan nilai mencapai 9,195 MPa.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh priyambodo, mengkaji tentang pengaruh temperatur sintering terhadap sifat mekanik komposit kampas rem berbasis resin fenolik menyatakan bahwa nilai dari kekuatan mekanik meningkat seiring dengan peningkatan suhu [59]. Namun tren ini sesuai dengan realita pengujian dikarenakan seiring dengan kenaikan suhu maka nilai *fluxural strenght* semakin meningkat. Hal ini disebabkan resin mengalami proses pematangan yang lebih optimal. Dari hasil tersebut membuat resin mengikat serat dan bahan pengisi sehingga meningkatkan sifat mekanik spesimen komposit kampas rem. Ditunjukkan pada spesimen 180^{o}C memiliki nilai yang paling optimal diantara spesimen lainnya.



Gambar 4.8. Diagram perbandingan *fluxural strenght.*

Pada Gambar 4.8 ditampilkan diagram hasil perbandingan antara nilai kekuatan tarik yang diperoleh dan standar dari PT. KAI. Nilai *fluxural strenght* standar acuan PT. KAI, yaitu 25 MPa, digunakan sebagai acuan dalam pembuatan kampas rem. Berdasarkan diagram tersebut, pada pengujian dengan variasi suhu 180°C, memiliki nilai *fluxural strenght* optimal diantara spesimen uji lainnya dengan nilai yang diperoleh adalah 9,195 MPa. Dari hasil tersebut spesimen uji belum memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh PT. KAI.

4.5 Pengujian Keausan dan Gesekan

Hasil pengujian keausan menggunakan standar ASTM D792, sebelum melakukan pengujian spesimen di timbang sehingga mendapatkan nilai massa sebelum dilakukan pengujian, setelah itu spesimen dipasang pada cekam yang ada dialat pengujian keausan dan gesekan, menentukan *wear track* dan diberikan beban sebesar L. Dari berbagai data tersebut, diperoleh hasil berupa grafik koefisien gesek dan keausan spesifik dari spesimen tersebut. Berikut adalah perhitungan dari salah satu variasi dari pengujian keausan.

Spesimen A120-1 (Spesimen 1 suhu 120^{o}C)

Diketahui N = 10 N, volume aus (ΔV) = 29.296 mm^3, jarak sliding (D) = 232.467 mm, ΔV = 29.296 mm^2,

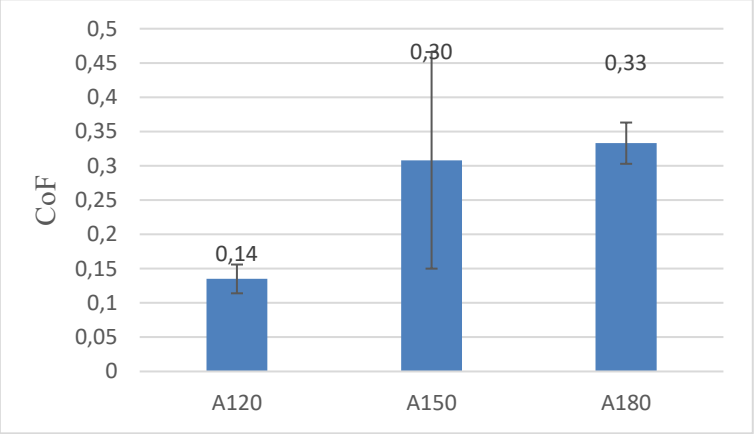
Menentukan nilai koefisien gesek (μ) :

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{1{,}423}{10} = 0{,}142$$

Menentukan nilai keausan spesifik (Ws) :

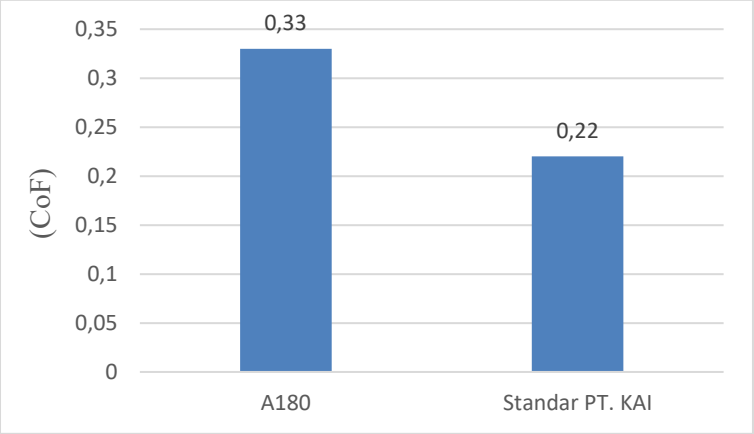
$$Ws = \frac{\Delta V}{N \times D} = \frac{29{,}296}{10 \times 232{,}467} = 1{,}26\text{x}10^{-5}\ \text{N/mm}^2$$

Selanjutnya, seluruh hasil perhitungan koefisien gesek dan keausan spesifik setiap variasi dirata-ratakan dan disimpulkan menjadi satu dalam diagram batang yang dapat mewakilkan dari data masing-masing variasi.



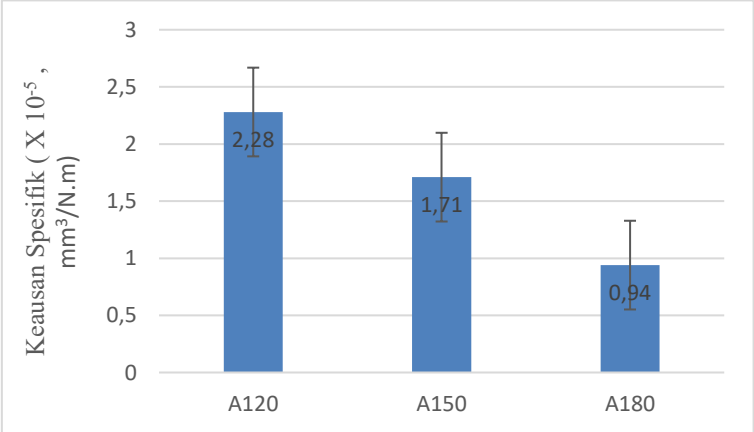
Gambar 4.9. Diagram hasil uji koefisien gesek.

Dari diagram koefisien gesek diatas, terlihat bahwa dari setiap variasi suhu mempengaruhi koefisien gesek spesimen yang diuji. Spesimen pada suhu 120°C memiliki koefisien gesek terkecil dengan nilai rata-rata 0,135. Pada spesimen dengan variasi suhu 150°C, nilai koefisien gesek naik menjadi 0,308. Dan setelah itu pada variasi 180°C, memiliki nilai koefisien gesek yang optimal dengan nilai 0,333. Menurut Subagia, Setiap kenaikan variasi suhu pada komposit umumnya meningkatkan nilai koefisien gesek, terutama pada suhu optimal [7]. Namun, penggunaan suhu yang melebihi batas optimal dapat menyebabkan penurunan nilai koefisien gesek akibat degradasi yang dialami oleh resin. Pada pengujian ini, hasil perhitungan koefisien gesek sesuai dengan tren tersebut. Nilai optimal diperoleh pada suhu 180°C, karena pada suhu ini belum mencapai batas maksimal penggunaan suhu. Pada kondisi tersebut, matriks resin mencair dan mengisi rongga kosong di antara serat atau partikel, sehingga porositas menurun dan ikatan antar komponen menjadi lebih baik.



Gambar 4.10. Diagram perbandingan koefisien gesek.

Pada Gambar 4.10 ditampilkan diagram hasil perbandingan antara nilai koefisien gesek optimal yang diperoleh dan standar dari PT. KAI. Nilai koefisien gesek standar acuan PT. KAI, yaitu 0,14–0,22, digunakan sebagai acuan dalam pembuatan kampas rem. Berdasarkan diagram tersebut, pada pengujian dengan variasi suhu 180°C, nilai koefisien gesek yang diperoleh adalah 0,333. Berdasarkan acuan standar yang digunakan nilai ini melebihi batas maksimal yang dicantumkan dalam standar spesifikasi PT. KAI, sehingga belum memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh PT. KAI.



Gambar 4.11. Diagram hasil uji keausan spesifik.

Menurut Liao Z dan Hua N, menunjukkan bahwa semakin kecil nilai keausan spesifik suatu material, sifat ketahanan aus pada suatu material akan semakin baik [60]. Dari diagram keausan spesifik diatas, terlihat bahwa sifat ketahanan aus yang paling buruk terdapat pada spesimen dengan variasi suhu 120ºC, memiliki nilai keausan spesifik yang tinggi dengan nilai rata-rata 2,258x10^{-5} mm^3/N.m. Sedangkan sifat ketahanan aus yang baik ditunjukkan oleh spesimen dengan variasi

suhu 180^{o}C, dengan nilai keausan spesifik terendah yaitu 0,94x10^{-}5 mm^{3}/N.m. Dari nilai yang sudah didapat memiliki hubungan dengan variasi suhu, semakin tinggi suhu maka nilai keausan spesifik mengalami penurunan dan semakin rendah suhu yang digunakan maka nilai keausan spesifik mengalami kenaikan dikarenakan pada penggunaan suhu rendah kemampuan pengikatan resin tidak optimal sehingga menyebabkan adanya rongga pada spesimen yang mempengaruhi pengujian. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kenaikan variasi suhu mempunyai pengaruh besar terhadap nilai keausan spesifik suatu material.

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah diperoleh, dapat disimpulkan bahwa penggunaan sekam padi sebagai *filler* serta peningkatan variasi suhu pada proses *hot compression molding* memberikan dampak positif terhadap sifat mekanik dan tribologi material yang dihasilkan. Hal tersebut berkaitan dengan Penelitian yang dilakukan oleh Rahmani, dkk. Menyatakan bahwa komposisi abu sekam padi yang dihasilkan pada proses pemanasan dengan suhu 600^{o}C dapat berperan sebagai *filler* yang memperkuat ikatan silang resin fenolik pada saat dilakukannya proses *hot compression molding.* Proses pemanasan resin menyebabkan resin mencair dan membentuk ikatan silang yang mengikat partikel penyusun menjadi homogen. Penambahan abu sekam padi yang kaya akan silika dapat meningkatkan kekuatan mekanik dikarenakan kandungan silika memiliki kekerasan tinggi dan mempunyai ketahanan termal yang stabil [61].

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa kesimpulan yang didapatkan sebagai berikut :

1. Metode *hot compression molding* sangat cocok digunakan pada proses pembuatan komposit dengan matriks resin fenolik dikarenakan setiap kenaikan suhu pengepresan maka resin mengalami pematangan secara optimal sehingga memiliki sifat mekanik dan tribologi yang baik.
2. Peningkatan suhu *hot compression molding* hingga 180°C meningkatkan kekuatan tarik (1,94 MPa), kekuatan impak (0,00132 J/mm²), dan kekuatan bending (9,195 MPa). Pada suhu ini, resin mencair optimal sehingga ikatan antar partikel membaik, menghasilkan kepadatan tinggi dan porositas rendah. Meskipun modulus elastisitas menurun akibat degradasi elastisitas, secara keseluruhan sifat mekanik membaik seiring kenaikan suhu. Pada suhu 180°C, koefisien gesek mencapai nilai optimal 0,33 dengan keausan spesifik terendah $0{,}94\times10^{-5}$ $mm^3/N.m$. Pada suhu ini mendukung pencairan resin yang optimal, memperkuat ikatan antar partikel, meningkatkan kepadatan, dan menurunkan porositas. Akibatnya, ketahanan aus dan sifat tribologi komposit semakin baik seiring peningkatan suhu.
3. Pada penelitian ini, suhu optimal dalam proses pembuatan komposit kampas rem ditemukan pada suhu 180°C.
4. Berdasarkan hasil perbandingan dengan standar PT. KAI, diperoleh nilai uji densitas pada pengujian ini sebesar 1,25 g/cm³, sedangkan standar PT. KAI sebesar 1,8 g/cm³. Nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang didapatkan pada pengujian ini masing-masing sebesar 1,94 MPa dan 12,157 MPa, sementara standar PT. KAI adalah 24 MPa dan 240 MPa. Nilai kekuatan bending yang diperoleh sebesar 9,195 MPa, dibandingkan dengan standar PT. KAI sebesar 25 MPa. Selain itu, nilai koefisien gesek (CoF) yang didapat adalah 0,33, sedangkan standar PT. KAI maksimum adalah 0,22. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa spesimen pada penelitian ini belum memenuhi standar yang telah ditetapkan oleh PT. KAI.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang didapatkan sebagai berikut :

1. Pada penelitian selanjutnya, diharapkan adanya penambahan bahan guna untuk meningkatkan nilai sifat mekanik dan tribologi agar dapat menyesuaikan dengan standar yang telah diperoleh.
2. Pada penelitian selanjutnya, diharapkan adanya pengujian SEM (*scanning electron microscope) dan* TGA (*thermal gravimetry analysys)* untuk mengetahui partikel penyusun pemukaan benda dan ketahanan thermal dari spesimen.
3. Pada penelitian selanjutnya, dapat menggunakan variasi suhu 180^{o}C dalam pembuatan material gesek kampas rem dikarenakan mempunyai sifat karakteristik terbaik dibandingkan dengan spesimen lainya.
4. Meningkatkan suhu pada proses *hot compression molding* dengan menggunakan bahan sekam padi, resin fenolik, katalis *hexamine*, aluminium oksida, dan besi oksida, namun tanpa mencapai suhu maksimal pemanasan resin fenolik yaitu pada suhu 210-250^{o}C, untuk mengetahui sifat mekanik dan tribologi komposit yang dihasilkan.
5. Pada penelitian selanjutnya, hasil pengujian densitas spesimen tribologi dapat dibandingkan dengan spesimen dari pengujian lainnya guna memperoleh hasil uji densitas yang lebih seragam.
6. Pada penelitian selanjutnya, setiap 15 menit pengepresan cetakan dibuka untuk mengurangi udara yang ada di dalam cetakan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kennedy, Rovilla, E. Surojo, and W. Wisnu, "Studi Karakteristik Kampad Rem Kendaraan Penumpang Type OES (Original Equipment Spareparts) dan AM (After Market) Pada Dry dan Wet Sliding," *Makal. Ilm. Mek.*, vol. Vol. 18 No. 1, 2019.

[2] Badan Pusat Statistik, "Jumlah penumpang kereta api pada September 2023." [Online]. Available: https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2023/11/01/2044/jumlah-penumpang-kereta-api-pada-september-2023-naik-0-62-persen.html

[3] S. Titik, A. Kholil, and F. Widyarma, "Pengaruh Penambahan Karbon Pada Karakteristik Kampas Rem Komposit Serbuk Kayu," *J. Konversi Energi Dan Manufaktur UNJ*, vol. Vol. 2, p. Hal. 108, 2017.

[4] M. Khafid, F. P. Putera, R. Yonteka, and D. F. Fitriyana, "Kajian Karakteristik Komposit Kampas Rem dengan Memvariasikan Komposisi Epoksi, Sekam Padi, Al2O3 dan Fe2O3," *J. UNIMA*.

[5] F. Yudhanto, S. A. Dhewanto, and S. W. Yakti, "Karakterisasi Bahan Kampas Rem Sepeda Motor Dari Komposit Serbuk Kayu Jati," *J. Quantum Tek.*, vol. Vol. 1 No. 1 Hal. 19-27, 2019.

[6] A. Pandriana, H. Pranoto, and S. Alva, "Ulasan : Pembuatan Komposit Kampas Rem dari Serat Alami," *Technol. Mech. Eng. Semin.*, vol. Vol. 1 No. 1, 2024.

[7] A. I. D. G. Subagia, A. I. Atmika, N. Suardana, R. GDS, and S. FS, "Pengaruh Temperatur Sinter Terhadap Kekerasan dan Keausan Kampas Rem Berbasis Komposit Hibrida Serbuk Tempurung Kelapa/Alumina/Phenolic Resin," *J. Energi Dan Manufaktur*, vol. Vol. 11 No. 2, 2018.

[8] R. P. Wahyudi, A. Z. Muttaqin, and A. Triono, "Pengaruh Temperatur Sintering Serbuk Alumunium dan Serbuk Arang Kayu Kelapa Terhadap Sifat Mekanik Komposit Kampas Rem," *STATOR J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. Vol. 1 No. 1 Hal 113-116, Art. no. 1, 2018.

[9] W. K. Haroen and A. T. Waskito, “Peningkatan Standar Kanvas Rem Kendaraan Berbahan Baku Asbestos dan Non Asbestos (Cellulose) untuk Keamanan,” *Cilegon PT Ind. Bagas Perkasa*, 2009.

[10] Y. Lu, C.-F. Tang, and M. A. Wright, “Optimization of a commercial brake pad formulation,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. Vol. 84, 2002, doi: 10.1002/app.10606.

[11] A. P. Irawan *et al.*, “Overview of the Important Factors Influencing the Performance of Eco-Friendly Brake Pads,” *Polymers*, vol. 14, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2022, doi: 10.3390/polym14061180.

[12] Sumiyanto, Abdunnaser, and A. Noor F., “ANALISA PENGUJIAN GESEK, AUS DAN LENTUR PADA KAMPAS REM TROMOL SEPEDA MOTOR,” *Bina Tek.*, vol. Vol. 15 No. 1 Hal. 49-59, 2019.

[13] H. A Syaeful, I. W. Pudja, and A. Triono, “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 hal 1-97, 2012.

[14] A. Zulkarnain and Y. Dwi R., “ANALISA GANGGUAN PADA HASIL PERAWATAN DISTRIBUTOR VALVE UNTUK MENJAMIN KELAIKAN SISTEM REM KERETA API,” *J. Perkeretaapi. Indones.*, vol. Vol. 3 No. 2, 2019.

[15] T. W. Clyne and D. Hull, *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press, 2019.

[16] P. H. Tjahjanti, *Buku Ajar Teori dan Aplikasi Matetrial Komposit dan Polimer*. UMSIDA PRESS, 2018.

[17] R. H. Setyanto, “Review: Teknik Manufaktur Komposit Hijau dan Aplikasinya,” *Performa*, vol. Vol. 11 No. 1 Hal. 9-18, 2012.

[18] “Hand layup fabrication process for composite materials.,” ResearchGate. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Hand-layup-fabrication-process-for-composite-materials_fig1_393466479

[19] “nal res in vacuum bag moulding.” Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://oldsite.nal.res.in/en/techniques/vacuum-bag-moulding

[20] ~ Jemmarwantik, “Komposit,” Material Engineering by Rangga Agung’s Team. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://materialengineeringranggaagung.wordpress.com/2017/07/09/komposit/

[21] “Spray-Up Moulding - Global Composites.” Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://globalcomposites.eu/spray-up-moulding/

[22] “Figure 1: Schematic of filament winding process,” ResearchGate. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-filament-winding-process_fig1_332329420

[23] “Standar, Kegunaan, dan Keuntungan Cetakan Kompresi.” Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://www-iqsdirectory-com.translate.goog/articles/rubber-molding/compression-molding.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=imgs

[24] “Injection moulding,” *Wikipedia*. Jul. 11, 2025. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Injection_moulding&oldid=1300015145

[25] “What is Pultrusion?,” Pultron Composites. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://pultron.com/insights/composite-news-and-insights/what-is-pultrusion/

[26] Y. Hanif and A. Riyanto, “Studi Eksperimental Sekam Padi sebagai Zat Campuran pada Komposit Termoplastik untuk Meningkatkan Sifat Isolator,” *J. Asiimetrik J. Ilm. Rekayasa Dan Inov.*, vol. Vol. 4 No. 2 Hal. 117-124, 2022, doi: 10.35814/asiimetrik.v4i1.3382.

[27] S. Kapoor and M. Sanjeev, “A Paper Review on Scope of Non Asbestos and Natural Wastes Material,” *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 3, no. 7.

[28] S. Purnavita and S. Sutanti, “Pengaruh Rasio Reaktan terhadap Karakteristik Fenol Formaldehida Jenis Resol yang Tidak Berbahaya bagi Lingkungan,” *Kim. Padjadjaran*, vol. Vol. 1, p. Hal. 1-8.

[29] M. F. Adrian, “PENGARUH FRAKSI VOLUME TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT TERHADAP KEKUATAN TEKAN DAN KEKUATAN

LENTUR PADA BLOK REM KOMPOSIT KERETA API," *Inst. Teknoligi Sepuluh Novemb.*, vol. Vol. 2 No. 2, 2019.

[31] K. Nailazzulfa, "SINTESIS NANOPARTIKEL Fe2O3 DARI BATU BESI DENGAN METODE KOPRESIPITASI DALAM pH BERVARIASI," *Inst. Teknol. Sepuluh Novemb.*, vol. Vol.1 No.2, 2015.

[32] D. F. Fitriyana, R. D. Widodo, Kriswanto, and A. Athoillah, "Pengaruh Fraksi Volume Sekam Padi, Aluminium Oksida dan Besi Oksida Terhadap Sifat Mekanik Kampas Rem dengan Matriks Epoxy," *Momentum*, vol. Vol. 19 No.2, p. Hal. 99-105, 2023.

[33] "https://byjus.com/chemistry/fe2o3/," BYJUS. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://byjus.com/chemistry/fe2o3/

[34] W. H. Putra, "Pengaruh Densitas Material Terhadap Koefisien Gesek, Kekerasan Permukaan, Dan Keausan Pada Material Komposit Serbuk Serabut Kelapa." Institut Teknologi Sepuluh November, 2021. [Online]. Available: https://repository.its.ac.id/84175/

[35] K. M. Utama, Warji, W. Rahmawati, and S. Suharyatun, "Pemanfaatan Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate (PET) dan Batok Kelapa Sebagai Bahan Baku Paving Block," *J. Agric. Biosyst. Eng.*, vol. Vol.2 No.2, pp. 262–269, 2023.

[36] I. Al Ayyubi, S. Darmanto, and D. Ariwibowo, "ANALISA PERBANDINGAN HASIL UJI TARIK PADA BEBERAPA SPESIMEN DENGAN LOAD CELL BERKAPASITAS 500 KN," *J. Mekanova Mek. Inov. Dan Teknol.*, vol. Vol. 8 No. 2, 2022.

[37] "Gambar 1. Kurva Tegangan-Regangan (Santoso, 2006) Pada pengujian tarik...," ResearchGate. Accessed: Apr. 19, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Gambar-1-Kurva-Tegangan-Regangan-Santoso-2006-Pada-pengujian-tarik-beban-diberikan_fig1_339563565

[38] M. Jonathan, U. Budiarto, and S. Jokosisworo, "Analisis Pengaruh Variasi Temperatur Austenisasi Pada Proses Quenching Tempering Baja ST37 Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Sebagai Material Poros Propeller," *J. Tek. Perkapalan*, vol. Vol. 12 No.3, 2024.

[39] E. P. Dairi B., Al Qadri, F. T. Hudeardo S., J. F. H.T. Saragi, A. Bahri P., and

Sahat, “UJI KEKUATAN TARIK KOMPOSIT DENGAN PENGUAT SERAT SABUT KELAPA,” *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. Vol.05 No. 1, 2024.

[40] M. R. Maulana Yusuf, “ANALISA MEKANIK KAMPAS REM KERETA API MENGGUNAKAN SERAT WARU DENGAN VARIASI FRAKSI BERAT PASIR SILIKA.” Fakultas Ilmu Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.

[41] J. F. H.T. Saragi, A. B. Pratama, E. P. Dairi B., Al Qadri, and F. T. Hudeardo S., “Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Impak pada Material Besi Nako 10 mm,” *J. Mesil Mesin Elektro Sipil*, vol. Vol. 4 No. 1 Hal 45-51, 2023.

[42] G. Rubiono and I. Qiram, “Analisis Aplikasi Uji Impak Tipe Charpy Untuk Pengukuran Kekuatan Tendangan Sepak Bola,” *Pros. Semin. Nas. IPTEK Olahraga*, 2018.

[43] “Destructive Test,” SLV. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://slv.co.id/destructive-test/

[44] R. C. Kusuma, S. Jokosisworo, and A. W. Budi S, “Analisis Perbandingan Kekuatan Tarik, Impak, Tekuk dan Mikrografi Aluminium 5083 Pasca Pengelasan TIG (Tungsten Inert Gas) dengan Media Pendingin Air Laut dan Oli,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. Vol. 5 No. 4, 2017.

[45] A. S. Ahyani, “Pemeriksaan Kekuatan Bending dan Impak untuk Blok Rem Kereta Api dengan Karbon Ekuivalen 4,86%.” Perpustakaan Universitas Gadjah Mada, 2018.

[46] “Fig.2. Schematic of flexure tests (3-point and 4-point bending test) [36].,” ResearchGate. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-flexure-tests-3-point-and-4-point-bending-test-36_fig2_331074946

[47] Sutrisno and Azmal, “Analisa Sifat Mekanik Pengaruh Variasi Perendaman Dan Penekanan Pada Komposit Berbahan Serat Budung,” *ELKHA*, vol. Vol. 12 No. 2, pp. 119–124, 2020.

[48] Q. Hadi and A. Zamheri, “PENGARUH FRAKSI VOLUME PENGUAT ABU TERBANG, SERBUK BESI DAN MATRIK RESIN TERHADAP KEAUSAN DAN KEKERASAN UNTUK BAHAN KAMPAS REM,” *J. Austenit*, vol. Vol. 9 No.1, 2017.

[49] M. N. Ihsan, D. Wicaksono, and Sehono, "UJI KEAUSAN KAMPAS REM BERBAHAN LIMBAH ORGANIK MENGGUNAKAN METODE OGOSHI," *Tek. STTKD J. Tek. Elektron. Engine*, vol. Vol. 8 No. 1, 2022.

[50] A. Sirojulmuminin, "PERENCANAAN DESAIN TRIBOMETER TIPE PIN ON DISK TEST BERSTANDAR ASTM G-99 DENGAN DUA VARIASI PUTARAN MOTOR," *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 1, 2022.

[51] "Pin-on-Disc - ikhtisar | Topik ScienceDirect." Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://www-sciencedirect-com.translate.goog/topics/engineering/pin-on-disc?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=imgs

[52] P. J. A. Putra Y, "Studi Eksperiment dan Analisa Pengaruh Magnesium Oksida Terhadap Wear Rate dan Cofficient of Friction pada Komposit Resin Epoksi dan Serbuk Abu Sekam Padi." Institut Teknologi Sepuluh November, 2020. [Online]. Available: Repository.its.ac.id

[53] "Figure 10-ASTM D638 Die Specifications," ResearchGate. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/ASTM-D638-Die-Specifications_fig2_318599569

[54] "Fig. 6. Charpy impact test specimens as per ASTM E23 standards," ResearchGate. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Charpy-impact-test-specimens-as-per-ASTM-E23-standards_fig2_263714634

[55] J. Kurniawan, A. Hiendro, and S. Khairi, "Studi Karakteristik Sifat Mekanik Biokomposit Berpenguat Serat Acak dan Serbuk Tandan Kosong Kelapa Sawit-Polyester Menggunakan Perlakuan Alkali dan Hidrogen Peroksida," *J. Teknol. Rekayasa Tek. Mesin JTRAIN*, vol. Vol. 2, No. 2, 2021.

[56] Y. Anggreni, "Pembuatan Komposit AMC Di Perkuat Hybrid Baggase Ash-Alumina Terhadap Variasi Suhu Sintering Dengan Metode Metalurgi Serbuk," *Politek. Manufaktur Negeri Bangka Belitung*, vol. Vol. 1 No. 2, 2024, [Online]. Available: http://repository.polman-babel.ac.id/id/eprint/1092

[57] L. B. Saputra R., Sinarep, and I. Okariawan, "Pengaruh Variasi Temperatur Curing Resin Pada Komposit Serat Sisal Terhadap Kekuatan Tarik," *Univ. Mataram Repos.*, vol. Vol. 1 No. 1, 2020.

[58] M. F. Sidiq, “Optimalisasi Suhu Sintering Terhadap Sifat Mekanis Komposisi Serbuk Kayu Jati, Serbuk Tempurung Kelapa dan Serbuk Kuningan dengan Resin Pada Kampas Rem.” 2022.

[59] B. H. Priyambodo and M. H. Palmiyanto, “PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BAHAN KOMPOSIT LIMBAH KULIT METE/PHENOLIC DENGAN PENGUAT SKRAP ALUMUNIUM TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK SEBAGAI BAHAN ALTERNATIF KAMPAS REM NON ASBESTOS,” *Fak. Tek. Univ. Wahid Hasyim Semarang*, vol. Vol. 5 No. 1, 2014.

[60] Z. Liao, N. Hua, W. Chen, Y. Huang, and T. Zhang, “Correlation between the wear resistant an properties of bulk metallic glasses,” *Intermetallics*, pp. 290–298, 2018.

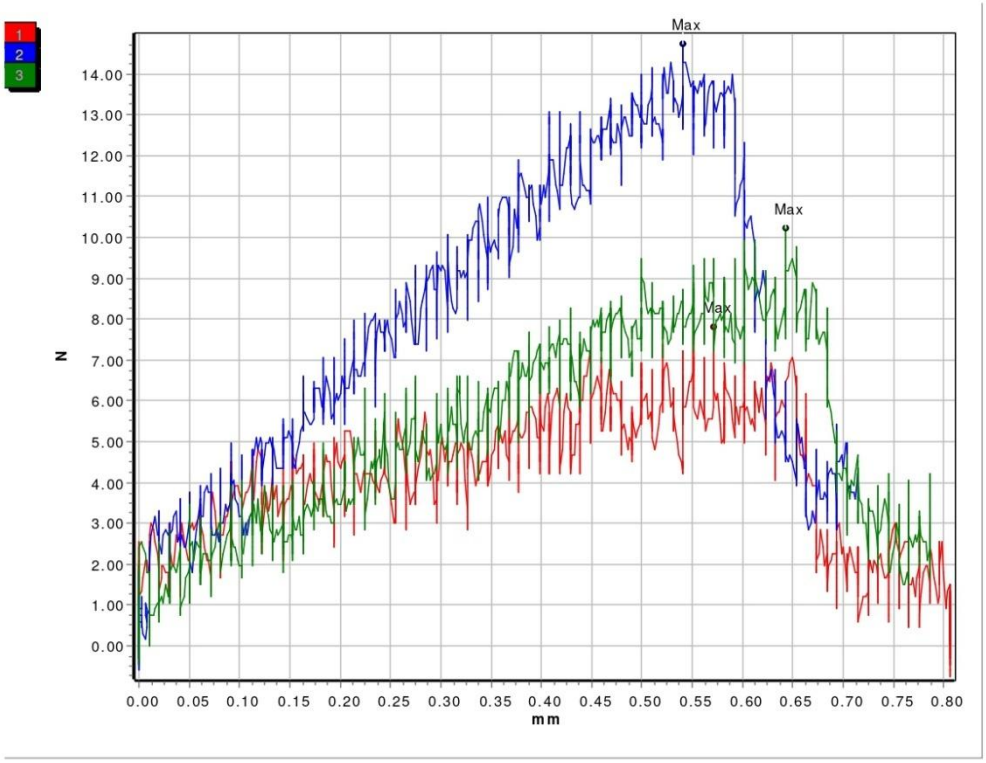
[61] S. Rahmani, R. Hanif, and G. R. Neyazi, “The Use of Rice Husk Ash as a Reactive Filler in the PSO/EP Resin Composite for Potential Automotive Applications,” *Eur. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. Vol. 3, no. Issue. 3, 2025.

LAMPIRAN

UNIVERSITAS GADJAH MADA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI
MATERIALS ENGINEERING LABORATORY

Test Date: 5/9/2025

Test Num.	Material	Width (mm)	Thickness (mm)	Span (mm)	Displacement (mm)	Max. Force (N)	Bending Stress (MPa)
1	120-1	12.70	3.30	51.00	0.57	7.82	4.33
2	120-2	12.70	3.10	51.00	0.54	14.74	9.24
3	120-3	12.70	3.50	51.00	0.64	10.23	5.03
Average	0.0000	12.70	3.30	51.00	0.59	10.93	6.20

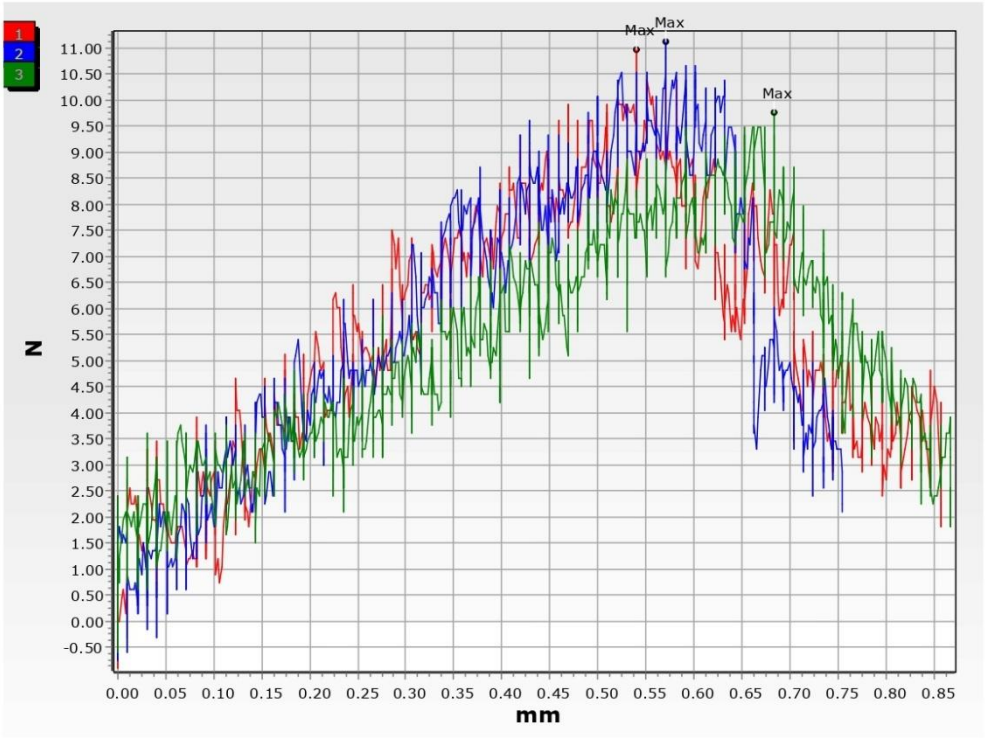


Gambar. Hasil uji bending A120.

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

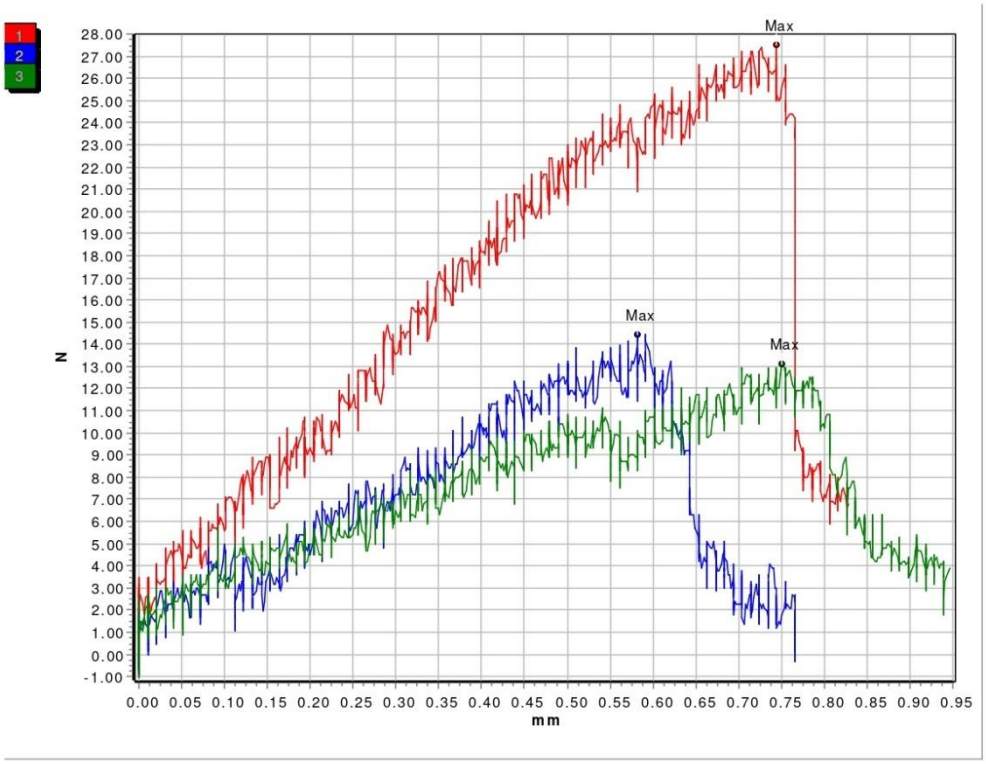


Gambar. Hasil uji bending A150.

UNIVERSITAS GADJAH MADA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI
MATERIALS ENGINEERING LABORATORY

Test Date: 5/9/2025

Test Num.	Material	Width (mm)	Thickness (mm)	Span (mm)	Displacement (mm)	Max. Force (N)	Bending Stress (MPa)
1	180-1	12.70	3.60	51.00	0.74	27.52	12.79
2	180-2	12.70	3.50	51.00	0.58	14.44	7.10
3	180-3	12.70	3.20	51.00	0.75	13.08	7.70
Average	0.0000	12.70	3.43	51.00	0.69	18.35	9.19



Gambar. Hasil uji bending A180.

Kementerian Perindustrian
REPUBLIK INDONESIA

BADAN STANDARDISASI DAN KEBIJAKAN JASA INDUSTRI
BALAI BESAR STANDARDISASI DAN PELAYANAN JASA INDUSTRI KULIT, KARET DAN PLASTIK
Jalan Sokonandi No. 9 Telp. (0274) 512929 Fax. (0274) 563655
YOGYAKARTA - 55166

No Pengujian : 553/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25
Test Report Number

Hanya berlaku untuk contoh yang diuji; tidak diperkenankan menyalin/memperbanyak sebagian atau seluruhnya tanpa ijin dari pemegang sertifikat dan LPK-BBSPJIKKP
The result of this testing is valid for the mentioned sample, do not copy without permission of the client and LPK-BBSPJIKKP

SURAT TANDA UJI
(TEST RESULT CERTIFICATE)

Nomor Pengujian *Test Report Number*	: 553/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25
Bahan / Barang *Material/Commodity*	: Komposit Friction Materials
Kondisi Contoh *Sample Condition*	: Baik, 3pcs spesimen + 1 cadangan
Merek / Kode *Brand/Code*	: 120°C
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*	: **Mohamad Rizky Djati** Jl. Kaliurang km 15, Degolan
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/mm²	2,20 ; 0,68 ; 1,58	ASTM D 638 – 14 ; Dumble type IV
2	Perpanjangan Putus, %	0,50 ; 0,16 ; 0,26	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

Gambar. Hasil uji tarik A120.

Kementerian Perindustrian
REPUBLIK INDONESIA

BADAN STANDARDISASI DAN KEBIJAKAN JASA INDUSTRI
BALAI BESAR STANDARDISASI DAN PELAYANAN JASA INDUSTRI KULIT, KARET DAN PLASTIK
Jalan Sokonandi No. 9 Telp. (0274) 512929 Fax. (0274) 563655
YOGYAKARTA - 55166

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

Hanya berlaku untuk contoh yang diuji; tidak diperkenankan menyalin/memperbanyak sebagian atau seluruhnya tanpa ijin dari pemegang sertifikat dan LPK-BBSPJIKKP
The result of this testing is valid for the mentioned sample, do not copy without permission of the client and LPK-BBSPJIKKP

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/mm²	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

F-UJI-09 Rev. 2/0

Gambar. Hasil uji tarik A150.

Kementerian Perindustrian
REPUBLIK INDONESIA

BADAN STANDARDISASI DAN KEBIJAKAN JASA INDUSTRI
BALAI BESAR STANDARDISASI DAN PELAYANAN JASA INDUSTRI KULIT, KARET DAN PLASTIK
Jalan Sokonandi No. 9 Telp. (0274) 512929 Fax. (0274) 563655
YOGYAKARTA - 55166

No Pengujian : 554/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25
Test Report Number

Hanya berlaku untuk contoh yang diuji; tidak diperkenankan menyalin/memperbanyak sebagian atau seluruhnya tanpa ijin dari pemegang sertifikat dan LPK-BBSPJIKKP
The result of this testing is valid for the mentioned sample, do not copy without permission of the client and LPK-BBSPJIKKP

SURAT TANDA UJI
(TEST RESULT CERTIFICATE)

Nomor Pengujian *Test Report Number*	: 554/LP-BBSPJIKKP/PLASTIK/IV/25
Bahan / Barang *Material/Commodity*	: Komposit Friction Materials
Kondisi Contoh *Sample Condition*	: Baik, 3pcs spesimen + 1 cadangan
Merek / Kode *Brand/Code*	: 180°C
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*	: **Mohamad Rizky Djati** Jl. Kaliurang km 15, Degolan
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/mm²	1,41 ; 2,29 ; 2,12	ASTM D 638 – 14 ; Dumble type IV
2	Perpanjangan Putus, %	0,26 ; 0,40 ; 0,32	ASTM D 638 – 14 ; Dumble type IV

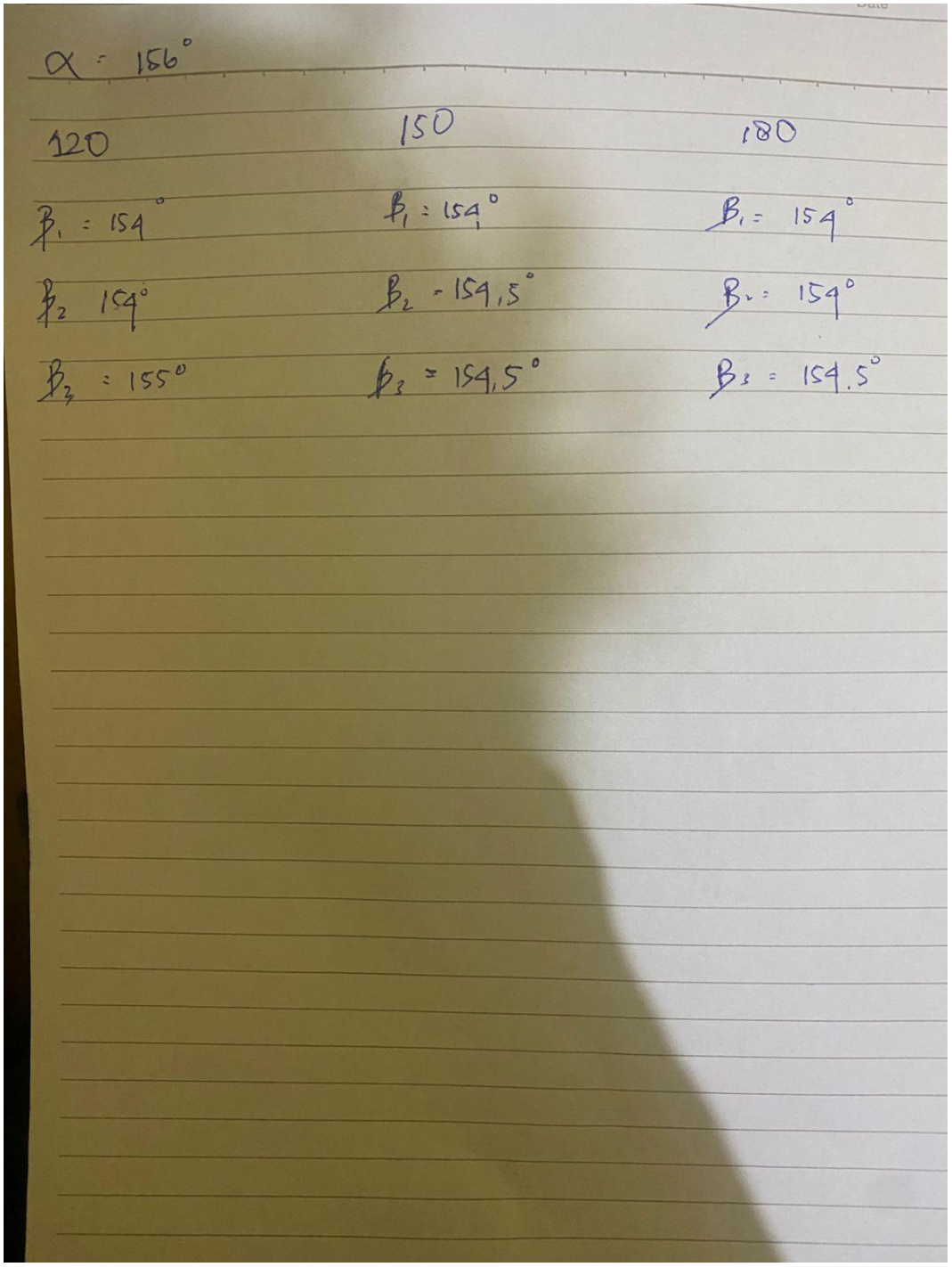
Yogyakarta, 09 Mei 2025
Penguji Mutu Barang Ahli Muda

Dr. Muhammad Sholeh, M.Eng
NIP. 197906112002121001

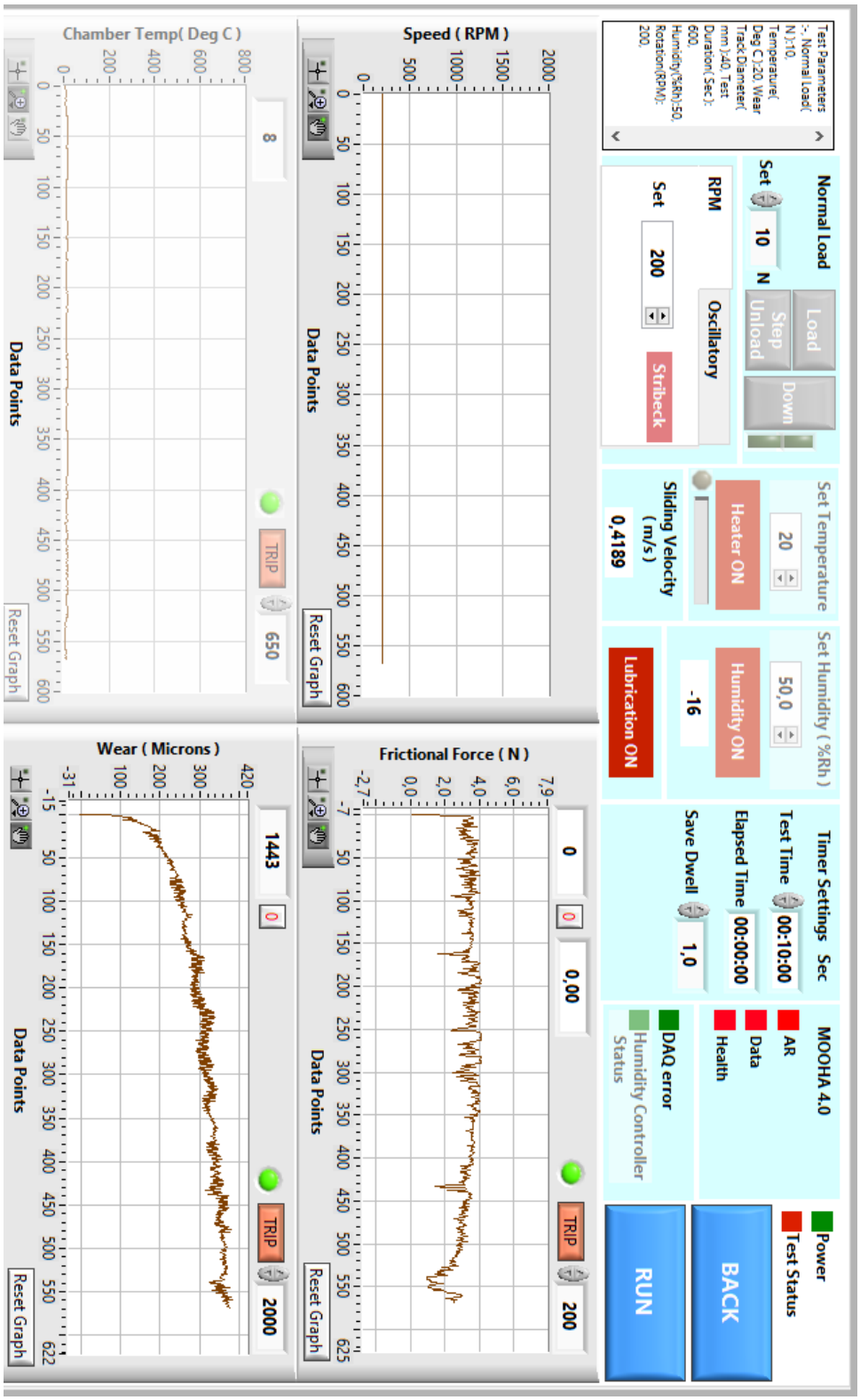
Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang telah diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik (BSrE), Badan Siber dan Sandi Negara

F-UJI-09 Rev. 2/0

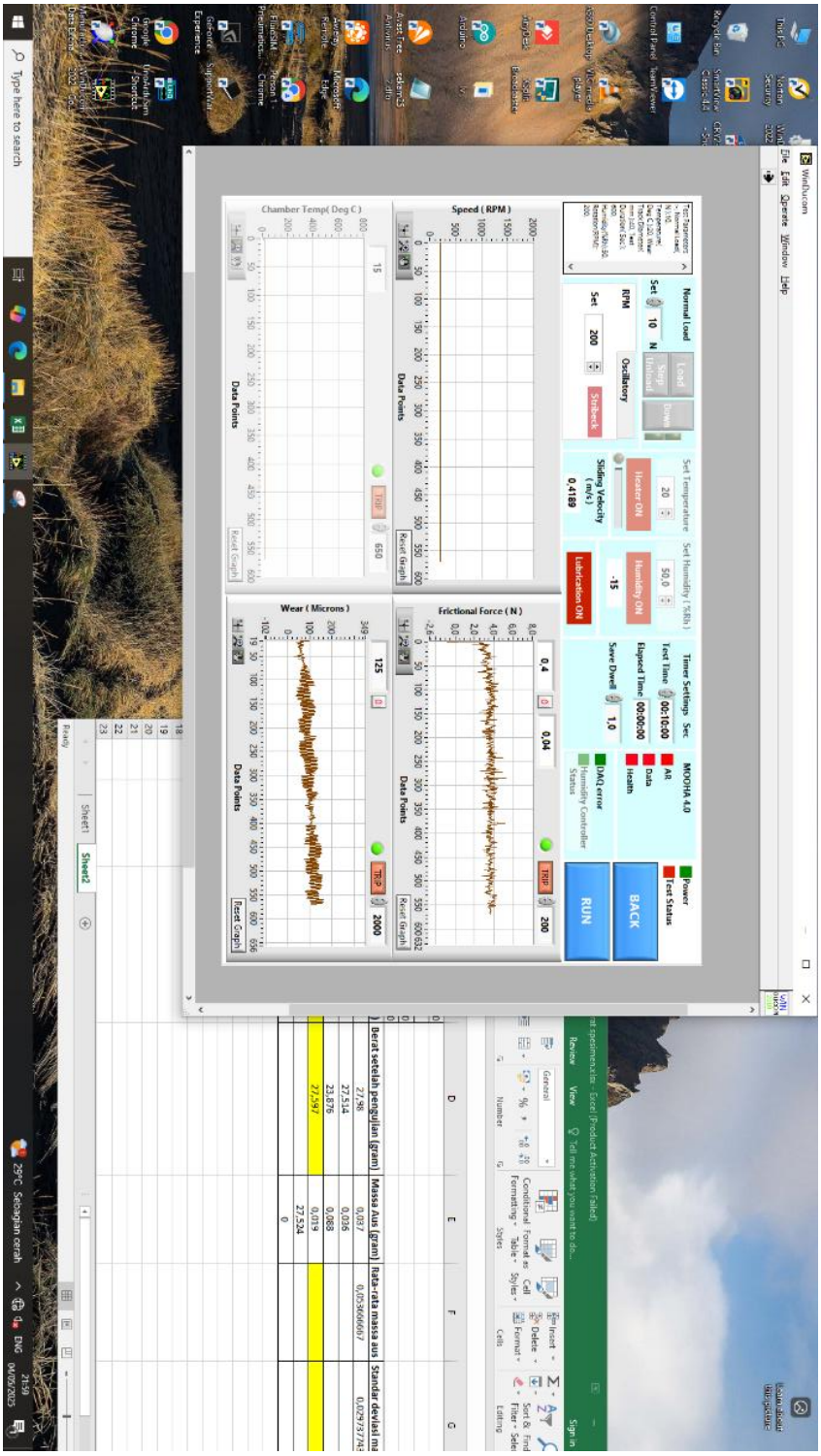
Gambar. Hasil uji tarik A180.



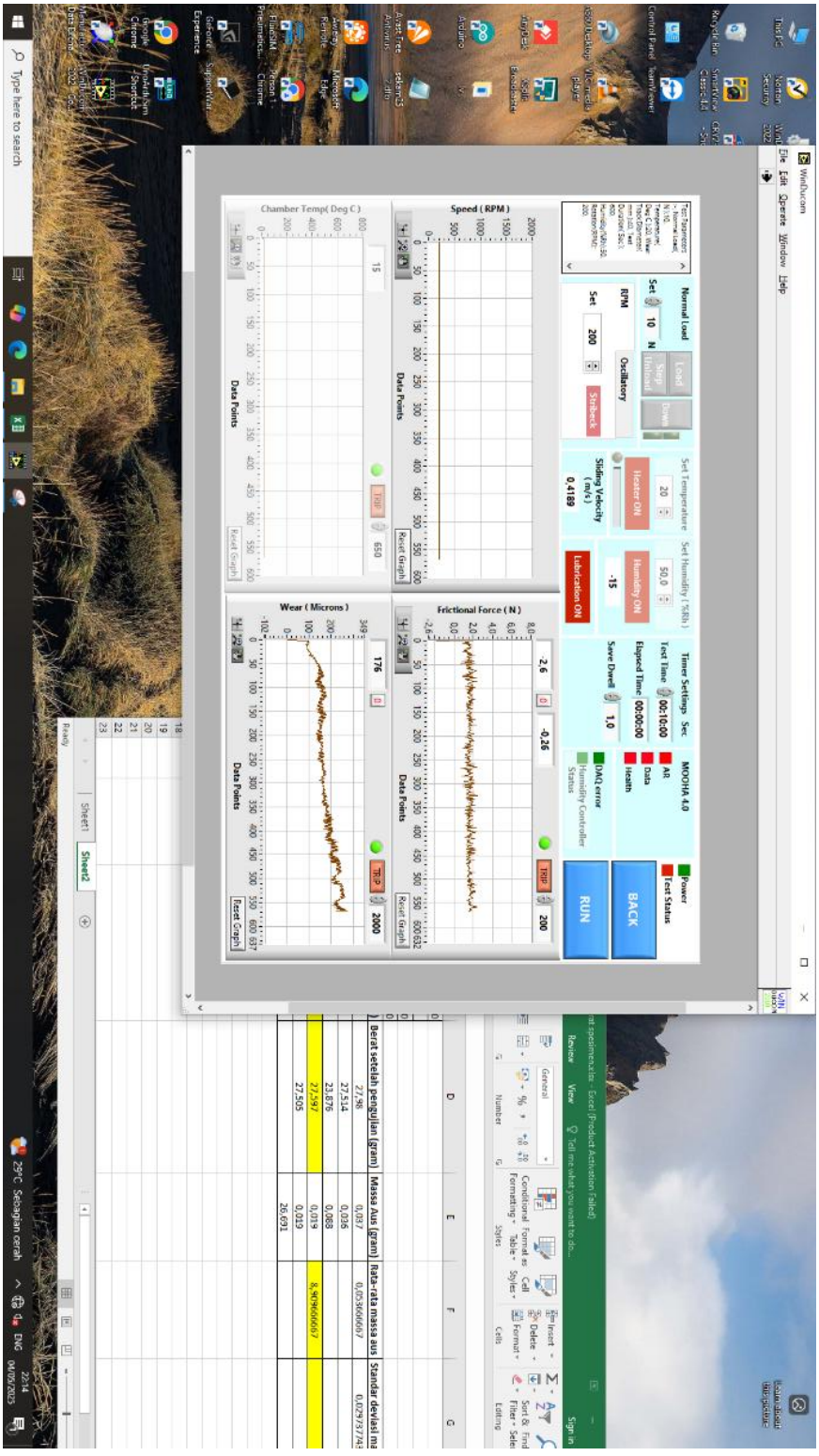
Gambar. Hasil uji impak.



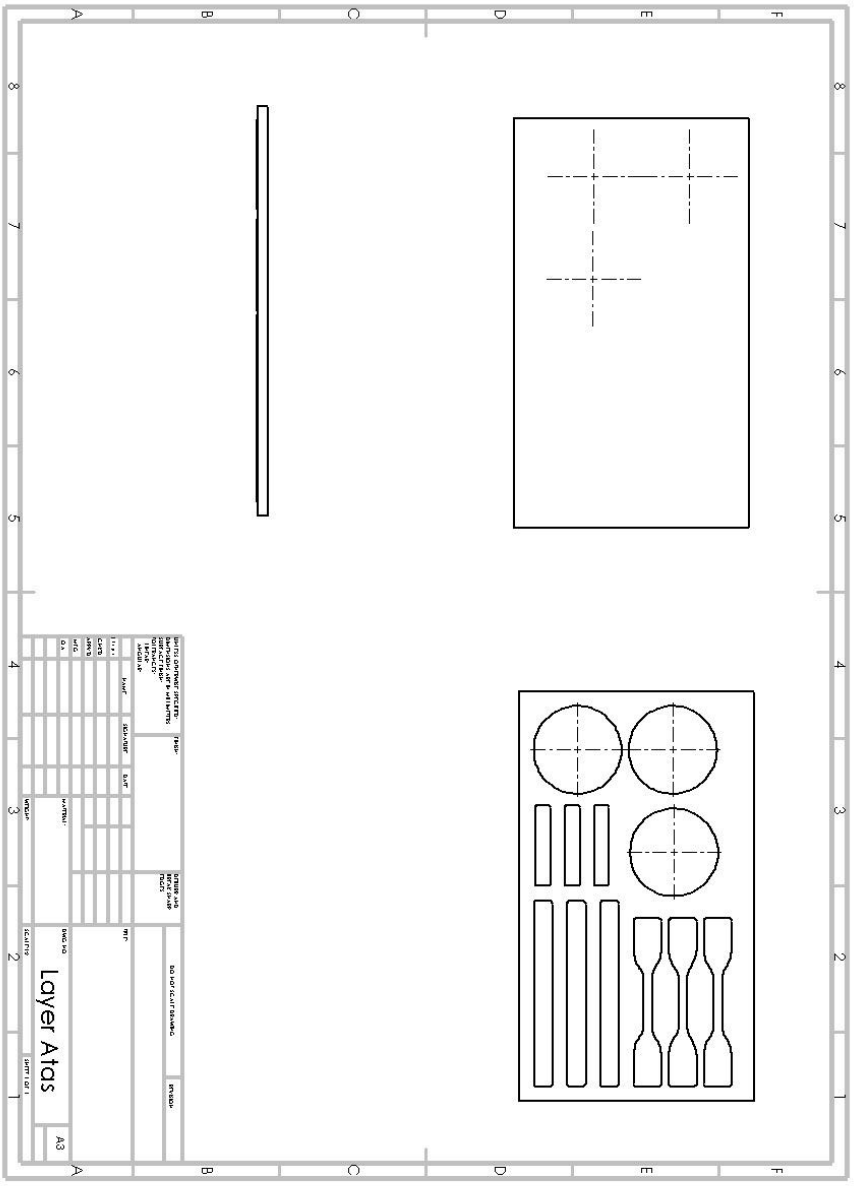
Gambar. Hasil uji tribometer *pin on disc* A120.



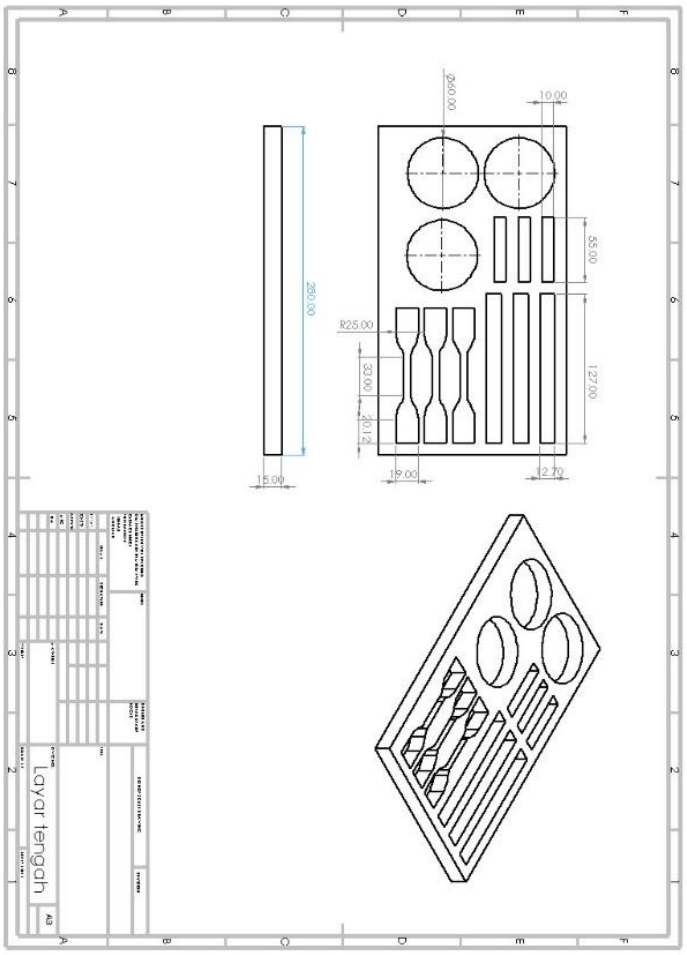
Gambar. Hasil uji tribometer *pin on disc* A150.



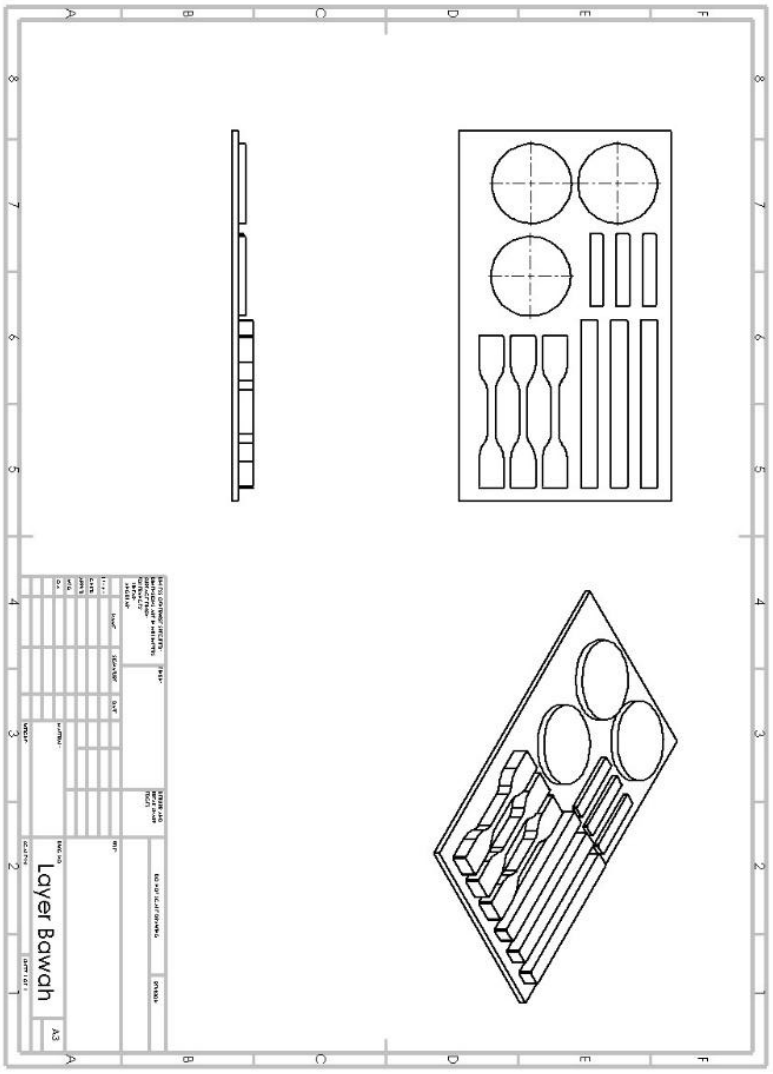
Gambar. Hasil uji tribometer *pin on disc* A120.



Gambar. Layer atas cetakan.



Gambar. Layer tengah cetakan.



Gambar. Layer bawah cetakan.