

**SIMULASI ELEMEN HINGGA PADA KOMPOSIT SERAT ALAM
UNTUK APLIKASI SARUNG TANGAN ORTHOSIS TERAPI PATAH
TULANG METACARPAL MENGGUNAKAN ANSYS**

(TESIS)

Oleh

DENDY KOESWARA



**PROGRAM PASCASARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

SIMULASI ELEMEN HINGGA PADA KOMPOSIT SERAT ALAM UNTUK APLIKASI SARUNG TANGAN ORTHOSIS TERAPI PATAH TULANG METACARPAL MENGGUNAKAN ANSYS

Oleh

Dendy Koeswara

Penelitian ini bertujuan menganalisis sifat mekanik komposit serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dengan matriks *Polylactic Acid* (PLA) untuk aplikasi *orthosis* patah tulang *metacarpal* melalui simulasi elemen hingga (FEM) berbasis *Representative Volume Element* (RVE). Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan diameter serat meningkatkan fleksibilitas namun memperbesar konsentrasi tegangan, sementara modulus antarmuka tinggi (600–800 MPa) krusial untuk distribusi tegangan yang merata dan transfer beban yang efisien. Model A6 yang merepresentasikan fitur serat berongga (*lumen*) pada modulus 800 MPa terbukti paling akurat dengan nilai tegangan von Mises 12,49 MPa, hanya berselisih 0,24% dari data eksperimental sebesar 12,46 MPa. Validasi ini mengonfirmasi bahwa representasi mikrostruktur sangat penting untuk memprediksi perilaku mekanik komposit pada perancangan alat kesehatan berbasis *3D printing* secara presisi.

Kata kunci : ANSYS, Komposit Serat Alam, PLA, TKKS, *Orthosis*, Metode Elemen Hingga.

ABSTRACT

***FINITE ELEMENT SIMULATION OF NATURAL FIBER COMPOSITES
FOR METACARPAL FRACTURE THERAPY ORTHOSIS GLOVE
APPLICATION USING ANSYS***

By

Dendy Koeswara

This study aims to analyze the mechanical properties of Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB/TKKS) fiber composites with a Polylactic Acid (PLA) matrix for metacarpal fracture orthosis applications through finite element method (FEM) simulations based on the Representative Volume Element (RVE) approach. The simulation results indicate that decreasing the fiber diameter increases flexibility but enhances stress concentration. Meanwhile, a high interfacial modulus (600–800 MPa) is crucial for uniform stress distribution and efficient load transfer. Model A6, which represents hollow fiber features (lumen) at a modulus of 800 MPa, proved to be the most accurate with a von Mises stress value of 12.49 MPa, deviating by only 0.24% from the experimental data of 12.46 MPa. This validation confirms that microstructural representation is vital for precisely predicting the mechanical behavior of composites in the design of 3D-printed medical devices.

Keywords: ANSYS, Natural Fiber Composite, PLA, OPEFB (TKKS), Orthosis, Finite Element Method.

**SIMULASI ELEMEN HINGGA PADA KOMPOSIT SERAT ALAM
UNTUK APLIKASI SARUNG TANGAN ORTHOSIS TERAPI PATAH
TULANG METACARPAL MENGGUNAKAN ANSYS**

Oleh

DENDY KOESWARA

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK**

Pada

**Program Pasca Sarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCA SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

Judul Tesis

: **SIMULASI ELEMEN HINGGA PADA
KOMPOSIT SERAT ALAM UNTUK
APLIKASI SARUNG TANGAN ORTHOSIS
TERAPI PATAH TULANG METACARPAL
MENGUNAKAN ANSYS**

Nama Mahasiswa

: **Dendy Koeswara**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2425021002**

Program Studi

: **Magister Teknik Mesin**

Fakultas

: **Teknik**

MENYETUJUI

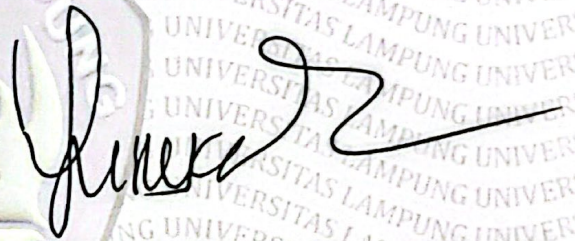
1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1

Pembimbing 2



Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met
NIP. 197402021999102001



Prof. Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T.
NIP. 197005012000031001

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin



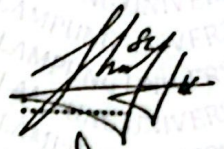
Dr. Harmel, S.T., M.T.
NIP. 19690620 200003 1 001



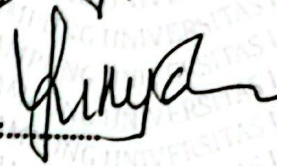
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

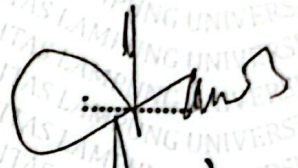
Ketua penguji : Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met



Anggota Penguji : Prof. Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T. :



Penguji Utama I : Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin., M.T

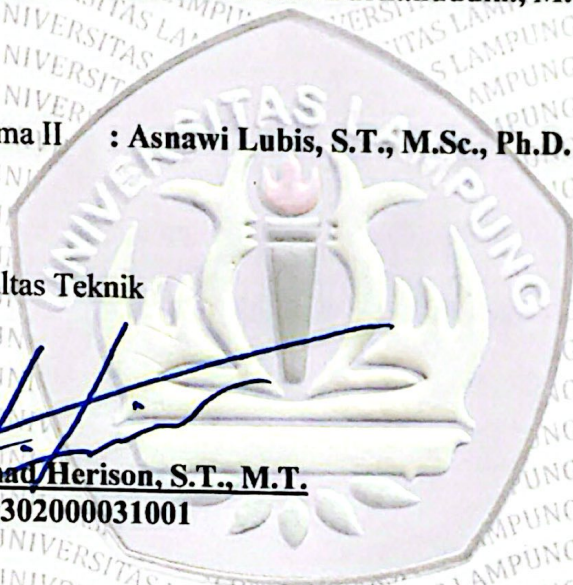


Penguji Utama II : Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D. :



2. Dekan Fakultas Teknik


Dr. H. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 196910302000031001



3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung


Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 7 Februari 2026

PERNYATAAN PENULIS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dendy Koeswara
Nomor Pokok Mahasiswa : 2425021002
Program Studi : Magister Teknik Mesin
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Tesis dengan judul **“SIMULASI ELEMEN HINGGA PADA KOMPOSIT SERAT ALAM UNTUK APLIKASI SARUNG TANGAN ORTHOSIS TERAPI PATAH TULANG METACARPAL MENGGUNAKAN ANSYS”** dibuat sendiri oleh penulis dan bukan merupakan hasil plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa karya ini merupakan hasil plagiat, saya bersedia menerima sanksi akademik atau pencabutan gelar sesuai dengan ketentuan dalam Peraturan Rektor Universitas Lampung Nomor 12 Tahun 2025 tentang Peraturan Akademik.

Bandar Lampung, 7 Februari 2026

Yang Menyatakan



DENDY KOESWARA
NPM. 2425021002

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap **Dendy Koeswara**, yang dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 18 Maret 1997. Sebagai anak pertama dari pasangan Bapak Rudi Marsono dan Ibu Susiana, pendidikan formal penulis dimulai dari SD Negeri 2 Labuhan Ratu (lulus tahun 2009), berlanjut ke MTSN 1 Bandar Lampung (lulus tahun 2012), hingga menyelesaikan pendidikan menengah atas di MAN 2 Bandar Lampung pada tahun 2015.

Pada tahun 2015 penulis melanjutkan studi DII Teknik Mesin Universitas Lampung lulus pada 2018, lalu penulis berkesempatan melanjutkan studi S1 di Universitas Megou Pak, pada tahun 2024, penulis terdaftar sebagai mahasiswa S2 Teknik Mesin Universitas Lampung dan berhasil menyelesaikan studi Magister Teknik Mesin dengan gelar Magister Teknik (M.T.) pada tanggal 7 Februari 2026. Selama masa studi tersebut, penulis tidak hanya mendalami teori, tetapi juga aktif dalam riset teknis yang kompleks.

Pengalaman kerja penulis di PT Tirta Investama (Danone Aqua), Lampung sebagai staf pengolahan air dan limbah, serta di PDAM Way Rilau Bandar Lampung yang berfokus pada sistem pengolahan air reservoir. Transformasi karier penulis berlanjut ke sektor energi, di mana penulis kini mengabdikan sebagai Engineer EPC di PT Pertamina Gas Negara.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الْحَمْدُ لِلَّهِ

Alhamdulillah hirobbil alamin

Segala puji bagi الله, tuhan semesta alam

Karya Tulis Ini Ku Persembahkan Untuk

Keluarga

Dan

Almamamter Tercinta

Teknik Mesin Universitas Lampung

M.T 2026

MOTTO HIDUP

“Do what you want to do”

(Dendy Koeswara)

SANWACANA

Assalamualaikum wr.wb

Alhamdulillahirobbil' alamiin, segala puji bagi ALLAH SWT tuhan semesta alam, atas segala rahmat dan hidayah-nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul “SIMULASI ELEMEN HINGGA KOMPOSIT SERAT ALAM UNTUK APLIKASI SARUNG TANGAN ORTHOSIS TERAPI PATAH TULANG METACARPAL MENGGUNAKAN ANSYS” Penulis menyadari bahwa ada kekurangan dalam pengetahuan, pengalaman, dan kemampuan yang dimiliki. Meskipun demikian, Penulis berharap bahwa tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak dan berkontribusi dalam pemikiran akademis serta bidang lainnya. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih atas kritik, saran, bimbingan, dan petunjuk yang diterima dari semua pihak, yang sangat diharapkan dapat membantu dalam kelengkapan dan penyempurnaan Tesis ini. Penulis mengucapkan rasa terima kasih dan penghargaan yang tinggi:

1. Dr. Eng Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku dosen pembimbing utama atas kesediaannya dalam membimbing serta memberikan masukan dan arahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
2. Prof. Dr. Eng. Suryadiwansa Harun, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping Tugas Akhir, atas kesediaan dan keikhlasannya untuk berbagi ilmu, membimbing, memberi kritik sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya.

3. Dr. Ir.Yanuar Burhanuddin., M.T & Dr. Asnawi Lubis, dosen pembahas dalam Tugas Akhir ini telah memberi kritik dan masukan yang bermanfaat bagi penulis.
4. Dr. Harmen, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung telah memberikan arahan mengenai perkuliahan.
5. Bapak Ahmad Suúdi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Keluarga yang selalu memberikan nasehat, motivasi serta selalu mendukung penulis dari awal hingga akhir masa perkuliahan.
7. Adik tersayang yang selalu mensupport penulis selama masa perkuliahan.
8. Ivanna Zakiyah dan Rakuen, keluarga tercinta yang selalu mendampingi penulis sampai akhir pengerjaan Tesis.
9. Para staf admin Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang selalu sedia dan sigap membantu penyelesain segala berkas yang diperlukan penulis.
10. Teman-teman seperjuangan Magister Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2024.

Akhir kata, Penulis sampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan serta dalam penyusunan Tesis ini dari awal sampai akhir.

Bandar Lampung, 7 Feburari 2026

DENDY KOESWARA
NPM 2425021002

DAFTAR ISI

COVER	i
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
HALAMAN JUDUL	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN PENULIS	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN... ..	ix
MOTTO HIDUP	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR -----	xiii
I. PENDAHULUAN -----	1
A. Latar Belakang-----	1

B. Rumusan Masalah	6
C. Tujuan Penelitian	6
D. Manfaat Penelitian	7
E. Ruang Lingkup Penelitian	8
F. Sistematika Penulisan	8
II. TINJAUAN PUSTAKA	10
A. Material Komposit	10
1. Pengertian dan Klasifikasi Komposit	15
2. Serat alam & serat sintetis	16
3. PLA sebagai matriks dan serat TKKS sebagai penguat	19
4. Sifat mekanik dan aplikasi komposit alam	22
B. Orthosis dan Fraktur Tulang Metacarpal	25
1. Anatomi tulang metacarpal	25
a. 1st metacarpal (ibu jari)	26
b. 2nd metacarpal (telunjuk)	26
c. 3rd metacarpal (jari tengah)	26
d. 4th metacarpal (jari manis)	26
e. 5th metacarpal (kelingking)	26
2. Peran orthosis dalam pemulihan	27
3. Studi penggunaan serat alam dalam orthosis	28

C. Simulasi Unit Cell-----	31
D. Metode Elemen Hingga dan Penggunaan ANSYS -----	32
1. Pengertian metode elemen hingga (FEM) -----	32
2. Fungsi simulasi dalam rekayasa material-----	32
3. Parameter analisis: deformasi, tegangan, regangan von Mises ----	34
4. Kelebihan ANSYS dalam pemodelan komposit -----	36
E. Penelitian Terdahulu yang Relevan-----	40
III. METODOLOGI PENELITIAN -----	43
A. Diagram Alir Penelitian -----	44
B. Desain Model 3D Printing Komposit -----	45
C. Parameter dan Variabel yang Digunakan-----	43
D. Simulasi di ANSYS -----	53
E. Validasi Model-----	54
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN-----	55
V. KESIMPULAN DAN SARAN-----	77
A. KESIMPULAN-----	77
B. SARAN-----	78
DAFTAR PUSTAKA-----	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Pengolahan dan pembuangan sampah padat kota	12
Gambar 2.2. Serat TKKS	12
Gambar 2.3. Tandan Kosong Kelapa Sawit	13
Gambar 2.4. Serat kontinu (a), serat diskontinu (b) (Campbell, 2010).....	15
Gambar 2.5. Klasifikasi Komposit (Nayiroh, 2013)	16
Gambar 2.6. Klasifikasi serat sintetis (Rajak et al., 2022).....	17
Gambar 2.7. Siklus hidup komposit (Syduzzaman et al., 2020)	19
Gambar 2.8. Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (Savetlana et al., 2012).....	20
Gambar 2.9. Fraksi - Energi serap - Ketangguhan (Hastuti et al., 2021).....	22
Gambar 2.10. Gambaran umum tulang-tulang tangan. (Jones, 2018)	25
Gambar 2.11. Gambaran (A) 1st metacarpal-5th metacarpal	27
Gambar 2.12. Simulasi Ansys (sumber pribadi)	31
Gambar 2.13. Simulasi Representative Volume Element (RVE)	34
Gambar 2.14. Simulasi Ansys,.....	35
Gambar 2.15. Ansys workbench flow (sumber pribadi)	36
Gambar 2.16. Kekuatan tarik beberapa serat (Sulardjaka et al., 2020))	38

Gambar 2.17. Kekuatan Tarik Komposit Serat (Savetlana et al., 2012).....	39
Gambar 3.1. Alur dari wraith hand orthosis, spesimen uji tarik, unit cell.	41
Gambar 3.2. Diagram Alir	42
Gambar 3.3. Model RVE	43
Gambar 4.1. Skema proyek Ansys Workbench	56
Gambar 4.2. RVE Meshing (A1)	58
Gambar 4.3. Force pada model	58
Gambar 4.4. Grafik A1 Stress, Strain dan Total deformation.....	60
Gambar 4.5. Simulai A1 (0.900 mm)	60
Gambar 4.6. RVE Meshing (A2)	61
Gambar 4.7. Simulai A2 (800 MPa)	62
Gambar 4.8. Grafik A2 Stress, Strain dan Total deformation.....	63
Gambar 4.9. RVE Meshing (A3)	63
Gambar 4.10. Grafik A3 Stress, Strain dan Total deformation.....	65
Gambar 4.11. Simulai A3 (0.900 mm)	65
Gambar 4.12. Simulai A4 (335 MPa)	67
Gambar 4.13. Grafik A4 Stress, Strain dan Total deformation.....	67
Gambar 4.14. RVE Meshing (A5)	68
Gambar 4.15. Grafik A5 Stress, Strain dan Total deformation	70
Gambar 4.16. Simulai A5 (0.900 mm)	71

Gambar 4.17. RVE Meshing (A6)	72
Gambar 4.18. Grafik A6 Stress, Strain dan Total deformation.	72
Gambar 4.19. Simulai A6 (800 MPa)	73
Gambar 4.20 .Stress Sim dan Stress Exp	75.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkembangan dari ilmu pengetahuan dan teknologi material mendorong untuk pencarian material yang tidak hanya memiliki performa sifat mekanik yang baik, tetapi juga mendorong untuk dapat mendapatkan material yang ramah lingkungan. Material komposit serat alam bisa menjadi pengganti bahan sintetis memiliki nilai manfaat yang tinggi, dapat didaur ulang, dan memiliki biodegradabilitas (Krishnasamy et al., 2025)

Serat alam merupakan salah satu jenis serat yang saat ini banyak dikembangkan. Serat ini berasal dari sumber hayati seperti tumbuhan maupun hewan, contohnya serat bambu, rami, pisang, sisal, dan kelapa (Kampeerapappun et al., 2025). hampir semuanya dapat digunakan sebagai pengganti serat sintetis dan menjadi bahan baku komposit, dengan demikian dalam penggunaan serat alam dapat memungkinkan untuk menjadi pengganti serat sintetis dan pengujian mendalam terkait kekuatan, ketahanan yang ditawarkan, termasuk kekurangan dan juga kelebihan (Siagian & Putra, 2024).

Dalam penelitian terbaru, komposit berbasis nilon-6 yang diperkuat dengan partikel tempurung kelapa (CS) dan serat tandan kosong kelapa sawit (EFB) menunjukkan

peningkatan sifat mekanik yang signifikan. Pengolahan pengisi dengan perawatan alkali sebelum pencampuran secara leleh dengan matriks nilon-6 menghasilkan peningkatan modulus tarik hingga 16% untuk komposit nilon-6/CS dan 10% untuk nilon-6/EFB. Hal ini menunjukkan kompatibilitas baik antara pengisi serat alam dengan matriks polimer, yang ditunjang oleh sifat hidrofilik pengisi tersebut. Meskipun terdapat sedikit penurunan kristalinitas matriks, performa mekanik komposit tetap terjaga dengan baik, sekaligus menunjukkan potensi tinggi serat alam sebagai penguat material polimer (Savetlana et al., 2018).

Selain nilon-6, *Polylactic Acid* (PLA) sebagai polimer *biodegradable* kian populer dan krusial dalam upaya menggantikan plastik berbahan dasar fosil. Plastik konvensional, seperti polipropilena, menimbulkan berbagai dampak buruk bagi lingkungan, termasuk pemanasan global, polusi tanah, dan polusi air, mengingat sifatnya yang sulit terurai secara alami dan potensinya menyebabkan penyakit jika tidak dikelola dengan baik. Menanggapi tantangan ini, tinjauan ini menyoroti pengembangan komposit matriks polimer PLA yang diperkuat dengan beragam serat daun (Sethy & Sahoo, 2025).

Keunggulan material bio-komposit terletak pada densitasnya yang rendah dan kekuatan mekanik yang mencukupi, sehingga mampu menahan gaya-gaya aerodinamis tanpa mengalami kegagalan struktural dini. Temuan ini memperkuat argumen bahwa komposit serat alam terutama yang dikombinasikan dengan PLA dapat diadaptasi untuk aplikasi teknik yang lebih luas (Putranto et al., 2025).

Dan juga salah satu serat alam yang banyak diteliti sebagai penguat komposit adalah serat dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Serat ini memiliki kandungan selulosa yang tinggi, yang berkontribusi pada kekuatan tarik dan modulus elastisitasnya. Dalam proses pembuatan komposit, perlakuan alkali seperti NaOH 5% terbukti meningkatkan sifat mekanik serat dengan cara menghilangkan lignin dan membuat permukaan serat menjadi lebih kasar, sehingga adhesi antara serat dan matriks meningkat (Savetlana et al., 2012).

Pemanfaatan serat TKKS dalam bentuk komposit semakin relevan seiring dengan upaya pengurangan limbah industri kelapa sawit di Indonesia. Serat TKKS memiliki ketersediaan melimpah dan dapat diproses secara ekonomis. TKKS mampu menjadi elemen penting dalam pengembangan komposit serat alam untuk teknologi manufaktur berkelanjutan (Supriadi et al., 2014).

Dalam bidang ortopedi dan rehabilitasi, minat terhadap desain orthosis yang memiliki *durability* dan juga fleksibilitas semakin meningkat. Ini bertujuan untuk mengakomodasi variasi anatomi individu tubuh manusia. Beberapa ortotik dan *splint* terdahulu sering menyebabkan berbagai masalah seperti nyeri, tekanan, dan keringat berlebih. Kondisi ini pada akhirnya dapat menyebabkan hilangnya fungsi penting atau bahkan menghambat proses penyembuhan (Baronio et al., 2017).

Di sinilah pentingnya simulasi berbasis komputer. Dengan memanfaatkan perangkat lunak seperti ANSYS, dalam pengembangan material komposit, pengujian eksperimental seringkali memerlukan sumber daya besar, baik dari segi waktu maupun biaya. Oleh karena itu, penggunaan simulasi numerik menjadi solusi efektif untuk

memperkirakan karakteristik mekanik material sebelum dilakukan uji fisik. Simulasi dengan metode elemen hingga memungkinkan visualisasi distribusi tegangan dan regangan pada spesimen uji, serta membantu mengidentifikasi titik konsentrasi tegangan (Diana et al., 2020).

Finite Element Analysis (FEA) merupakan salah satu pendekatan numerik yang sangat penting dalam pengembangan produk teknik, termasuk di bidang material komposit. Teknologi ini memungkinkan visualisasi dan prediksi distribusi tegangan, regangan, serta deformasi pada suatu komponen sebelum dilakukan pengujian secara fisik. Penerapan FEA tidak terbatas pada industri berskala besar, tetapi juga telah menjangkau skala menengah dan penelitian terapan (Eko Setiawan et al., 2025).

Komponen industri seperti bejana bertekanan sangat mengandalkan simulasi numerik untuk menjamin keandalan desainnya. Dalam aplikasi tekanan tinggi dan lingkungan ekstrem, metode FEA telah terbukti mampu memprediksi respon struktur terhadap tekanan internal, perubahan suhu, dan beban dinamis lainnya. Selain itu, kombinasi pendekatan eksperimental seperti uji hidrostatik dan penggunaan strain gauge semakin memperkuat validitas hasil simulasi (Imron, 2025).

Ansys Workbench telah menjadi perangkat lunak andalan dalam analisis rekayasa material dan struktur karena kemampuannya dalam mensimulasikan berbagai kondisi teknis yang kompleks. Dalam pemodelan deformasi, tegangan, distribusi suhu, hingga propagasi retak, Ansys memungkinkan replikasi fenomena fisik yang sulit diwujudkan di laboratorium.

Keakuratan simulasi sangat bergantung pada kualitas mesh dan parameter input yang presisi. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa hasil simulasi menggunakan Ansys seringkali sejalan dengan data eksperimental, sehingga memperkuat perannya sebagai alat validasi dan prediksi dalam pengembangan material baru, termasuk komposit berbasis serat alam atau limbah polimer (Marpaung, 2025). Namun, akurasi simulasi numerik sangat ditentukan oleh ketelitian representasi struktur mikro komposit, termasuk orientasi serat, keberadaan void, serta distribusi fasa penguat dan matriks. Seperti dijelaskan oleh (Li et al., 2025), salah satu pendekatan yang efektif dalam merepresentasikan perilaku komposit adalah melalui metode homogenisasi berbasis *Representative Volume Element* (RVE). Metode ini memungkinkan perhitungan material berdasarkan struktur mikroskopis. Akan tetapi, ukuran model dan kualitas (mesh) pada simulasi RVE sangat mempengaruhi hasilnya. Diskretisasi yang terlalu kasar dapat mengakibatkan prediksi kekakuan material yang terlalu tinggi (*overestimate*), sedangkan mesh yang terlalu halus akan menuntut waktu komputasi yang jauh lebih besar. Oleh karena itu, dibutuhkan strategi pemodelan yang seimbang antara akurasi geometri mikrostruktur dengan efisiensi waktu simulasi.

Lebih lanjut, menurut temuan (Wetzel et al., 2025), ukuran model dalam simulasi komposit tidak hanya mempengaruhi akurasi, tetapi juga efisiensi keseluruhan proses simulasi, terutama ketika detail mikrostruktur yang dimasukkan dalam model. Model dengan ukuran terlalu besar dapat menghasilkan kompleksitas mesh yang tinggi sehingga memperlambat proses simulasi dan tidak efisien secara komputasi.

Dengan mempertimbangkan pentingnya keseimbangan antara akurasi representasi mikrostruktur, efisiensi komputasi, dan kebutuhan desain produk yang cepat dan presisi, pemodelan numerik orthosis tangan berbahan komposit serat alam dengan pendekatan homogenisasi, *unit cell* berukuran minimum melalui simetri struktural untuk mengurangi biaya komputasi tanpa mengorbankan akurasi untuk simulasi tunggal (Yang et al., 2025).

Oleh karena itu, penelitian ini mengambil judul: ***Simulasi Elemen Hingga Pada Komposit Serat Alam untuk Aplikasi Sarung Tangan Orthosis Terapi Patah Tulang Metacarpal Menggunakan ANSYS.***

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini akan berfokus pada beberapa permasalahan utama:

1. Bagaimana karakteristik mekanik dari komposit serat alam yang digunakan sebagai material orthosis, terutama dalam kaitannya dengan kekuatan tarik, kekakuan, dan kelayakan aplikasinya?
2. Bagaimana membangun model pemodelan numerik komposit serat alam menggunakan perangkat lunak ANSYS, khususnya dalam simulasi perilaku mekanik material berdasarkan unit cell?
3. Sejauh mana tingkat akurasi hasil simulasi ANSYS dalam memprediksi karakteristik mekanik komposit serat alam jika dibandingkan dengan data uji eksperimental, serta

bagaimana pengaruh parameter desain seperti geometri unit cell, volume fraksi serat, dan modulus Young terhadap hasil simulasi tersebut?

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan juga rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis sifat mekanik komposit serat alam yang digunakan dalam proses 3D printing untuk aplikasi orthosis.
2. Mengembangkan model simulasi numerik berbasis metode elemen hingga (FEM) menggunakan perangkat lunak ANSYS, dengan fokus pada prediksi total deformasi, *equivalent strain von Mises*, dan *equivalent stress von Mises* dari struktur komposit dalam bentuk unit sel representatif.
3. Mengevaluasi tingkat akurasi dan kesesuaian hasil simulasi dengan data eksperimen untuk menentukan konfigurasi unit cell yang paling optimal sebagai acuan perancangan desain orthosis.

D. Manfaat Penelitian

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah serta tujuan dari penelitian ini maka manfaat dari penelitian ini meliputi:

1. Menganalisis sifat mekanik komposit serat alam yang digunakan sebagai material orthosis, terutama dalam kaitannya dengan kekuatan dan kekakuan material.
2. Mengembangkan model simulasi numerik berbasis metode elemen hingga (FEM) menggunakan perangkat lunak ANSYS, dengan fokus pada simulasi perilaku mekanik material melalui unit cell.
3. Mengevaluasi tingkat akurasi dan kesesuaian hasil simulasi dengan data eksperimen atau referensi terdahulu sebagai dasar validasi model numerik dan acuan dalam perancangan orthosis berbahan komposit serat alam.

E. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini mencakup batasan topik dan aspek-aspek yang menjadi fokus kajian agar penelitian berjalan secara terarah dan sesuai dengan tujuan. Adapun ruang lingkup penelitian ini meliputi:

1. Pemilihan dan karakterisasi komposit serat alam yang sesuai untuk proses 3D printing.
2. Pengembangan model simulasi unit cell komposit serat alam menggunakan perangkat lunak ANSYS untuk menganalisis total deformasi, equivalent strain von Mises, dan equivalent stress von Mises.
3. Evaluasi hasil simulasi dengan membandingkannya terhadap data eksperimen atau referensi sebelumnya sebagai dasar validasi model numerik.

F. Sistematika Penulisan

Tesis ini terdiri dari beberapa bab dengan sistematika sebagai berikut:

1. Bab 1 – Pendahuluan: Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup, dan sistematika penulisan
2. Bab 2 – Tinjauan Pustaka: Membahas teori-teori terkait 3D printing, komposit serat alam, serta pemodelan dan simulasi menggunakan ANSYS
3. Bab 3 – Metodologi Penelitian: Menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, termasuk langkah-langkah pemodelan dan simulasi
4. Bab 4 – Hasil dan Pembahasan: Menampilkan hasil penelitian serta analisis terhadap data yang diperoleh
5. Bab 5 – Kesimpulan dan Saran: Berisi kesimpulan dari penelitian serta saran untuk penelitian lebih lanjut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

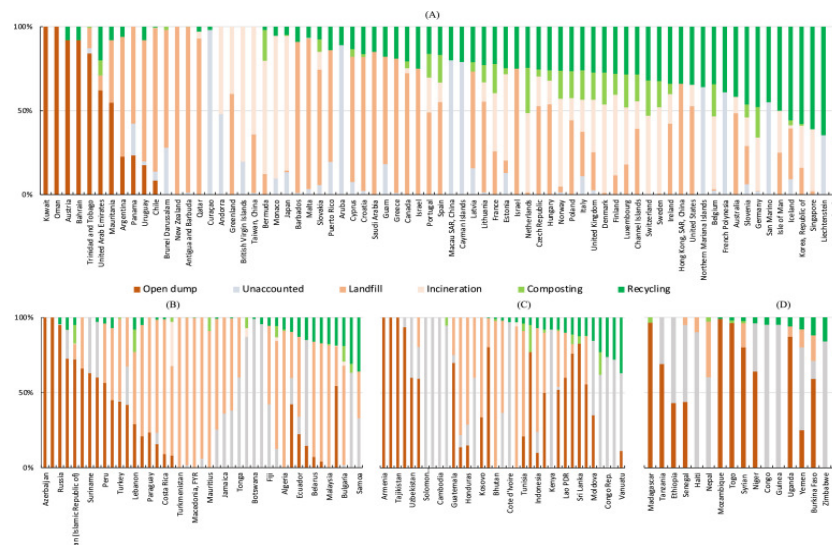
A. Material Komposit

Pemanfaatan material alam merupakan solusi yang relevan dan menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya tak terbarukan. Selain itu, langkah ini dapat meminimalkan dampak lingkungan akibat penumpukan limbah. Isu pengelolaan limbah kini telah menjadi perhatian krusial di tingkat global. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, tingginya beban pengelolaan tersebut juga tercermin dari besarnya alokasi anggaran yang dibutuhkan (Kaza et al., 2018). Penggunaan bahan alam ini tidak sekadar mendorong kemajuan teknologi material, melainkan juga menghadirkan tantangan tersendiri. Tantangan tersebut berpusat pada upaya optimalisasi potensi serat alami guna menghasilkan produk yang berkelanjutan, serta memperluas cakupan aplikasi komposit berpenguat serat alam (Hidalgo-Salazar et al., 2025).

Dan juga pemanfaatan dari biopolimer telah muncul sebagai pengganti utama material petro-based, dengan penguatan serat alami pada biopolimer secara signifikan meningkatkan fungsionalitasnya. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.2, berbagai sumber bahan baku berbasis tumbuhan mulai dari limbah lignoselulosa dan

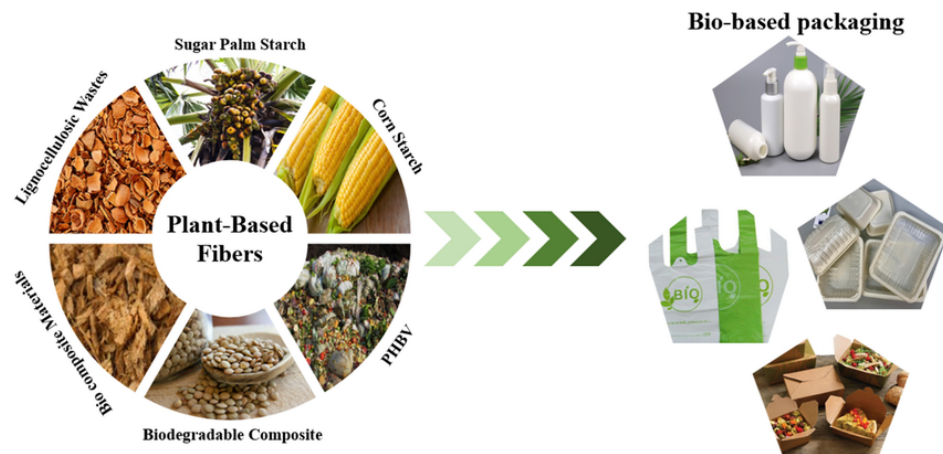
juga material biokomposit yaitu pati jagung dan pati sagu menjadi fondasi untuk mendapatkan serat alam dan biopolimer yang kemudian dapat diaplikasikan dalam produksi kemasan berbasis bio (Punia Bangar et al., 2023).

Material komposit berbasis serat alam telah menjadi fokus utama dalam pengembangan material ramah lingkungan yang memiliki performa mekanik kompetitif. Serat alam yang bersifat terbarukan, ringan, dan memiliki kepadatan rendah menjadi alternatif ideal untuk menggantikan serat sintetis dalam berbagai aplikasi teknik. Komposit jenis ini biasanya terdiri dari matriks polimer (seperti PLA) yang diperkuat dengan serat tumbuhan atau hewan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan material secara keseluruhan (Savetlana et al., 2012).



Gambar 2.1. Pengolahan dan pembuangan sampah padat kota termasuk plastik bekas pakai berdasarkan kelompok pendapatan.

Komposit serat alam merupakan material yang terdiri dari matriks polimer yang diperkuat dengan serat alami, seperti serat kelapa, bambu, rami, dan serat pisang. Penggunaan serat alam dalam komposit menawarkan berbagai keuntungan, di antaranya bobot yang ringan, sifat mekanik yang baik, serta keberlanjutan lingkungan (Manurung et al., 2013). Studi sebelumnya menunjukkan bahwa serat alam dapat meningkatkan sifat mekanik material komposit, tergantung pada jenis serat dan metode pemrosesannya (Siagian & Putra, 2024).



Gambar 2.2. Serat TKKS

Serat alam memiliki beberapa manfaat dibandingkan serat sintetis, termasuk biodegradabilitas, kepadatan dan biaya rendah, bobot lebih ringan, siklus hidup yang unggul, dan sifat mekanis yang baik. Dalam dunia industri, komposit berbasis serat alam telah digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari industri otomotif sebagai bahan interior kendaraan hingga konstruksi bangunan sebagai panel dan insulasi termal. Keunggulan lainnya termasuk daya serap energi yang baik serta kemampuan daur ulang

yang lebih tinggi dibandingkan dengan komposit berbasis serat sintetis (Siagian & Putra, 2024).

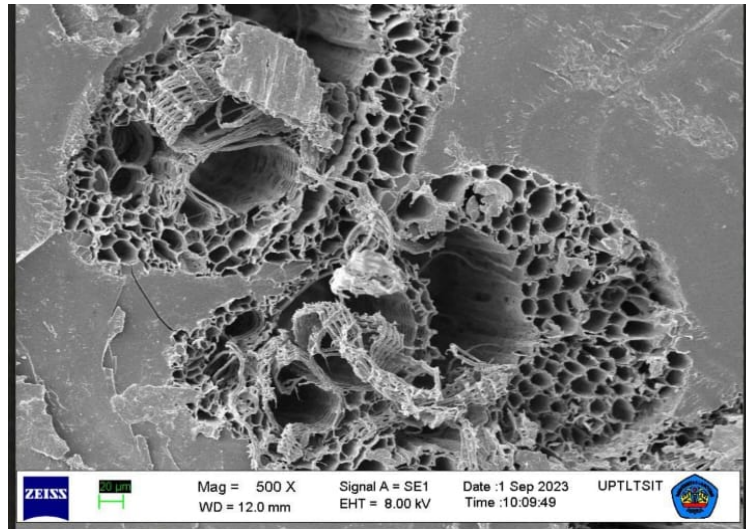
Pada penelitian tentang analisis komposit (PLA dan kitosan) material PLA memiliki peran sebagai matriks yang memiliki sifat kaku, sedangkan kitosan yang berfungsi untuk meningkatkan fleksibilitas dari material, dalam hal ini terlihat bahwa masing-masing dari bahan (PLA & kitosan) memiliki sebuah kontribusi kualitas yang berbeda-beda pada komposit, yang dapat meningkatkan kinerja mekanis dan juga biologisnya (Fikri et al., 2024).



Gambar 2.3. Tandan Kosong Kelapa Sawit

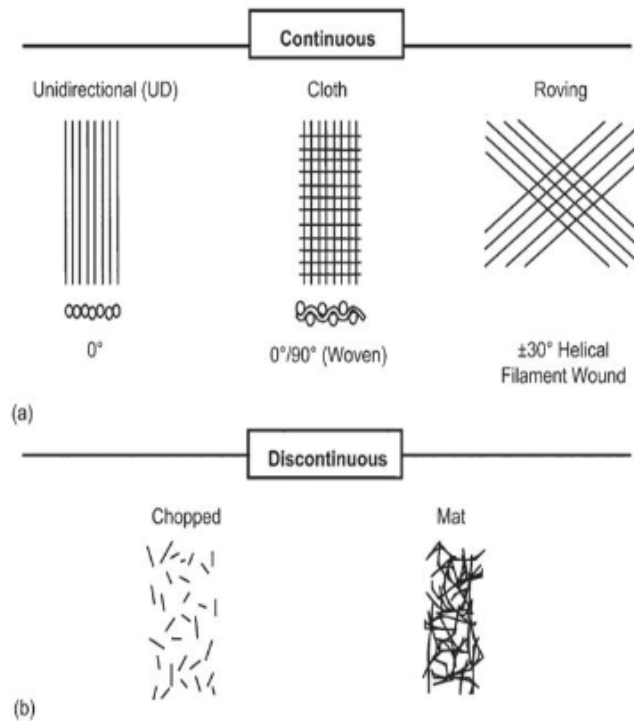
Penentuan parameter modulus antarmuka (Interface) dalam pemodelan, kualitas ikatan antara serat dan matriks sangat mempengaruhi distribusi tegangan. Divariasikan antara 335 MPa hingga 800 MPa. Nilai batas atas 800 MPa dipilih untuk merepresentasikan kondisi ikatan yang mendekati sempurna di mana transfer beban terjadi secara optimal,

dan juga dalam bentuk desain dapat merepresentasikan bentuk dari natural fiber yang memiliki hollow dan juga lumen.



Gambar 2.4. Pengamatan SEM Natural Fiber

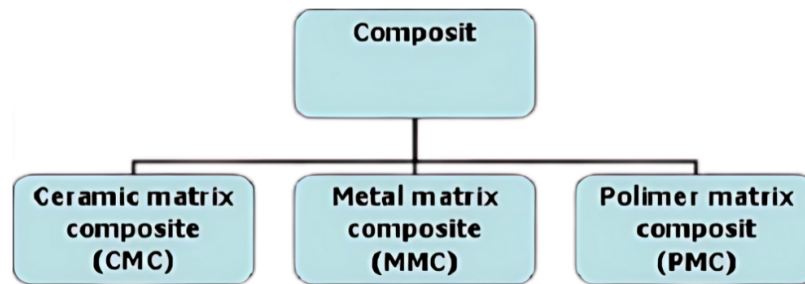
Material komposit menggabungkan dua atau lebih komponen untuk menghasilkan properti unggul, di mana penguat dan matriks berperan utama. Fase penguat, yang umumnya lebih kuat dan kaku, dapat berupa serat atau partikulat. Serat kontinu memiliki rasio aspek panjang dan orientasi terarah seperti pada Gambar 2.4a, memberikan kekuatan dan kekakuan tinggi. Sebaliknya, serat diskontinu pada Gambar 2.4b memiliki rasio aspek pendek dan orientasi acak, cenderung lebih murah namun kurang kuat. Serat, seperti kaca, aramid, atau karbon, memiliki diameter kecil yang meminimalkan cacat, sehingga menghasilkan komposit berkekuatan tinggi. Matriks, sebagai fase kontinu, berfungsi mempertahankan orientasi serat, melindunginya, dan mentransmisikan beban. Tipe dan kuantitas penguat, terutama serat kontinu, sangat menentukan properti akhir komposit (Campbell, 2010).



Gambar 2.5. (a) Serat kontinu (b) serat diskontinu ([Campbell, 2010](#))

1. Pengertian dan Klasifikasi Komposit

Material komposit merupakan gabungan dari dua atau lebih material yang memiliki sifat berbeda, yang disatukan untuk menghasilkan material baru dengan sifat mekanik, fisik, atau kimia yang lebih unggul dibandingkan komponennya secara terpisah. Dalam struktur komposit, umumnya terdapat dua fase utama, yaitu matriks dan penguat.



Gambar 2.6. Klasifikasi Komposit (Nayiroh, 2013)

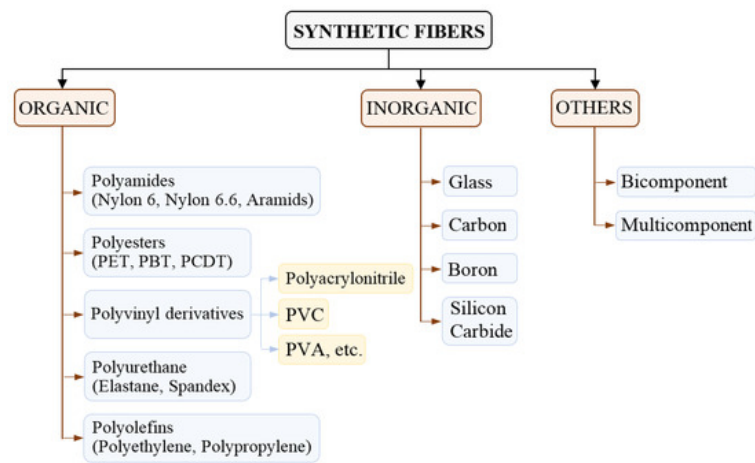
Komposit dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis matriksnya, seperti komposit matriks logam (MMC), komposit matriks keramik (CMC), dan komposit matriks polimer (PMC) (Nayiroh, 2013). Dalam pengembangan material komposit yang diperkuat serat alami menjadi fokus utama karena potensinya yang besar. dalam upaya meninjau peluang baru untuk menghasilkan material multifungsi dari komposit serat tersebut, sekaligus mencari solusi untuk tantangan yang ada (Nsanzumuhire et al., 2025)

2. Serat alam & serat sintetis

Dalam pengembangan material komposit, jenis serat yang digunakan sebagai penguat memainkan peran penting dalam menentukan sifat mekanik, termal, dan lingkungan dari produk akhir. Serat penguat dalam komposit secara umum terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu serat sintetis dan serat alam.

a. Serat Sintetis

Serat sintetis seperti serat karbon, serat gelas (glass fiber), dan serat aramid telah lama digunakan sebagai penguat dalam komposit karena kekuatan mekanik dan ketahanan termalnya yang tinggi. Serat-serat ini biasanya dibuat melalui proses industri yang kompleks dan menggunakan bahan dasar kimia, seperti polimer sintetis.



Gambar 2.7. Klasifikasi serat sintetis berdasarkan serat organik, anorganik, dan lainnya

(Rajak et al., 2022)

Komposit berbasis serat sintetis banyak digunakan dalam industri kedirgantaraan, otomotif, dan konstruksi karena kekuatan tariknya yang tinggi, kekakuan yang baik, serta ketahanannya terhadap suhu tinggi dan bahan kimia. Meskipun unggul dari segi performa teknis, serat sintetis memiliki sejumlah kekurangan. Proses produksinya seringkali menghasilkan emisi karbon tinggi, memerlukan energi besar, dan tidak ramah lingkungan karena sulit terurai secara alami. Selain itu, biaya

produksinya relatif mahal dan penggunaan jangka panjangnya dapat menimbulkan masalah lingkungan pada saat daur ulang atau pembuangan akhir. Oleh karena itu kebutuhan akan alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (Selvaraj et al., 2025).

b. Serat Alam

Sebagai alternatif terhadap serat sintetis, serat alam mulai banyak digunakan dalam pengembangan komposit ramah lingkungan, khususnya *Natural Fiber Reinforced Polymer Composites* (NFRPCs). Serat alam berasal dari sumber daya hayati yang terbarukan, seperti tanaman (flax, hemp, jute, kenaf, serat nanas, pisang, kelapa, dan lainnya) maupun hewan. Dibandingkan serat sintetis, serat alam memiliki sejumlah keunggulan, antara lain ringan, biaya rendah, mudah terurai (biodegradable), dan lebih ramah lingkungan. Dalam industri otomotif, serat alam menjadi bahan unggulan untuk program eco-friendly lightweighting, yaitu pengurangan berat kendaraan tanpa mengorbankan kekuatan dan performa struktur.



Gambar 2.8. Siklus hidup komposit yang diperkuat serat alami yang dapat terurai
(Syduzzaman et al., 2020)

Komposit serat alam menawarkan potensi besar karena selain memiliki sifat mekanik dan akustik yang memadai, juga mampu menurunkan emisi karbon secara signifikan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa serat seperti flax, hemp, dan kenaf mampu memberikan performa yang kompetitif saat digunakan sebagai penguat dalam panel kendaraan, komponen interior, dan bagian struktural lainnya (Skosana et al., 2025).

3. PLA sebagai matriks dan serat TKKS sebagai penguat

Polylactic Acid (PLA) merupakan salah satu biopolimer yang paling banyak digunakan sebagai alternatif berkelanjutan terhadap plastik berbasis minyak bumi. PLA diperoleh dari sumber daya terbarukan seperti pati jagung dan tebu, serta dikenal memiliki sifat biodegradabilitas, biokompatibilitas, transparansi tinggi, dan kemudahan daur ulang. Sifat-sifat ini menjadikan PLA sebagai kandidat kuat dalam berbagai aplikasi, seperti kemasan makanan, perangkat medis, rekayasa jaringan, hingga manufaktur aditif (Sethy & Sahoo, 2025).

Meski demikian, PLA memiliki beberapa keterbatasan, seperti ketahanan termal yang rendah, sifat rapuh, serta daya tahan terhadap penetrasi gas dan uap air yang kurang baik. PLA juga tidak memiliki sifat fungsional seperti aktivitas antimikroba atau antioksidan yang penting dalam aplikasi kemasan aktif dan biomedis (Roy & Rhim, 2020). Untuk mengatasi kelemahan tersebut, dilakukan berbagai modifikasi, salah satunya dengan menambahkan bahan penguat atau pengisi ke dalam matriks PLA (Subbuvel & Kavan, 2022).

Salah satu pendekatan yang banyak diteliti adalah penguatan PLA dengan serat alami, yang tidak hanya memperbaiki sifat mekanik, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan. Dalam hal ini, serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) atau Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) merupakan pilihan yang menjanjikan. TKKS merupakan limbah biomassa pertanian yang

melimpah di negara produsen kelapa sawit seperti Indonesia dan Malaysia, sehingga pemanfaatannya sebagai penguat komposit memberikan nilai tambah sekaligus solusi terhadap permasalahan limbah organik (Muhaimin et al., 2025).



Gambar 2.9. Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (Savetlana et al., 2012)

Komposit poliester yang diperkuat serat Tandan Kosong Kelapa Sawit pada Gambar 2.8 sifat mekanik menunjukkan bahwa kekuatan lentur komposit meningkat seiring dengan peningkatan fraksi volume serat. Demikian pula, kekuatan tarik dan modulus elastisitas komposit juga lebih tinggi dibandingkan poliester murni dan meningkat seiring peningkatan fraksi volume serat (Savetlana et al., 2012). Serat TKKS pada telah terbukti efektif meningkatkan sifat mekanik komposit pada berbagai jenis matriks polimer. Pada matriks lain seperti *polyoxymethylene* (POM) dan polimer daur ulang menunjukkan bahwa TKKS mampu menurunkan koefisien gesek dan laju

keausan, serta meningkatkan kekuatan lentur komposit hingga mencapai 48,43 MPa pada matriks rPP. Ini menunjukkan bahwa serat TKKS memiliki potensi sebagai penguat dalam aplikasi teknik berperforma menengah hingga tinggi (Abd Wahab et al., 2025).

Lebih lanjut, pengaruh ukuran partikel serat TKKS juga menjadi faktor penting dalam pengembangan komposit. Penelitian menggunakan matriks resin epoksi menunjukkan bahwa serat dengan ukuran lebih halus (140 mesh) menghasilkan komposit dengan densitas lebih tinggi, porositas lebih rendah, serta peningkatan modulus patah (MOR) dan modulus elastisitas (MOE) secara signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi serat yang lebih merata dan permukaan kontak yang lebih besar antara serat dan matriks dapat menghasilkan ikatan antarmuka yang lebih kuat dan meningkatkan performa komposit secara keseluruhan (Ismail et al., 2025).

Dengan menggabungkan sifat biodegradabilitas dan kemudahan pencetakan PLA dengan kekuatan mekanik serta ketersediaan lokal serat TKKS, maka material komposit PLA/TKKS sangat potensial digunakan pada berbagai aplikasi berkelanjutan.

4. Sifat mekanik dan aplikasi komposit alam

Penggunaan serat alam sebagai penguat dalam material komposit telah menunjukkan potensi besar dalam berbagai sektor aplikasi. Serat-serat ini berasal dari sumber terbarukan dan memiliki keunggulan seperti ringan,

murah, serta tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Komposit dengan penguat serat alam (*Natural Fibre Reinforced Composites/NFRCs*) banyak diterapkan dalam bidang otomotif, dirgantara, olahraga, hingga produk medis berkat sifat fisik dan mekaniknya yang kompetitif (Syduzzaman et al., 2020).

No	Fraksi	Energi Serap (J)	Ketangguhan Impak (J/mm ²)
1	10%	0.53600	0.011278
2	15%	0.593333	0.012080
3	20%	0.870333	0.017588



Gambar 2.10. Fraksi - Energi serap - Ketangguhan (Hastuti et al., 2021)

Namun demikian, tantangan teknis seperti ikatan antarmuka yang lemah antara serat dan matriks masih menjadi hambatan utama dalam meningkatkan performa komposit. Hal ini disebabkan perbedaan sifat kimia antara serat alam yang bersifat hidrofilik dan matriks polimer yang umumnya hidrofobik (Syduzzaman et al., 2020). Untuk mengatasi hal tersebut, perlakuan permukaan seperti perendaman dalam larutan alkali telah terbukti efektif. Sebagai contoh pada Gambar 2.8, komposit dengan penguat sabut kelapa yang direndam NaOH 15% menunjukkan peningkatan signifikan pada kekuatan lentur dan impak. Pada fraksi volume serat 10%, kekuatan lentur mencapai

44,33 N/mm², sedangkan pada fraksi 20% nilai ketangguhan impak tertinggi diperoleh sebesar 0,017588 J/mm² (Hastuti et al., 2021).

Penelitian karakterisasi termal dan mekanik terhadap berbagai jenis serat alam menunjukkan bahwa beberapa jenis serat seperti daun nanas, rami, dan jerami toquilla mampu mempertahankan sifat mekaniknya dalam rentang suhu -50 hingga 100°C (Hidalgo-Salazar et al., 2025). Hal ini membuka peluang penggunaan komposit alam untuk produk-produk yang bekerja dalam kondisi suhu yang beragam. Selain itu, analisis morfologi menunjukkan bahwa kekasaran permukaan serat yang bervariasi secara arah turut mempengaruhi efektivitas ikatan dengan matriks, sehingga berdampak langsung pada kekuatan tarik dan modulus komposit (Hidalgo-Salazar et al., 2025).

Dalam konteks manufaktur berbasis teknologi digital, komposit serat alam juga mulai diintegrasikan dalam proses pencetakan 3D. Teknologi ini memungkinkan penciptaan bentuk kompleks dengan efisiensi bahan yang tinggi, serta waktu produksi yang lebih singkat dibanding metode konvensional (Nsanzumuhire et al., 2025). Penggunaan serat alam dalam pencetakan 3D, terutama bila dipadukan dengan biopolimer, dinilai mampu menghasilkan produk multifungsi seperti implan medis dengan kinerja yang kompetitif serta mendukung pengurangan limbah..

Dengan perkembangan teknologi dan riset yang terus dilakukan, komposit alam memiliki peluang besar untuk terus dikembangkan sebagai alternatif

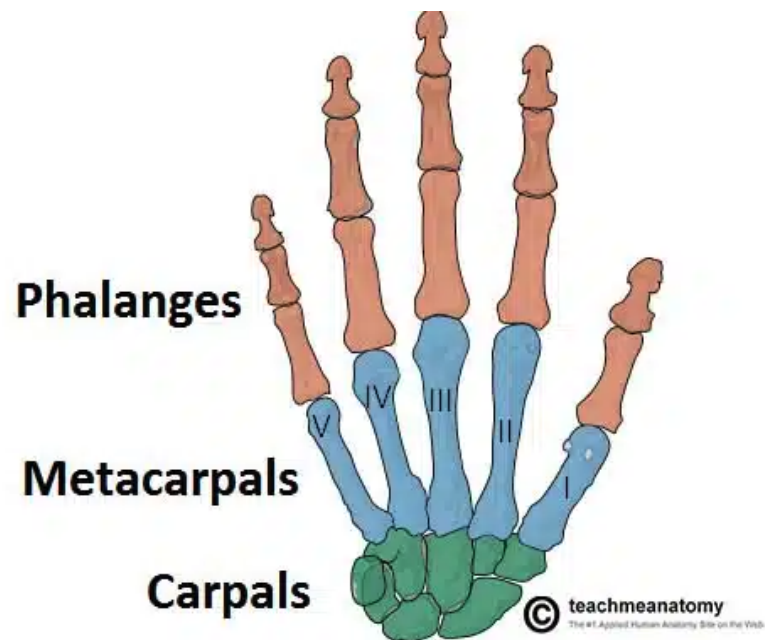
berkelanjutan terhadap komposit sintetis. Kombinasi inovasi material dan teknik fabrikasi modern akan menjadi kunci dalam menghadirkan solusi material masa depan yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga bertanggung jawab terhadap lingkungan.

B. Orthosis dan Fraktur Tulang Metacarpal

Seiring berkembangnya teknologi dan pemahaman dalam dunia medis, orthosis telah menjadi salah satu solusi utama dalam penanganan berbagai kasus cedera dan gangguan fungsi pada tangan, termasuk pada fraktur tulang metacarpal (Chimonides et al., 2025). Sejak zaman Mesir Kuno, orthosis telah digunakan untuk memperbaiki dan mendukung anggota tubuh yang mengalami cedera, menggunakan material seperti kayu, logam, hingga plastik dan komposit serat alami (Shahar et al., 2019). Kini, teknologi modern seperti *reverse engineering* dan analisis elemen hingga *finite element analysis* juga telah diterapkan untuk meningkatkan desain dan kinerja orthosis, khususnya dalam mendukung proses pemulihan dan rehabilitasi pasien (Emzain et al., 2023).

1. Anatomi tulang metacarpal

Tulang metacarpal terdiri dari lima tulang panjang yang terletak di antara karpal (pergelangan tangan) dan falang (tulang jari). Setiap metacarpal memiliki bagian dasar (base) yang berartikulasi dengan tulang karpal, bagian batang (shaft), dan bagian kepala (head) yang membentuk sendi metakarpofalangeal (Jones, 2018).



Gambar 2.11. Gambaran umum tulang-tulang tangan. (Jones, 2018)

Secara fungsional, tulang metacarpal mendukung struktur tangan, memungkinkan gerakan fleksibel dan memberikan tempat perlekatan otot-otot tangan.

a. *Ist* metacarpal (ibu jari)

Paling tebal dan pendek. Posisinya miring (berputar 90°) supaya bisa pegang dan mencengkeram. Basisnya bentuk sadel untuk sendi dengan tulang trapezium. Jadi tempat menempel beberapa otot penting seperti opponens pollicis (untuk gerakan ibu jari ke telapak) dan abductor pollicis longus.

b. *2nd* metacarpal (telunjuk)

Ini yang paling panjang dan besar di pangkalnya. Basisnya berartikulasi dengan beberapa tulang pergelangan tangan. Otot yang menempel: flexor carpi radialis (gerak pergelangan tangan) dan otot-otot interossei (mengatur gerakan jari).

c. *3rd* metacarpal (jari tengah)

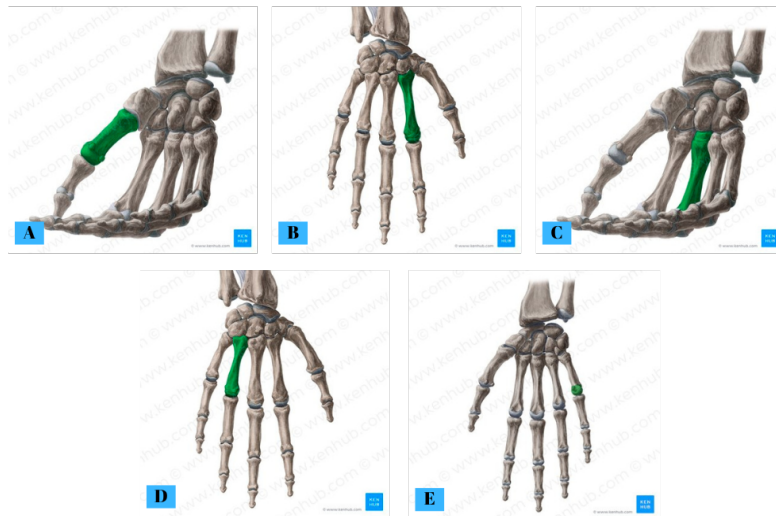
Ada tonjolan di pangkalnya (styloid process) yang bantu sendi dengan capitate. Jadi tempat otot-otot seperti extensor carpi radialis brevis dan otot-otot interossei.

d. *4th* metacarpal (jari manis)

Basisnya artikulasi dengan metacarpal 3 & 5, dan tulang hamate. Tempat menempel otot interossei yang mengatur gerakan jari.

e. *5th* metacarpal (kelingking)

Paling kecil. Punya tonjolan untuk otot extensor carpi ulnaris. Basisnya sambung dengan tulang hamate, dan jadi tempat otot opponens digiti minimi (untuk gerak kelingking) (Standring, 2016).



Gambar 2.12. Gambaran (A) *1st* metacarpal, (B) *2nd* metacarpal (telunjuk), (C) *3rd* metacarpal (jari tengah), (D) *4th* metacarpal (jari manis), (E) *5th* metacarpal (kelingking).
(Standring, 2016) (Koh, 2023)

2. Peran orthosis dalam pemulihan

Orthosis memainkan peran penting dalam mendukung pemulihan pasien dengan cedera tangan, termasuk fraktur metacarpal. Penggunaan orthosis yang sesuai dapat menstabilkan tulang selama penyembuhan, mengurangi nyeri, serta memfasilitasi gerakan tangan yang aman (Vikhe et al., 2024). Selain itu, orthosis modern yang melibatkan teknologi wearable (seperti robotic orthosis) juga memiliki potensi untuk mendukung pemulihan fungsional melalui latihan aktif yang dibantu perangkat. Hasil survei klinisi menunjukkan bahwa orthosis tangan robotik dinilai bermanfaat untuk tujuan rehabilitatif dan asistif, serta perlu dirancang agar nyaman dan efisien dalam penggunaan sehari-hari (Winterbottom et al., 2025).

Fraktur tulang metacarpal adalah salah satu cedera tangan yang sering terjadi, mencakup sekitar 33–35% dari seluruh kasus fraktur tangan. Fraktur ini dapat disebabkan oleh trauma langsung, aktivitas olahraga, atau kecelakaan kerja. Fraktur yang umum termasuk fraktur leher, dasar, dan diafisis. Pengelolaan fraktur metacarpal dapat dilakukan secara konservatif (reduksi tertutup dan imobilisasi gips) maupun operatif (dengan fiksasi internal menggunakan plate atau pin), tergantung pada lokasi dan stabilitas fraktur (Lambi et al., 2023).

Terapi rehabilitasi, termasuk mobilisasi dini dan penggunaan orthosis, sangat penting untuk mencegah kekakuan dan memulihkan fungsi tangan (Vikhe et al., 2024).

3. Studi penggunaan serat alam dalam orthosis

Pada masa lampau, orthosis umumnya dibuat dari bahan kayu karena ketersediaannya yang melimpah serta kemudahan dalam proses pembuatannya. Seiring waktu, material tersebut digantikan oleh logam dan kulit karena menawarkan kekuatan yang lebih tinggi dan ketahanan terhadap sobekan. Namun demikian, orthosis berbahan logam dan kulit cenderung berat, besar, dan kurang nyaman digunakan. Setelah revolusi industri, material komposit seperti serat karbon dan polimer mulai menggantikan bahan konvensional karena memiliki berbagai keunggulan fisik dan mekanik, seperti rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, modulus elastisitas yang baik, tahan korosi, serta massa jenis yang rendah. Hal ini menjadikan material komposit sangat cocok

untuk aplikasi orthosis pergelangan kaki (ankle foot orthosis/AFO). Saat ini, penggunaan material komposit telah meluas dalam dunia medis, termasuk dalam pembuatan berbagai perangkat kesehatan (Dubey & Gangwar, 2021).

Orthosis pergelangan kaki (Ankle Foot Orthosis/AFO) umumnya dibutuhkan oleh individu dengan gangguan neuromuskuloskeletal untuk membantu memulihkan pola berjalan yang normal. Kelemahan otot dan gangguan keseimbangan dapat diatasi dengan bantuan alat bantu orthosis. Selama ini, serat sintetis seperti karbon, kaca, dan aramid banyak digunakan sebagai material penguat dalam pembuatan orthosis. Namun, potensi penggunaan serat alam tenun sebagai alternatif penguat belum banyak dieksplorasi. Serat alam memiliki keunggulan berupa tidak menimbulkan iritasi pada kulit, mata, atau saluran pernapasan serta memiliki kekuatan mekanik yang cukup tinggi. Dalam penelitian ini, serat dari batang semu pisang digunakan sebagai penguat komposit karena sifatnya yang ramah lingkungan, berbiaya rendah, dan memiliki performa mekanik yang baik. Melalui metode laminasi, komposit berbasis serat alam tenun yang dihasilkan mampu menunjukkan kekuatan yang sebanding dengan material orthosis konvensional. Hasil studi ini menunjukkan bahwa serat alam dapat menjadi alternatif bahan yang lebih murah, ramah lingkungan, dan tetap memenuhi kebutuhan fungsional orthosis, khususnya bagi pasien di negara berpenghasilan rendah (Oyewo et al., 2019).

Sebagaimana telah dibahas pada bagian sebelumnya, material komposit menunjukkan tingkat kompatibilitas yang tinggi sebagai bahan baku dalam pembuatan ankle foot orthosis (AFO). salah satu jenis serat alam yang memiliki prospek menjanjikan adalah serat kenaf. Berdasarkan berbagai studi, kenaf memiliki sifat mekanik yang mendekati material AFO konvensional, dengan keunggulan tambahan berupa ketersediaan yang melimpah dan sifat yang ramah lingkungan. Dengan demikian, penggunaan komposit berbasis kenaf dapat menjadi solusi alternatif yang lebih terjangkau dan berkelanjutan (Shahar et al., 2019).

C. Simulasi Unit Cell

Unit cell merupakan elemen terkecil yang mewakili struktur geometris dan perilaku mekanik dari keseluruhan material secara periodik. Unit cell digunakan sebagai dasar dalam pemodelan numerik untuk memprediksi respons mekanik material komposit secara efisien dan akurat, pemodelan unit cell telah berhasil diterapkan untuk memprediksi perilaku lentur komposit tenun dengan memanfaatkan pendekatan elemen hingga pada skala mesoskopik. Salah satu tantangan dalam menganalisis komposit tenun adalah distribusi deformasi yang tidak merata sepanjang arah ketebalan saat mengalami beban lentur, yang menyebabkan prediksi numerik menjadi sulit dilakukan, untuk mengatasi hal tersebut, dikembangkan model unit cell berbasis elemen hingga yang dilengkapi dengan kondisi batas periodik, serta disesuaikan untuk

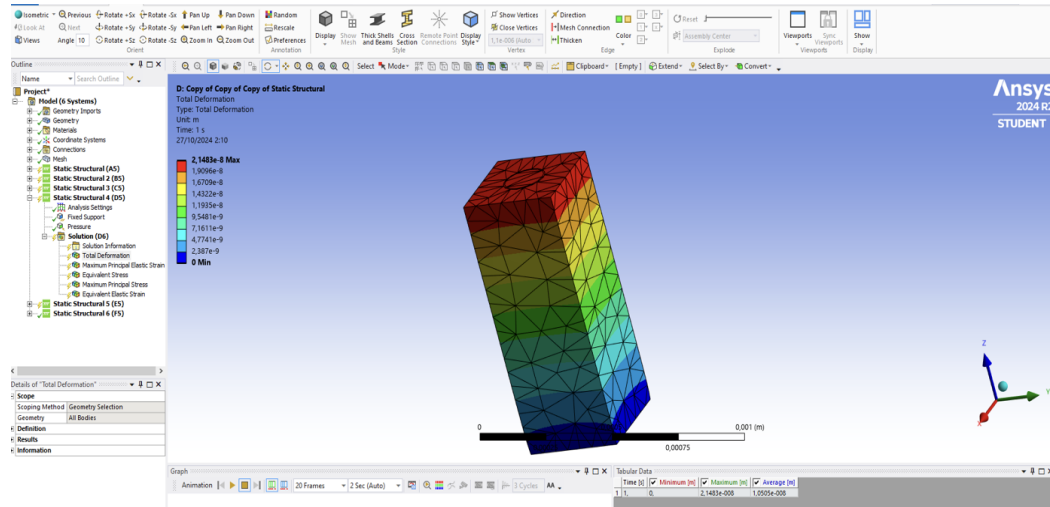
menampung deformasi yang tidak seragam di bawah beban lentur murni (Liu et al., 2024).

Akurasi prediksi properti mekanik merupakan aspek fundamental terkait dengan konsep simulasi *unit cell*. Pendekatan ini memungkinkan penentuan properti efektif material makroskopik berdasarkan karakteristik komponen mikroskopisnya. Tantangan signifikan muncul dari ketidakpastian parameter *input*, ketidakpastian antar-skala, serta biaya komputasi yang tinggi untuk simulasi ekstensif. Model inovatif untuk memprediksi properti mekanik komposit tenun polos, yang mengintegrasikan penggunaan sel unit berukuran minimum. Model ini tidak hanya meningkatkan akurasi, tetapi juga menekan biaya komputasi secara drastis hingga melalui pemanfaatan sel unit yang jauh lebih kecil yang diformulasikan berdasarkan analisis simetri struktural. Kemampuan untuk secara akurat memprediksi parameter yang dihasilkan seperti modulus efektif, bahkan dengan mempertimbangkan variabilitas internal, memiliki relevansi tinggi terhadap desain ortosis (Yang et al., 2025).

D. Metode Elemen Hingga dan Penggunaan ANSYS

Pemahaman mendalam mengenai perilaku mekanik komposit, termasuk rentang ketidakpastiannya, sangat esensial dalam merancang ortosis yang tidak hanya memenuhi persyaratan kekuatan dan kekakuan, tetapi juga optimal dari segi bobot, kenyamanan, dan efisiensi biaya. Pemodelan dan simulasi berbasis perangkat lunak memainkan peran penting dalam mengevaluasi kinerja mekanik material sebelum

diaplikasikan secara nyata. ANSYS adalah salah satu perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang sering digunakan untuk mensimulasikan sifat mekanik komposit, termasuk distribusi tegangan dan regangan pada material yang diuji (Diana et al., 2020).



Gambar 2.13. Simulasi Ansys (sumber pribadi)

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa simulasi menggunakan ANSYS dapat memprediksi karakteristik mekanik komposit dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi. Menganalisis sifat tarik komposit berbasis serat alam dan menemukan bahwa hasil simulasi memiliki kesamaan dengan hasil eksperimen (Rasyid, 2019). Oleh karena itu, penggunaan perangkat lunak ini sangat berguna dalam memahami performa material sebelum produksi massal dilakukan.

1. Pengertian metode elemen hingga (FEM)

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) adalah pendekatan numerik yang membagi struktur menjadi elemen-elemen diskrit, memungkinkan analisis gaya, tegangan, dan deformasi pada sistem rekayasa. Pada bidang medis, salah satu penerapannya adalah simulasi implan sendi panggul menggunakan ANSYS Workbench, yang mempertimbangkan diameter kepala femoral untuk menganalisis tekanan kontak, tegangan Von-Mises, dan deformasi total (Manap et al., 2024).

Sementara itu, di sektor otomotif, FEM diaplikasikan untuk menganalisis kinerja bumper kendaraan, khususnya pada profil C-Hat dan Double-Hat Section serta berbagai material seperti baja, CFRP, dan aluminium. Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS untuk mengevaluasi deformasi, tegangan Von-Mises, dan energi serap saat tabrakan longitudinal dan samping. Hasilnya menunjukkan bahwa profil C-Hat dengan material aluminium 2024-T86 pada ketebalan 4 mm memiliki tegangan Von-Mises sebesar 194,40 MPa, deformasi 1,2057 mm, dan energi serap 160,31 J, menjadikannya pilihan optimal untuk aplikasi bumper pada MPV (Sukoco et al., 2025).

2. Fungsi simulasi dalam rekayasa material

Simulasi memainkan peran penting dalam rekayasa material, memberikan kemampuan untuk menganalisis dan mengevaluasi kinerja desain sebelum proses manufaktur. Salah satu contoh penerapannya adalah pada pembuatan

orthosis tangan berbasis teknologi reverse engineering. Studi tentang pembuatan orthosis tangan berbahan ABS menggunakan simulasi FEM (Finite Element Method) menunjukkan bahwa variasi ketebalan orthosis dapat mempengaruhi tingkat tegangan dan deformasi yang terjadi saat menerima beban, di mana model dengan ketebalan minimum 5 mm mampu menopang beban 15 N dengan aman (Emzain et al., 2023).

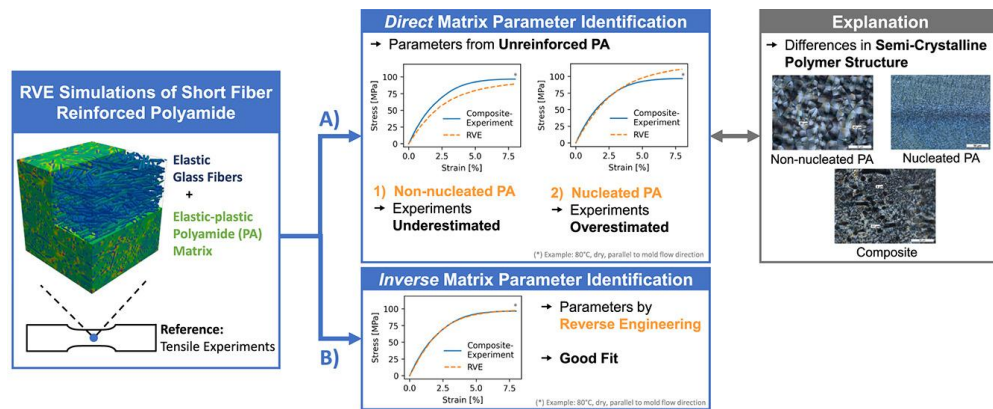
Selain itu, teknologi 3D printing juga sangat terkait dengan simulasi dalam konteks rekayasa material, terutama dalam pembuatan prototipe cepat. 3D printing memungkinkan para insinyur menciptakan komponen yang kompleks, ringan, serta disesuaikan dengan kebutuhan spesifik, yang sebelumnya sulit dicapai dengan metode tradisional. Namun, penerapannya masih menghadapi tantangan seperti keterbatasan material dan standar industri (Siregar, 2024).

Selain itu, penelitian tentang komposit serat alam untuk aplikasi balistik juga menunjukkan bagaimana simulasi FEM dapat memprediksi deformasi, tegangan, dan regangan pada berbagai ketebalan komposit. Hasil simulasi ini sangat penting untuk merancang material pelindung seperti rompi anti peluru yang ringan namun mampu meredam energi peluru secara efektif (Rollastin et al., 2023).

Dalam konteks optimalisasi material dan desain, *computational homogenization* digunakan untuk memodelkan perilaku mekanik poliamida yang diperkuat serat pendek. Dua metode identifikasi parameter matriks

digunakan: pendekatan langsung menggunakan eksperimen pada poliamida tak diperkuat, dan pendekatan *inverse* melalui *reverse engineering*. Pendekatan *inverse* ini terbukti sangat efektif dalam menghasilkan hasil simulasi yang sangat cocok dengan data eksperimen, sekaligus mengatasi ketidakpastian material dan model mikromekanik (Wetzel et al., 2025).

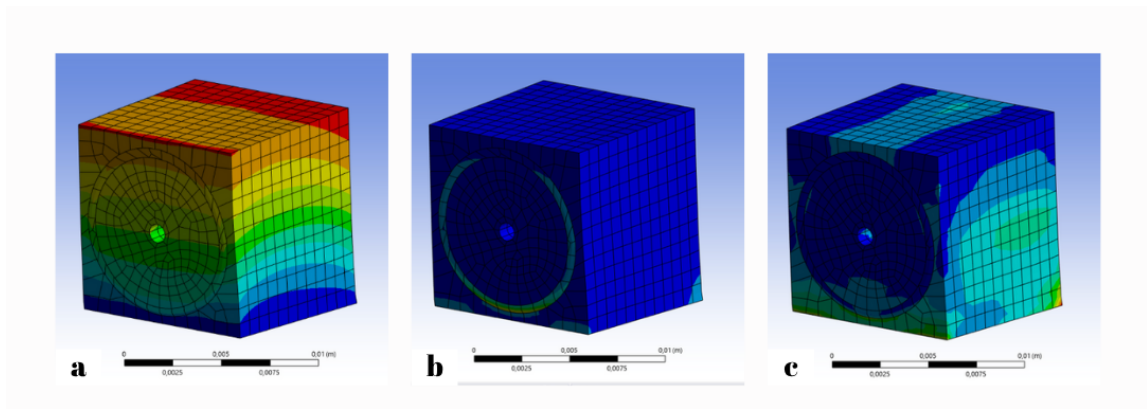
Pada Gambar 2.13 Menampilkan model RVE yang terdiri dari serat kaca elastis (Elastic Glass Fibers) yang terdistribusi di dalam matriks poliamida elastoplastik (Elastic-plastic Polyamide (PA) Matrix). Model ini digunakan untuk memprediksi perilaku tegangan-regangan komposit, dengan data eksperimen tarik (tensile experiments) sebagai referensi.



Gambar 2.14. diagram alur yang menunjukkan metode simulasi Representative Volume Element (RVE) untuk mempelajari perilaku mekanik komposit poliamida yang diperkuat serat pendek (Wetzel et al., 2025).

3. Parameter analisis: deformasi, tegangan, regangan von Mises

Dalam penelitian material dan struktur, deformasi (perubahan bentuk), tegangan (gaya per satuan luas yang dialami material), dan regangan von Mises (ukuran gabungan dari regangan yang mengindikasikan potensi kegagalan material) adalah parameter krusial untuk memahami bagaimana suatu material akan bereaksi terhadap beban. Perilaku dinamis eksplisit, karakteristik deformasi, dan tegangan von Mises. Ini menunjukkan bahwa parameter ini esensial untuk menilai keamanan, durabilitas, dan kinerja material, terutama dalam skenario beban benturan (Shaikh & Kubade, 2025).



Gambar 2.15. (a) Simulasi Ansys, total deformation, (b) regangan von mises, (c) tegangan von mises (sumber pribadi)

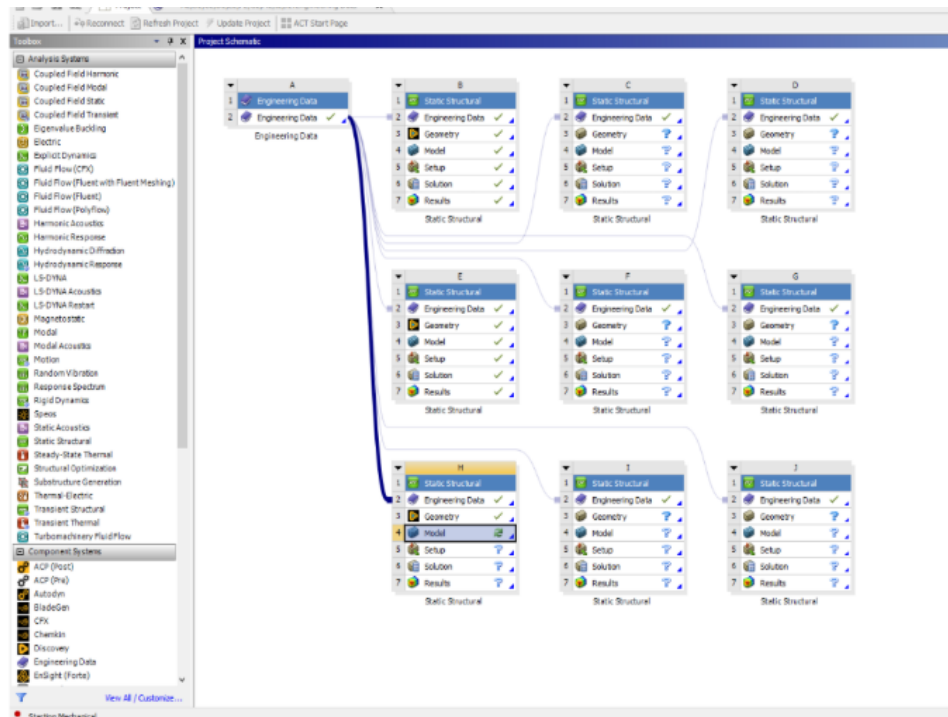
Tegangan von Mises, regangan elastis ekuivalen, dan total deformasi, untuk memprediksi kinerja komposit dalam aplikasi nyata menggunakan FEM. Ini membuktikan bahwa ketiga parameter ini adalah indikator utama performa material. Penggunaan lembaran baja berprofil pada slab komposit menghasilkan

penurunan deformasi sekitar 3% dan penurunan tegangan yang dialami slab komposit sekitar 32% dibandingkan slab konvensional. Ini adalah contoh konkret bagaimana analisis deformasi dan tegangan digunakan untuk menunjukkan keunggulan struktural dan finansial suatu desain (Nagammal et al., 2025).

Secara ringkas, parameter deformasi, tegangan, dan regangan von Mises menjadi indikator utama dalam simulasi rekayasa untuk memprediksi respons material terhadap beban, mengidentifikasi titik rawan, dan mengoptimalkan desain demi performa dan keamanan.

4. Kelebihan ANSYS dalam pemodelan komposit

ANSYS adalah perangkat lunak simulasi berbasis metode elemen hingga (FEM) yang sangat powerful dan fleksibel, menjadikannya pilihan ideal untuk pemodelan komposit. Keunggulannya meliputi kemampuannya untuk, Menggunakan ANSYS untuk memodelkan komposit dengan *carbon nanotubes* pada berbagai orientasi, membuktikan kemampuannya dalam mereplikasi mikrostruktur dan memprediksi transfer beban pada material heterogen. Ini sangat relevan dengan tesis Anda yang menggunakan serat alam dengan potensi orientasi serat yang bervariasi (Kumar et al., 2025).



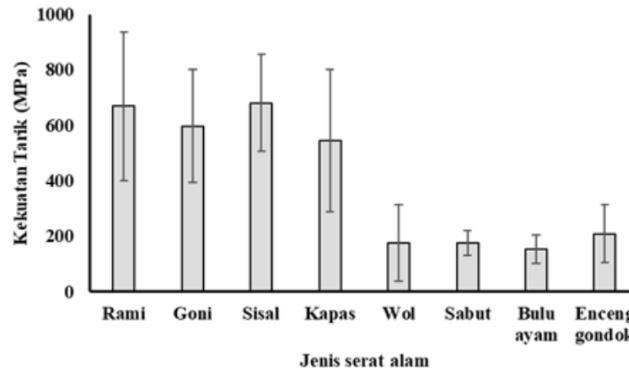
Gambar 2.16. Ansys workbench flow (sumber pribadi)

Penggunaan ANSYS Workbench 2022 untuk simulasi numerik dan validitas eksperimen perilaku lentur. Hasilnya menunjukkan prediksi numerik sangat cocok dengan nilai eksperimen (deviasi 1.63% hingga 2.16%), mengonfirmasi keandalan model. Ini adalah bukti kuat bahwa ANSYS dapat diandalkan untuk mengoptimalkan desain komposit dan mengurangi kebutuhan akan pengujian fisik yang mahal (M. Abdi Ruanda et al., 2025).

ANSYS unggul dalam pemodelan komposit karena kemampuannya untuk secara akurat menganalisis perilaku mekanik yang kompleks, memvalidasi dan mengoptimalkan desain material/struktur secara virtual, serta pada akhirnya memberikan efisiensi waktu dan biaya dalam proses pengembangan.

E. Penelitian Terdahulu yang Relevan

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik mekanik komposit serat alam dalam berbagai aplikasi. menunjukkan bahwa pemodelan komposit berbasis serat polimer menggunakan metode simulasi dapat memberikan wawasan lebih mendalam mengenai kekuatan tarik material (Setiawan, 2020). Mengkaji pengaruh variasi komposisi terhadap sifat mekanik material, di mana hasilnya menunjukkan bahwa pemilihan jenis serat sangat berpengaruh kekuatan dari material tersebut bisa di lihat di Gambar 2.15 oleh karena itu pemilihan komposisi serat juga sangat mempengaruhi terhadap performa akhir komposit (Sulardjaka et al., 2020).



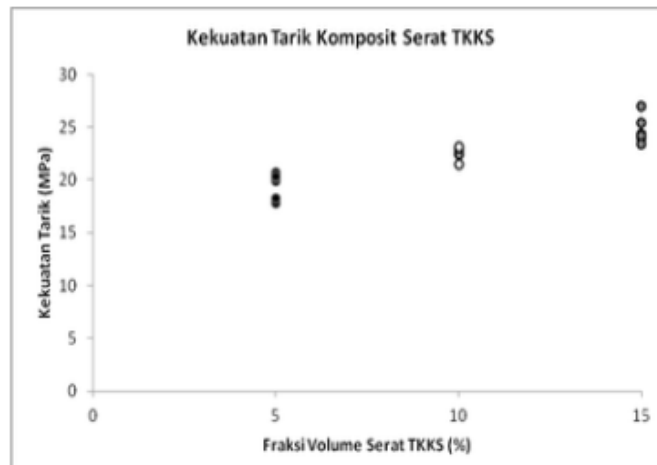
Gambar 2.17. Kekuatan tarik beberapa serat ((Sulardjaka et al., 2020))

Komposit karbon seringkali mahal, menjadikannya pilihan yang kurang praktis untuk perangkat seperti *Ankle-Foot Orthosis* (AFO), sedangkan plastik memiliki kekuatan yang rendah. Permasalahan ini mendorong eksplorasi material alternatif. Sebuah tinjauan penelitian (Shahar et al., 2019) menyoroti komposit serat kenaf sebagai

material yang sangat potensial untuk menggantikan material-material yang ada saat ini. Keunggulan kenaf terletak pada fleksibilitasnya dalam mengontrol rasio kekuatan terhadap berat, efektivitas biaya, ketersediaan bahan baku yang melimpah, dan biokompatibilitasnya. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa komposit kenaf memiliki potensi besar untuk fabrikasi AFO, terutama karena kekuatan tariknya yang mendekati *Polypropylene* (PP) dan biaya bahan baku yang lebih murah dibandingkan jenis material lain .

Hasil penelitian lainnya juga menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi simulasi dapat mengurangi biaya dan waktu dalam proses pengembangan material baru. Dengan demikian, metode pemodelan berbasis ANSYS dapat menjadi alat yang efektif untuk mempercepat inovasi dalam bidang material berbasis komposit serat alam (Diana et al., 2020).

Gambar 2.15 pada penelitian sebelumnya memperlihatkan pengaruh variasi volume serat TKKS terhadap kekuatan tarik komposit. Nilai kekuatan tarik poliester tanpa serat tercatat sebesar 15,64 GPa, sedangkan komposit dengan 15% serat menunjukkan nilai tertinggi (24,72 MPa) dan komposit 5% serat memiliki nilai terendah (19,54 MPa). Hasil tersebut mengindikasikan tren peningkatan kekuatan tarik seiring penambahan volume serat, meskipun peningkatannya belum optimal akibat ikatan antara serat dan matriks yang belum sempurna (Savetlana et al., 2012).



Gambar 2.18. Kekuatan Tarik Komposit Serat ((Savetlana et al., 2012)

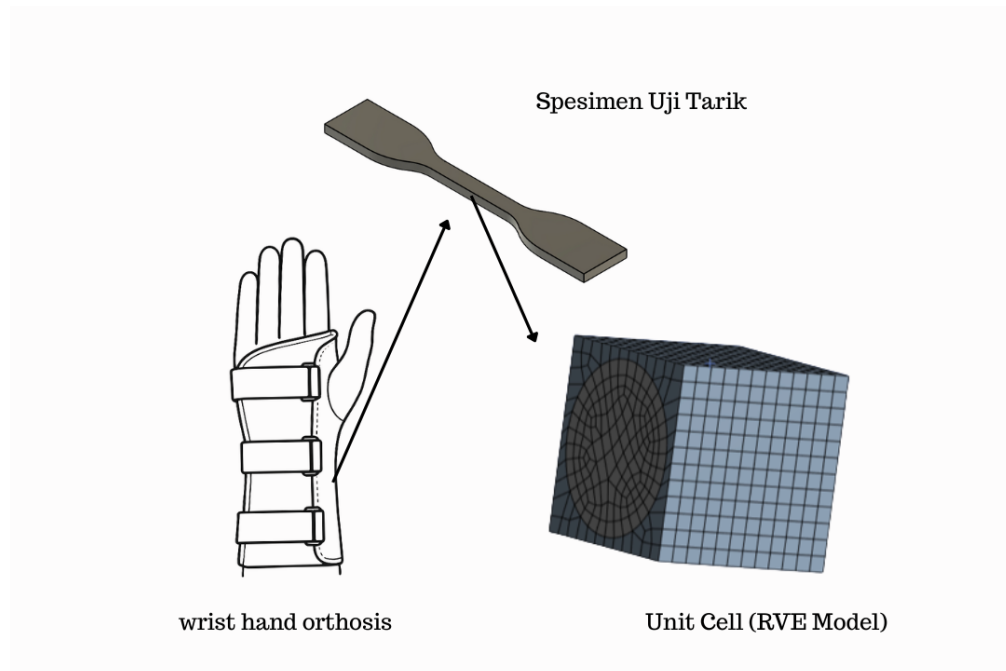
Temuan ini relevan dengan penelitian yang juga mengeksplorasi hubungan antara komposisi serat alam dan sifat mekanik material, khususnya dalam konteks biomaterial. Ketidakoptimalan ikatan serat-matriks pada penelitian terdahulu memperkuat perlunya modifikasi proses pencetakan atau perlakuan permukaan serat dalam studi ini, guna memastikan distribusi serat yang merata dan adhesi yang lebih baik. Selain itu, data kekuatan tarik tersebut dapat dijadikan acuan komparatif dalam mengevaluasi performa material berbasis serat alam yang dikembangkan, terutama untuk aplikasi alat kesehatan yang memerlukan sifat mekanik spesifik.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Diagram Alir Penelitian

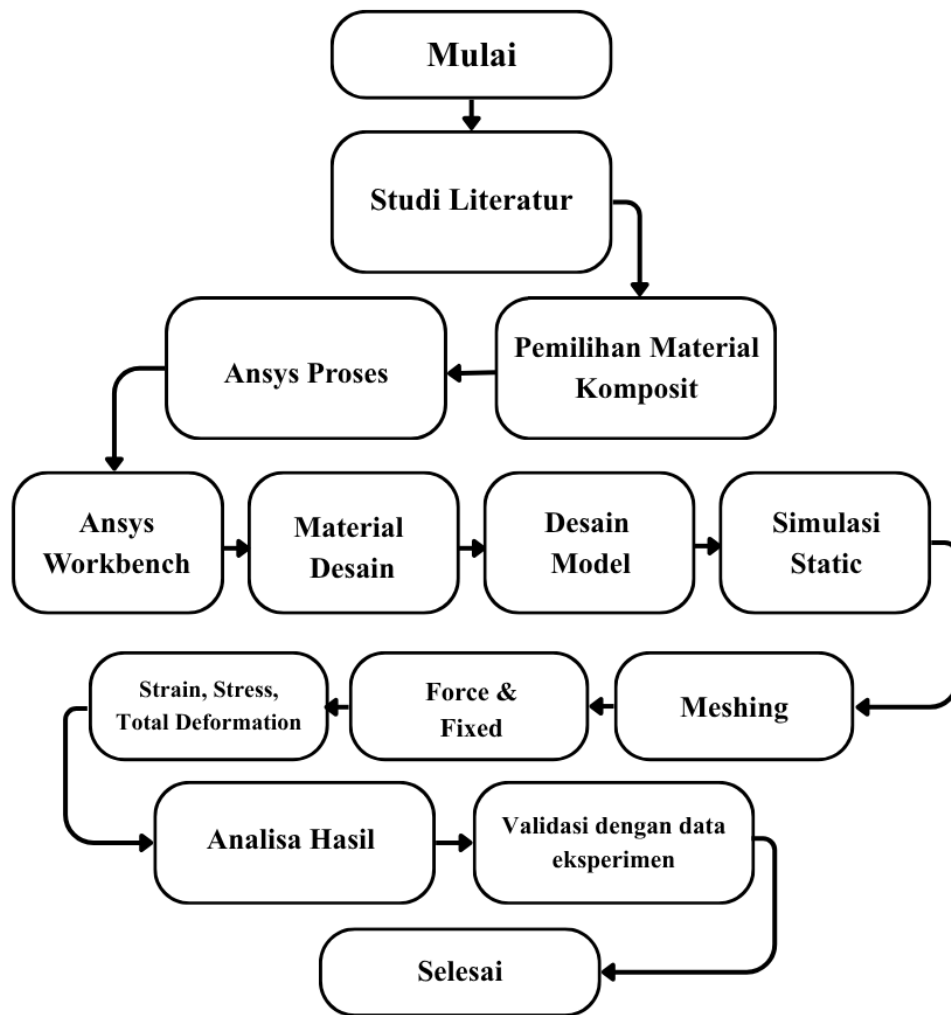
Penelitian ini dilakukan secara bertahap dengan alur kerja yang sistematis. Tahapan diawali dengan studi literatur untuk memperoleh pemahaman tentang teknologi 3D printing, komposit serat alam, serta metode simulasi menggunakan ANSYS. Kemudian dilakukan pemilihan material komposit yang akan digunakan dan pembuatan desain model. Selanjutnya, model tersebut disimulasikan menggunakan perangkat lunak ANSYS untuk menganalisis sifat mekanik.

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami dasar-dasar, material komposit serat alam, serta metode pemodelan dan simulasi menggunakan ANSYS terutama pada sistem unit cell. Setelah itu dilakukan pemilihan material komposit berdasarkan karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan penelitian. Selanjutnya, proses masuk ke tahap pengolahan di ANSYS, dimulai dengan penginputan data material melalui ANSYS Workbench (Engineering Data), di mana properti mekanik material seperti modulus elastisitas, poisson ratio, dan densitas. Kemudian desain material komposit dengan membuat geometri untuk dapat diinput pada materialnya dilakukan kombinasi antara serat alam dan matriks.



Gambar 3.1. Alur dari wraith hand orthosis, spesimen uji tarik, unit cell.

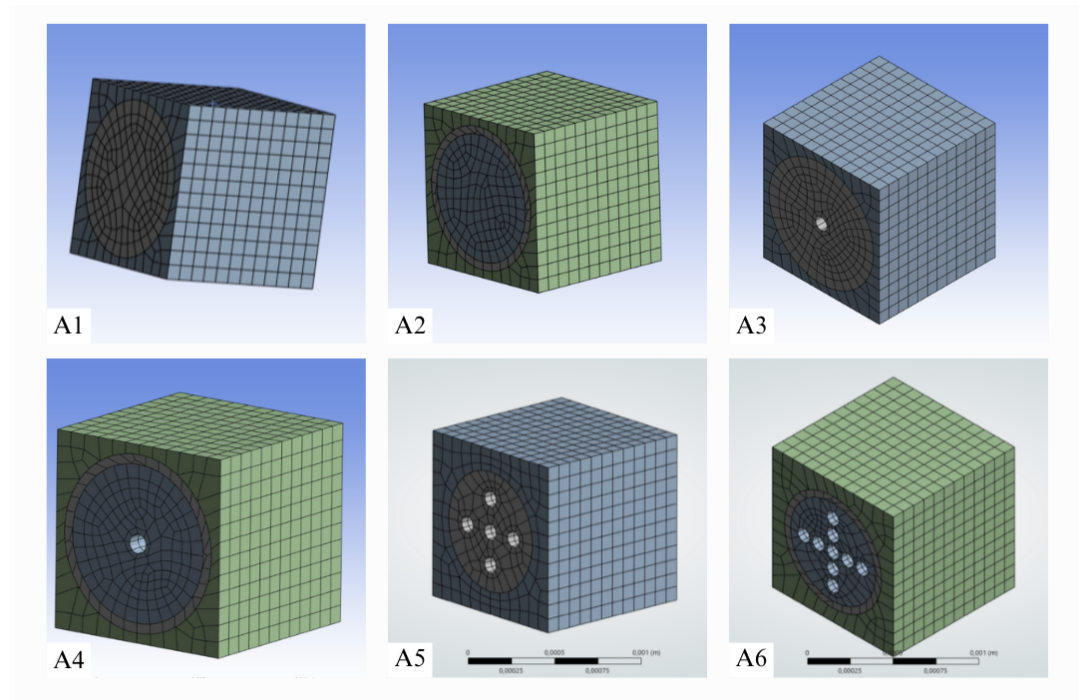
Model yang sudah siap kemudian disimulasikan dalam Ansys Mechanical dengan metode simulasi statik untuk mendapatkan distribusi tegangan dan regangan akibat pembebanan tarik. Hasil dari simulasi ini kemudian dianalisis pada tahap analisa hasil, untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum, regangan maksimum, serta pola distribusi tegangan. Tahap berikutnya adalah validasi dengan data eksperimen, di mana hasil simulasi dibandingkan dengan data dari penelitian sebelumnya untuk memastikan keakuratan model. Jika hasil simulasi telah divalidasi, maka penelitian dinyatakan selesai, dan kesimpulan disusun berdasarkan keseluruhan proses tersebut. Hasil simulasi kemudian divalidasi dengan data eksperimen atau referensi sebelumnya. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada



Gambar 3.2. Diagram Alir

B. Desain Model 3D Printing Komposit

Desain model dibuat menggunakan perangkat lunak Computer-Aided Design (CAD). Model ini mencerminkan bentuk dari struktur spesimen uji tarik yang akan dianalisis. Komposit yang digunakan terdiri dari matriks PLA dan serat alam TKKS dengan variasi fraksi volume sesuai literatur.



Gambar 3.3. Model RVE, A1 dan A2, merepresentasikan serat padat tanpa rongga atau lumen, A3 dan A4 mencakup satu lumen, sedangkan A5 dan A6 merepresentasikan serat dengan banyak rongga dan satu lumen.

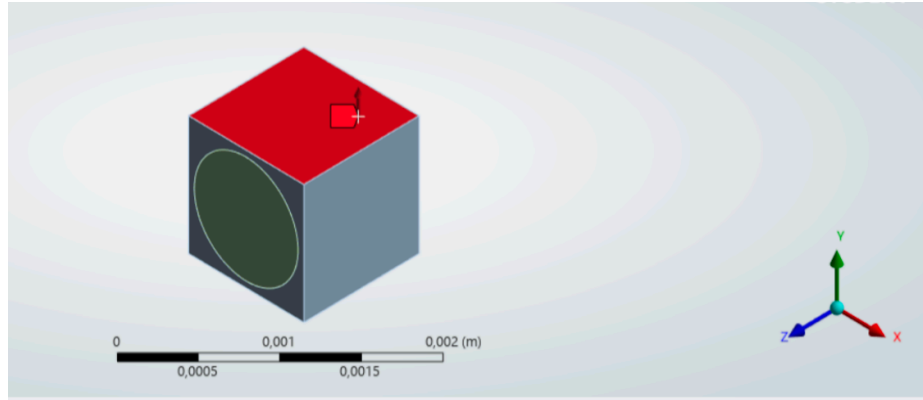
C. Parameter dan Variabel yang Digunakan

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa parameter dan variabel yang diamati, antara lain:

Parameter Material Jenis material yang digunakan meliputi:

- Matriks: Polylactic Acid (PLA) bersifat termoplastik, biodegradable, dan memiliki modulus elastisitas yang baik dibandingkan polimer alami lainnya.

- Penguat: Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) memiliki kandungan selulosa tinggi yang meningkatkan kekakuan dan kekuatan tarik komposit.



Gambar 3.4. Kondisi Batas dan Pembebanan

- Simulasi dilakukan dengan menerapkan kondisi batas (boundary conditions) pada model Representative Volume Element (RVE). Seperti diilustrasikan pada Gambar 3.4, sisi Y negatif RVE diberikan tumpuan jepit (Fixed Support) untuk menahan derajat kebebasan, sedangkan sisi atas diberikan beban tarik (Force) searah sumbu Y positif 0.3-1.5 N Secara bertahap dalam 5 step. Pembebanan ini mensimulasikan uji tarik uniaksial untuk mendapatkan respon tegangan-regangan material.

Tabel 3.1. Properties dari material

Parameter	TKKS	PLA
Density	1.1 – 1.4 g/cm ³	1.24 – 1.25 g/cm ³
ν	0.2 - 0.3	0.33 - 0.37
E	1.074 GPa	0.145 GPa

Beberapa variabel yang dimanipulasi dalam simulasi meliputi:

- Fraksi volume serat: bervariasi untuk melihat pengaruh jumlah serat terhadap sifat mekanik komposit.
- Diameter serat: variasi ukuran serat digunakan untuk menganalisis pengaruh geometri serat terhadap distribusi tegangan.
- Modulus antarmuka: menggambarkan kekakuan interaksi antara serat dan matriks, memengaruhi transfer beban antar-fase.
- Gaya pembebanan (F): gaya tarik diterapkan pada sisi ujung model dan satu sisi model dijepit (fixed support)
- Meshing quad dominant (segi empat dominan) dengan Sweep method, menghasilkan elemen campuran antara segi empat, segitiga, dan tetrahedral, dengan jumlah elemen mulai dari 2.754 - 4.090 dan jumlah node di 10.438-23.506

- Kehadiran lumen/hollow pada serat: digunakan untuk mengevaluasi efek struktur internal terhadap deformasi total dan regangan ekuivalen.

Respon utama yang diamati dari simulasi elemen hingga adalah:

- Total Deformation (m), menunjukkan perpindahan total akibat pembebanan.
- Equivalent Stress (MPa), menunjukkan tegangan ekuivalen yang merepresentasikan kondisi tegangan maksimum yang dialami material.
- Equivalent Strain (-) – menunjukkan distribusi regangan ekuivalen akibat pembebanan.

Hasil dari variasi parameter ini digunakan untuk menentukan pengaruh geometri serat, fraksi volume, dan modulus antarmuka terhadap perilaku mekanik komposit unit cell PLA–TKKS, serta sebagai dasar untuk validasi model simulasi terhadap hasil eksperimen atau literatur sebelumnya.

Tabel 3.2. Parameter rekayasa simulasi

Kasus	Variabel	Range
Diameter serat berubah	Diameter	0.9-0.375
Modulus Interfase Berubah	Modulus	800MPa-335MPa

Diameter serat berubah (lumen)	Diameter & Lumen	0.9-0.375
Modulus Interfase Berubah (lumen)	Modulus & Lumen	800MPa-335MPa
Diameter serat berubah (hollows)	Diameter & Hollows	0.9-0.375
Modulus Interfase Berubah (hollows)	Modulus & Hollows	800MPa-335MPa

Tabel 3.3. Pengaruh Diameter Serat Terhadap Hasil Simulasi

Diameter Serat	Total Deformation	Equivalent Strain	Equivalent Stress
0.900			
0.725			
0.550			
0.375			

Tabel 3.4. Pengaruh Modulus Interfase Terhadap Hasil Simulasi

Modulus Interfase	Total Deformation	Equivalent Strain	Equivalent Stress
800 MPa			
600 MPa			
450 MPa			
335 MPa			

Tabel 3.5. Pengaruh Diameter Serat Berlubang Terhadap Hasil Simulasi

Diameter Serat	Total Deformation	Equivalent Strain	Equivalent Stress
0.900			
0.725			
0.550			
0.375			

Tabel 3.6. Pengaruh Modulus Interfase Serat Berlubang Terhadap Hasil

Simulasi

Modulus interfase	Total Deformation	Equivalent Strain	Equivalent Stress
800 MPa			
600 MPa			
450 MPa			
335 MPa			

Tabel 3.7. Pengaruh Diameter Serat Berlubang-lubang Terhadap Hasil

Simulasi

Diameter Serat	Total Deformation	Equivalent Strain	Equivalent Stress
0.900			

0.725			
0.550			
0.375			

Tabel 3.8. Pengaruh Modulus Interfase Serat Berlubang-lubang Terhadap Hasil Simulasi

Modulus Interfase	Total Deformation	Equivalent Strain	Equivalent Stress
800 MPa			
600 MPa			
450 MPa			
335 MPa			

D. Simulasi di ANSYS

Tahapan simulasi dilakukan secara sistematis dengan beberapa sub bagian berikut:

- Ansys Workbench (Engineering Data) Pada tahap ini, data material dimasukkan ke dalam Engineering Data untuk menetapkan sifat mekanik dari komposit.
- Material Desain (Ansys Material Designer) Selanjutnya dilakukan definisi material komposit dengan menggabungkan matriks resin dan serat alam menggunakan Material Designer.
- Desain Model (Design Modular/Discovery) Model spesimen dibuat menggunakan modul desain dengan dimensi mengacu pada model struktur.
- Simulasi Static (Ansys Mechanical) Model dianalisis menggunakan simulasi statis dengan menerapkan beban dan kondisi batas untuk mendapatkan hasil tegangan, regangan, dan pola distribusi.
- Analisa Hasil Hasil simulasi dianalisis untuk memahami perilaku mekanik komposit yang disimulasikan.

Setelah tahapan pada simulasi di Ansys selesai kita akan memvalidasi hasil tersebut ke modul eksperimental

E. Validasi Model

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data eksperimen dari jurnal terkait atau penelitian terdahulu. Parameter yang dibandingkan meliputi kekuatan tarik maksimum, regangan maksimum, dan pola distribusi tegangan. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi numerik pada komposit serat alam dengan data eksperimen yang sudah ada.

Jika terdapat perbedaan yang signifikan antara hasil simulasi dan data eksperimen, maka dilakukan penyesuaian parameter material (misalnya modulus elastisitas atau Poisson's ratio) dan perbaikan mesh hingga hasil simulasi mendekati data eksperimen. Langkah-langkah ini memastikan bahwa model simulasi yang digunakan benar-benar merepresentasikan perilaku material secara akurat sebelum digunakan untuk pengembangan desain komposit serat alam.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi, analisis, dan validasi yang telah dilakukan terhadap model *unit cell* komposit serat alam berbasis Polylactic Acid (PLA) dan serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pengaruh Geometri Serat

Variasi diameter serat menunjukkan pengaruh signifikan terhadap perilaku mekanik komposit. Semakin kecil diameter serat, nilai *total deformation* dan *equivalent strain* meningkat, menandakan peningkatan fleksibilitas material, namun diikuti oleh kenaikan *equivalent stress* akibat konsentrasi tegangan yang lebih besar di sekitar antarmuka. Hal ini mengindikasikan perlunya kompromi antara kekakuan dan deformasi untuk mencapai performa optimum.

2. Pengaruh Modulus Antarmuka (Interfase)

Modulus antarmuka yang tinggi (600–800 MPa) menghasilkan deformasi total yang lebih kecil dan distribusi tegangan yang lebih merata. Penurunan modulus hingga 335 MPa menyebabkan peningkatan deformasi dan ketidakseimbangan

transfer beban antara matriks dan serat. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas ikatan antar fase sangat menentukan kemampuan komposit dalam menahan beban eksternal.

3. Validasi Model Simulasi

Berdasarkan hasil validasi terhadap data eksperimen, Model A6 (serat dengan struktur berongga majemuk) dengan modulus antarmuka 800 MPa terbukti menjadi model yang paling akurat. Model ini menghasilkan nilai tegangan von Mises sebesar 12.49 MPa, yang sangat mendekati nilai kekuatan tarik eksperimen sebesar 12.46 MPa dengan deviasi hanya 0.24%. Hal ini mengonfirmasi bahwa representasi fitur mikroskopis lumen pada serat TKKS sangat krusial untuk meningkatkan presisi prediksi perilaku mekanik komposit pada simulasi elemen hingga

B. SARAN

Sebagai tindak lanjut dan pengembangan dari penelitian ini, beberapa saran dapat diajukan:

1. Pengujian Eksperimental Lebih Lanjut

Diperlukan pengujian eksperimental langsung terhadap spesimen komposit PLA–TKKS hasil cetak 3D dengan variasi orientasi serat dan fraksi volume yang sama seperti pada simulasi, untuk memperkuat validitas model numerik.

2. Integrasi Desain Orthosis Adaptif

Perlu dikembangkan desain orthosis berbasis *parametric modeling* agar hasil simulasi dapat langsung diterapkan pada model 3D printing yang dipersonalisasi sesuai anatomi tangan pasien.

3. Optimasi Parameter Proses 3D Printing

Pengaruh orientasi cetak, kecepatan pencetakan, dan suhu ekstrusi terhadap sifat mekanik komposit perlu dikaji, mengingat faktor-faktor ini dapat memengaruhi kualitas antarmuka serat–matriks.

4. Eksplorasi Serat Alam Lain

Penelitian serupa dapat dilakukan menggunakan jenis serat alam lain seperti serat bambu, sisal, atau rami untuk membandingkan sifat mekanik dan biokompatibilitasnya sebagai alternatif bahan orthosis berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Wahab, N. A. A., Shukri, N., Jaafar, M., Che Hassan, N. H., & Sanz, R. G. (2025). Oil palm empty fruit bunch reinforced laminated composites: Effect of different recycled plastic and matrix composition. *Polymer Bulletin*, 82(9), 3823–3839. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05692-9>
- Baronio, G., Volonghi, P., & Signoroni, A. (2017). Concept and Design of a 3D Printed Support to Assist Hand Scanning for the Realization of Customized Orthosis. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2017, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2017/8171520>
- Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. ASM international.
- Chimonides, M. A., Donnachie, D. J., Bodansky, D. M. S., & Leventis, P. E. (2025). Metacarpal cortical percentage predicts bone density and osteoporotic fracture incidence in inflammatory arthropathy patients: A retrospective cohort study. *Archives of Osteoporosis*, 20(1), 59. <https://doi.org/10.1007/s11657-025-01552-1>
- D20 Committee. (n.d.-a). *Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1622-20>
- D20 Committee. (n.d.-b). *Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>

- Diana, L., Safitra, A. G., & Ariansyah, M. N. (2020). Analisis Kekuatan Tarik pada Material Komposit dengan Serat Penguat Polimer. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, Dan Material*, 4.
- Dubey, N. K., & Gangwar, S. (2021). Comparative Analysis of Different Composites for Ankle Foot Orthosis: A Review. In B. P. Sharma, G. S. Rao, S. Gupta, P. Gupta, & A. Prasad (Eds.), *Advances in Engineering Materials* (pp. 305–317). Springer Singapore.
- E28 Committee. (n.d.). *Test Method for Poissons Ratio at Room Temperature*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0132-17>
- Eko Setiawan, Ahmad Zamheri, & Mardiana. (2025). *Analisa Simulasi Pada Kekuatan Material Mini Boiler Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA)*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.15234205>
- Emzain, Z. F., Qosim, N., Mufarrih, Am., Herlambang, Y. D., & Arifin, F. (2023). Desain dan Analisis Elemen Hingga Model Wrist Hand Orthosis Berbasis Metode Pemodelan Reverse Engineering. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 18(1), 19. <https://doi.org/10.32497/jrm.v18i1.3936>
- Fikri, M. L. S., Zaenudin, M. Z., Ujjianto, O., & Mahfud, I. (2024). Mechanical Properties Analysis of Composites (PLA, Chitosan and Calcium Prosphate) for bone implants. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 13(2). <https://doi.org/10.24127/trb.v13i2.3833>
- Hastuti, S., Budiono, H. S., Ivadiyanto, D. I., & Nahar, M. N. (2021). Peningkatan Sifat Mekanik Komposit Serat Alam Limbah Sabut Kelapa (Cocofiber) yang Biodegradable. *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, 6(1),

30–37. <https://doi.org/10.33366/rekabuana.v6i1.2257>

Hidalgo-Salazar, M. A., Correa-Aguirre, J. P., Román, A. J., Gonzalez, R., Vera, R., & Osswald, T. A. (2025). Colombian natural fibers: Potential applications in sustainable natural fiber reinforced composites materials. *Polymer Composites*, 46(6), 5599–5617. <https://doi.org/10.1002/pc.29313>

Imron, J. (2025). Analisis Desain dan Keandalan Bejana Bertekanan pada Industri Energi Pendekatan Numerik dan Eksperimental. *JURAL Riset Rumpun Ilmu TEKNIK*, 4(1), 48–59. <https://doi.org/10.55606/jurritek.v4i1.4474>

Ismail, I., Mutiara, D., Rahwanto, A., Jalil, Z., Fathmiyah, S., & Sheikh Md Fadzullah, S. H. (2025). Effect of Filler Size on the Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunch High-Load Filler Biocomposite. *Trends in Sciences*, 22(4), 9374. <https://doi.org/10.48048/tis.2025.9374>

Jones, O. (2018). The Bones of the Hand: Carpals, Metacarpals and Phalanges. *TeachMe Anatomy*. <https://teachmeanatomy.info/upper-limb/bones/hand/#section-68304dc67b1c3>

Kampeerapappun, P., Desclaux, S., Rattanapinyopituk, K., Srisuk, T., & Hemstapat, R. (2025). Natural cellulose fibers derived from *Dracaena angolensis* (Welw. Ex Carrière) Byng & Christenh. Demonstrate potential as a non-absorbable surgical suture biomaterial. *Scientific Reports*, 15(1), 1291. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85886-3>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. https://books.google.co.id/books?hl=en&lr=&id=bnN_DwAAQBAJ&oi=fnd&pg

=PP13&dq=What+a+waste+2.0:+a+global+snapshot+of+solid+waste+managem
ent+to+2050&ots=faQfwq5_Nf&sig=67brjUzj0QXZILhi7frBO4E7aIc&redir_es
c=y#v=onepage&q=What%20a%20waste%202.0%3A%20a%20global%20snaps
hot%20of%20solid%20waste%20management%20to%202050&f=false

Koh, Y. (2023). *Metacarpal bones (Ossa metacarpi)*.

<https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/the-metacarpal-bones>

Krishnasamy, P., Mylsamy, G., G, R., Jeyanthi, S., & D, M. M. (2025). Acoustic, vibration, and viscoelastic performance of wire EDM waste-reinforced natural fiber composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 44(5–6), 233–244. <https://doi.org/10.1177/07316844231219316>

Kumar, D., Kumar, D., Amika, Singh, P., Singh, A. P., Goyal, P., & Jindal, P. (2025). Mechanical Behavior of PU/MWCNT Composite Materials Under Tensile Loading Conditions Using FEA. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 14(5), 051003. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/add623>

Lambi, A. G., Rowland, R. J., Brady, N. W., Rodriguez, D. E., & Mercer, D. M. (2023). Metacarpal fractures. *Journal of Hand Surgery (European Volume)*, 48(2_suppl), 42S-50S. <https://doi.org/10.1177/17531934231184119>

Li, X., Li, M., Zhang, F., Kong, F., Yang, D., Qu, W., & Ke, Y. (2025). A novel method for constructing 3D void RVE elements and rapid homogenization of composite materials. *Composite Structures*, 360, 119040. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.119040>

Liu, Z., Ge, J., He, C., Liu, C., Zhang, B., Liu, K., & Liang, J. (2024). A direct prediction method for 3D woven composites bending properties based on unit-cell

- finite element model. *Composites Science and Technology*, 248, 110474. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110474>
- M. Abdi Ruanda, Achmad Jusuf Zulfikar, Suardi, Mulia, & Din Aswan A. Ritonga. (2025). Numerical simulation and flexural strength analysis of jute/epoxy laminated composites using ANSYS workbench. *JTTM : Jurnal Terapan Teknik Mesin*, 6(1), 152–158. <https://doi.org/10.37373/jttm.v6i1.1563>
- Manap, M. F. bin A., Shuib, S., & Romli, A. Z. (2024). Finite Element Analysis (FEA) Static Structural Analysis. In *Total Hip Replacement (THR): Effect of Inclination and Anteversion Angle on the Performance of Epoxy-UHMWPE Acetabular Cup* (pp. 67–77). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-0975-8_7
- Manurung, S. X., Sinuhaji, P., & Syukur, M. (2013). Pembuatan Dan Karakterisasi Komposit Serat Palem Saray Dengan Matriks Poliester. *Departemen Fisika FMIPA Universitas Sumatera Utara Medan*.
- Marpaung, S. (2025). *Simulasi Numerik Dan Analisis Kekuatan Tarik Belah Komposit Laminat Jute/Epoksi Dengan Ansys Workbench 2022*.
- Muhalim, D., Liza, S., Fukuda, K., Mat Tahir, N. A., & Yaakob, Y. (2025). Tribological Performance of Self-Lubricating Polyoxymethylene Composite Reinforced with Chemically Treated Oil Palm Empty Fruit Bunch Fibers for Bearing Application. *Fibers and Polymers*. <https://doi.org/10.1007/s12221-025-00980-7>
- Nagammal, V. S., Chelladurai, S. J. S., Pari, S. A., Sundarabai, J. A. K., Mani, M., & Bosco, infant J. R. A. J. (2025). *Manufacturing Strategies and Systems* (1st

Edition). <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781032725086-4/analysing-mechanical-behaviour-lm26-zrb2-composite-using-finite-element-modelling-fem-vijayan-singarajan-nagammal-samson-jerold-samuel-chelladurai-saiyathibrahim-abdul-pari-jai-aultrin-kamalan-sundarabai-makeshkumar-mani-infant-jegan-rakesh-antony-john-bosco>

Nayiroh, N. (2013). *Teknologi Material Komposit*.

Nsanzumuhire, C., Daramola, O. O., Oladele, I. O., & Akinwekomi, A. D. (2025).

Review of current progress on additive manufacturing of medical implants and natural/synthetic fibre reinforced composites. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 56(1), 17–42. <https://doi.org/10.1002/mawe.202400070>

Oyewo, A., Ajide, O., Odusote, J., Adefajo, A., & Fakorede, D. (2019). A Review of Woven Natural Fibre Composite for Spiral Ankle Foot Orthosis. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 749.

Punia Bangar, S., R.A., I., Chaudhary, N., Dhull, S. B., Chowdhury, A., & Lorenzo, J. M. (2023). Plant-Based Natural Fibers For Food Packaging: A Green Approach To The Reinforcement of Biopolymers. *Journal of Polymers and the Environment*, 31. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02849-3>

Putranto, M. N., Yamin, M., & Permana, S. (2025). *Studi Numerik Pengaruh Flutter Pada Sirip Roket Berbahan Material Bio-komposit*.

Rajak, D. K., Wagh, P. H., & Linul, E. (2022). A Review on Synthetic Fibers for Polymer Matrix Composites: Performance, Failure Modes and Applications. *Materials*, 15(14), 4790. <https://doi.org/10.3390/ma15144790>

- Rasyid, H. A. (2019). Simulasi Kekuatan Material Komposit Banana Fiber. *JURNAL AUSTENIT*, 11. <https://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=1532847&val=4007&title=SIMULASI%20KEKUATAN%20MATERIAL%20KOMPOSIT%20BANANA%20FIBER>
- Rollastin, B., Juanda, Oktriadi, Y., & Rahmatullah, G. M. (2023). *Analisis Simulasi Pengaruh Kekuatan Material Komposit Paduan HGM dan Serat Alami terhadap Kekuatan Uji Balistik*. 7, 7. <https://doi.org/10.32528/jp.v7i2.11474>
- Roy, S., & Rhim, J.-W. (2020). Preparation of bioactive functional poly(lactic acid)/curcumin composite film for food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 1780–1789. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.094>
- Savetlana, S., Andriyanto, A., Brojonegoro, J. S., & Lampung, B. (2012). *Sifat-sifat Mekanik Komposit Serat TKKS-Poliester*. 3.
- Savetlana, S., Mulvaney-Johnson, L., Gough, T., & Kelly, A. (2018). Properties of nylon-6-based composite reinforced with coconut shell particles and empty fruit bunch fibres. *Plastics, Rubber and Composites*, 47(2), 77–86. <https://doi.org/10.1080/14658011.2017.1418711>
- Selvaraj, S., Kumar, M. S., Makesh Kumar, M., Sivanantham, G., Loganathan, P., Gopinathan, M., & Nirmalsagayaraja, R. (2025). 2—Recent developments in natural and synthetic fibers, polymers, and their composites. In R. Lakshminarasimhan, S. K. Palaniappan, R. Manickam, S. M. Rangappa, & S. Siengchin (Eds.), *Surface Modification and Coating of Fibers, Polymers, and*

- Composites* (pp. 19–41). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22029-6.00002-2>
- Sethy, D. P., & Sahoo, S. (2025). A comprehensive review on different leaf fiber loading on PLA polymer matrix composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 38(3), 1231–1256. <https://doi.org/10.1177/08927057241268832>
- Setiawan, D. B. (2020). Simulasi Delaminasi pada Komposit Glass Fiber-reinforced Polymer (GFRP) dan Carbon Fiber-reinforced Polymer Menggunakan Metode Cohesive Zone Model (CZM) dan Virtual Crack Closure Technique (VCCT). *Jurnal Teknik ITS*. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i1.50322>
- Shahar, F. S., Sultan, M. T. H., Lee, S. H., Jawaid, M., Shah, A. U. M., Safri, S. N. A., & Sivasankaran, P. N. (2019). A review on the orthotics and prosthetics and the potential of kenaf composites as alternative materials for ankle-foot orthosis. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 99, 169–185. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.07.020>
- Shaikh, A. M., & Kubade, P. R. (2025). Explicit Dynamic Analysis of Polypropylene Layered with Graphene and Hexagonal Boron Nitride Nanocomposites using ANSYS. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 106(3), 783–794. <https://doi.org/10.1007/s40032-025-01180-1>
- Siagian, D. E. N., & Putra, M. H. S. (2024). Serat Alam Sebagai Bahan Komposit Ramah Lingkungan. *Jurnal Nasional UMP*, 5.
- Siregar, M. I. A. (2024). *Teknologi 3D Printing dalam Rekayasa Mesin: Peluang dan Tantangan*.
- Skosana, S. J., Khoathane, C., & Malwela, T. (2025). Driving towards sustainability:

- A review of natural fiber reinforced polymer composites for eco-friendly automotive light-weighting. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 38(2), 754–780. <https://doi.org/10.1177/08927057241254324>
- Standring, S. (2016). *Gray's Anatomy* (41st Edition). Elsevier Churchill Livingstone. <https://shop.elsevier.com/books/grays-anatomy/standring/978-0-7020-5230-9>
- Subbuvel, M., & Kavan, P. (2022). Preparation and characterization of polylactic acid/fenugreek essential oil/curcumin composite films for food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 194, 470–483. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.090>
- Sukoco, L. P., Tohom, F., & Pranoto, E. (2025). *Optimalisasi Material Dan Profile Reinforcement Beam Guna Meningkatkan Energi Serap Benturan Berbasis Simulasi FEM*. 16(1).
- Sulardjaka, S., Nugroho, S., & Ismail, R. (2020). *Peningkatan Kekuatan Sifat Mekanis Komposit Serat Alam menggunakan Serat Enceng Gondok*. <https://doi.org/10.14710/teknik.v41i1.23473>
- Supriadi, H., Savetlana, S., & Gultom, F. (2014). *Pengaruh Perlakuan Alkali terhadap Kekuatan Tarik Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk Digunakan pada Komposit Serat Tkks*. 5.
- Syduzzaman, M., Al Faruque, M. A., Bilisik, K., & Naebe, M. (2020). Plant-Based Natural Fibre Reinforced Composites: A Review on Fabrication, Properties and Applications. *Coatings*, 10(10), 973. <https://doi.org/10.3390/coatings10100973>
- Vikhe, C. S., Daga, S. S., & Ramteke, S. U. (2024). Advancements in Metacarpal Fracture Management: A Narrative Review of Rehabilitative Strategies. *Cureus*.

<https://doi.org/10.7759/cureus.69970>

- Wetzel, P., Schneider, B., Sambale, A. K., Stommel, M., & Kaiser, J.-M. (2025). RVE Simulations of short fiber reinforced polyamide: Direct and inverse matrix parameter identification in view of the semi-crystalline polymer structure. *Composites Science and Technology*, 260, 110961. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110961>
- Winterbottom, L., Chen, A., Mendonca, R., Nilsen, D. M., Ciocarlie, M., & and, J. S. (2025). Clinician perceptions of a novel wearable robotic hand orthosis for post-stroke hemiparesis. *Disability and Rehabilitation*, 47(6), 1577–1586. <https://doi.org/10.1080/09638288.2024.2375056>
- Yang, Y.-C., Gou, J.-J., Gong, C.-L., Sun, Y.-E., & Li, S. (2025). A multi-scale uncertainty quantification model encompassing minimum-size unit cells for effective properties of plain woven composites. *Composite Structures*, 352, 118648. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118648>