

BAB II

DASAR TEORI

2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Polylactic Acid (PLA) adalah polimer termoplastik yang banyak digunakan sebagai filamen dalam proses pencetakan 3D tipe FDM karena memiliki titik leleh rendah, *viskositas* cetak yang baik, sifat mekanik layak, serta kemampuan adhesi antar lapisan yang relatif stabil. Material ini secara kimia memiliki struktur dasar polyester yang dapat dicetak berlapis-lapis melalui proses pencetakan 3D. Banyak penelitian telah meneliti sifat mekanik PLA hasil pencetakan 3D melalui pengujian tarik untuk memperoleh parameter seperti *ultimate tensile strength*, *yield strength*, dan *modulus* elastisitas, umumnya mengikuti standar ASTM D638 [1][2]. Faktor-faktor proses pencetakan seperti densitas pengisian (*infill density*), pola jalur cetak, orientasi, dan suhu nozzle terbukti mempengaruhi kekuatan tarik PLA secara signifikan [1][2]. Sebagian besar studi fokus pada optimasi parameter proses menggunakan metode eksperimental atau analisis statistik, namun hanya sedikit yang mengintegrasikan hasil eksperimen dengan simulasi numerik secara langsung [3].

2.1.1 Simulasi Numerik Tegangan Tarik PLA dengan FEA

Sejumlah penelitian telah mulai menggunakan simulasi numerik berbasis FEA untuk memodelkan perilaku PLA terhadap pembebanan tarik [3]. memvalidasi model FEA terhadap data uji tarik, sehingga hasil simulasi dapat merepresentasikan perilaku nyata spesimen [4]. memanfaatkan *Digital Image Correlation* (DIC) yang dipadukan dengan FEA untuk memetakan distribusi tegangan, regangan, dan titik awal kerusakan

pada spesimen PLA dengan berbagai orientasi raster[5]. mengembangkan model FEA *non-linear* untuk PLA di bawah pembebanan tarik dan tekan, namun model ini masih terbatas pada pengujian parameter proses dan kondisi batas tertentu.

2.1.2 Keterbatasan Studi *Eksisting* dan Gap Penelitian

Walaupun banyak studi telah memanfaatkan FEA untuk uji tarik PLA, terdapat beberapa keterbatasan:

1. Model *Non-linear* Belum Terstandarisasi

Model *non-linear* yang dikembangkan [5]. mampu memprediksi kurva *stress-strain* dengan baik, tetapi belum diuji secara luas terhadap variasi parameter cetak atau kondisi batas berbeda dari pengaturan *eksperimen* awal.

2. Analisis Variasi Parameter Proses yang Terbatas

Simulasi FEA biasanya divalidasi hanya pada satu set data eksperimen, sehingga pengaruh *infill density*, orientasi jalur cetak, atau variasi geometri jarang dianalisis secara komprehensif [4][5]. Padahal penelitian eksperimental menunjukkan parameter tersebut berperan penting terhadap kekuatan tarik PLA [1][2].

3. Integrasi Eksperimen dan Numerik Masih Jarang

Pendekatan hybrid yang menggabungkan FEA dengan metode statistik atau *machine learning* masih sangat terbatas [6], menunjukkan peluang untuk pengembangan model prediktif yang lebih canggih.

4. Keterbatasan Perangkat Lunak dan Material Model

Mayoritas simulasi FEA menggunakan *software* seperti Abaqus atau SolidWorks, sementara validasi model tegangan tarik PLA menggunakan NASTRAN masih jarang dilaporkan [7].

2.1.3 Relevansi Gap Penelitian terhadap Penelitian Anda

1. Berdasarkan analisis di atas, penelitian ini bertujuan mengisi beberapa celah yang ada:

2. Validasi FEA pada NASTRAN

Memanfaatkan NASTRAN sebagai *platform* simulasi untuk memvalidasi model PLA, karena sebagian besar studi sebelumnya menggunakan *software* lain [7].

3. Analisis Parameter Proses melalui Model *Numerik*

Mengintegrasikan data uji tarik dari variasi parameter pencetakan seperti *infill density*, orientasi, dan suhu ke dalam FEA untuk memprediksi perilaku material secara kuantitatif [5][7].

4. Pengembangan Material Model PLA yang Akurat

Menyusun model material non-linear berdasarkan data eksperimen untuk memetakan perilaku elastis-plastis dan titik leleh PLA [5].

5. Perbandingan Eksperimen vs Simulasi untuk Berbagai Kondisi

Memberikan validasi menyeluruh terhadap model FEA untuk beragam kondisi percobaan dan *boundary condition*, sehingga hasil simulasi dapat lebih dapat diandalkan [5][7].

2.2 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method* / FEM)

Metode elemen hingga adalah teknik numerik untuk menyelesaikan masalah rekayasa dengan cara membagi suatu benda menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*). Setiap elemen memiliki sifat material dan hubungan matematis untuk menghitung tegangan dan regangan.

Langkah umum simulasi FEA:

- Pembuatan model geometri spesimen
- Pemberian sifat material (E , ν , kekuatan tarik)
- Penerapan *boundary condition* dan pembebanan
- Proses *meshing* dan *solving*
- Analisis hasil (tegangan, regangan, deformasi)

2.3 Apa Itu FEA (*Finite Element Analysis*)

Finite Element Analysis (FEA) **atau** Metode Elemen Hingga (MEH) adalah metode numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku struktur atau material terhadap pembebanan dengan cara membagi objek kontinu menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*).

Dalam FEA, struktur dipecah menjadi elemen diskrit yang saling terhubung melalui node, kemudian persamaan keseimbangan diselesaikan secara numerik untuk memperoleh:

- Distribusi tegangan (*stress*)
- Regangan (*strain*)
- Perpindahan (*displacement*)

- Faktor keamanan

Secara matematis, FEA didasarkan pada persamaan dasar mekanika kontinum:

- Persamaan keseimbangan
- Hubungan tegangan–regangan (Hukum *Hooke* untuk material *elastis*)
- Persamaan kompatibilitas

Metode ini banyak digunakan dalam analisis material seperti *Polylactic Acid (PLA)* terutama untuk simulasi uji tarik dan bending sebelum dilakukan pengujian eksperimental.

2.4 Mengapa FEA Perlu Dilakukan

FEA penting dilakukan karena beberapa alasan berikut:

1. Menghemat Waktu dan Biaya

Simulasi numerik memungkinkan prediksi perilaku material tanpa harus langsung melakukan banyak pengujian fisik yang memerlukan biaya dan waktu besar.

2. Mengetahui Distribusi Tegangan Secara Detail

Pengujian eksperimen hanya memberikan nilai global (misalnya tegangan maksimum), sedangkan FEA dapat menunjukkan distribusi tegangan di seluruh bagian spesimen, termasuk area konsentrasi tegangan.

3. Memprediksi Kegagalan Material

FEA dapat memperkirakan lokasi dan kondisi kegagalan sebelum material benar-benar diuji.

4. Validasi dan Perbandingan

Hasil FEA dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk mengetahui tingkat akurasi model numerik.

5. Analisis Parameter Desain

FEA memungkinkan variasi parameter seperti:

- Dimensi spesimen
- Beban
- Sifat material
- Kondisi batas

tanpa harus membuat spesimen baru setiap kali pengujian.

2.5 Teori Kegagalan Material

Teori kegagalan digunakan untuk memprediksi kapan suatu material akan mengalami kerusakan akibat tegangan yang bekerja.

2.5.1 Teori Tegangan Normal *Maksimum*

Teori ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi ketika tegangan normal maksimum (σ_1) mencapai atau melebihi tegangan tarik *maksimum* material.

$$\sigma_{maks} \geq \sigma_{ult}$$

Cocok digunakan untuk material [8]. getas seperti PLA, karena PLA cenderung patah tanpa deformasi plastis besar [9].

2.5.2 Teori Regangan Normal *Maksimum*

Kegagalan terjadi ketika regangan maksimum melampaui batas regangan izin material.

$$\varepsilon_{maks} \geq \varepsilon_{ult}$$

Digunakan untuk analisis deformasi elastis

2.5.3 Teori Energi *Distorsi (Von Mises Theory)*

Teori ini menyatakan kegagalan terjadi ketika energi *distorsi* mencapai nilai tertentu yang setara dengan kondisi tarik *uniaxial* [11] [12].

$$\sigma_{von\ mises} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Jika:

$$\sigma_{von\ mises} \geq \sigma_y$$

maka material mengalami kegagalan.

Teori *Von Mises* banyak digunakan dalam FEA karena cocok untuk material daktail, namun tetap sering dipakai dalam analisis numerik material polimer untuk melihat konsentrasi tegangan [13].

2.5.4 Teori *Mohr-Coulomb* (Untuk Material Getas)

Material getas seperti PLA dapat dianalisis menggunakan pendekatan tegangan utama maksimum (*Principal Stress Theory*), karena kegagalan biasanya terjadi akibat tegangan tarik maksimum.

2.6 Hubungan FEA dengan Teori Kegagalan

Dalam analisis menggunakan FEA:

1. Model diberikan pembebanan (tarik atau bending).
2. Program menghitung distribusi tegangan.
3. Nilai tegangan maksimum dibandingkan dengan:
 - Tegangan luluh (σ_y)
 - Tegangan *ultimit* (σ_u)

4. Jika tegangan hasil simulasi melebihi batas tersebut, maka diprediksi terjadi kegagalan.

Dengan demikian, teori kegagalan menjadi dasar interpretasi hasil FEA.

2.7 Teori Uji Tarik (*Tensile Test*)

Pengujian tarik merupakan metode untuk menentukan sifat mekanik material akibat pembebanan tarik satu arah hingga terjadi deformasi dan patah. Standar yang umum digunakan untuk pengujian tarik material polimer adalah ASTM D638 yang diterbitkan oleh ASTM International [14].

Melalui pengujian ini diperoleh parameter penting seperti tegangan luluh (*yield strength*), tegangan maksimum (*ultimate tensile strength*), regangan maksimum, serta modulus elastisitas. Sifat mekanik PLA, termasuk *tensile strength* dan modulus elastisitasnya, telah banyak diteliti melalui pendekatan eksperimental maupun numerik [10][15].

2.7.1 Tujuan Uji Tarik

- Menentukan tegangan luluh (*yield strength*)
- Menentukan tegangan maksimum (*ultimate tensile strength*)
- Menentukan regangan maksimum dan *modulus* elastisitas
- Mengetahui sifat keuletan dan kekuatan material

2.7.2 Prinsip Pengujian

Spesimen uji ditarik menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kecepatan tertentu. Beban dan pertambahan panjang dicatat hingga spesimen mengalami patah.

Parameter Penting

- Tegangan (σ)

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

Keterangan:

σ = Tegangan tarik (MPa atau N/mm²)

F = Gaya tarik yang diberikan (N)

A = Luas penampang awal spesimen (mm²)

- Regangan (ϵ)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Keterangan:

ϵ = Regangan (tanpa satuan / mm/mm)

ΔL = Pertambahan panjang spesimen (mm)

L_0 = Panjang awal spesimen (mm)

- *Modulus Elastisitas (E)*

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Keterangan:

E = *Modulus elastisitas* (MPa atau GPa)

Σ = Tegangan pada daerah elastis (MPa)

ϵ = Regangan pada daerah elastis

Modulus elastisitas menunjukkan kekakuan material pada daerah elastis.

- *Tegangan Maksimum (Ultimate Tensile Strength / UTS)*

$$\sigma_{maks} = \frac{F_{maks}}{A}$$

Keterangan:

σ_{maks} = Tegangan maksimum (MPa)

F_{maks} = Gaya maksimum sebelum patah (N)

A = Luas penampang awal (mm²)

2.8 Teori Uji Bending (*Flexural Test*)

Uji bending atau uji lentur digunakan untuk mengetahui ketahanan material terhadap beban lentur, di mana terjadi kombinasi tegangan tarik dan tekan secara bersamaan pada spesimen. Pengujian lentur untuk material *polimer* umumnya mengacu pada standar ASTM D790 yang diterbitkan oleh ASTM International [16].

Analisis tegangan lentur pada material hasil cetak 3D, termasuk PLA, banyak dikaji untuk memahami distribusi tegangan serta karakteristik kegagalannya di bawah pembebanan lentur [15].

Jenis Uji Bending

1. *Three-Point Bending*

Beban diberikan di satu titik tengah.

2. *Four-Point Bending*

Beban diberikan di dua titik, menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata.

- Tujuan Uji Bending

1. Menentukan tegangan lentur maksimum
2. Menentukan modulus lentur
3. Menilai kekakuan dan ketahanan material terhadap pembebanan lentur

- Prinsip Pengujian

Spesimen diletakkan pada dua tumpuan dan diberi beban dari atas hingga terjadi deformasi atau patah.

- Rumus Tegangan Lentur (*Three-Point Bending*)

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2}$$

Keterangan:

F = gaya (N)

L = jarak tumpuan (mm)

b = lebar spesimen (mm)

d = tebal spesimen (mm)

- Regangan Lentur

$$\epsilon_f = \frac{6Db}{l^2}$$

Keterangan:

ϵ_f = Regangan lentur (mm/mm)

D = Defleksi maksimum di tengah spesimen (mm)

d = Tebal spesimen (mm)

L = Jarak tumpuan (mm)

- Modulus Elastisitas Lentur

$$E_f = \frac{l^3 m}{4bd^3}$$

Keterangan:

E_f = Modulus elastisitas lentur (MPa atau GPa)

L = Jarak tumpuan (mm)

b = Lebar spesimen (mm)

d = Tebal spesimen (mm)

m = Kemiringan (*slope*) kurva beban–defleksi pada daerah elastis (N/mm)

2.9 Hipotesis Penelitian

2.9.1 H_1 (Hipotesis Alternatif):

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) mampu memprediksi nilai tegangan tarik dan tegangan bending material *Polylactic Acid (PLA)* dengan tingkat akurasi yang mendekati hasil pengujian eksperimental.

2.9.2 H_0 (Hipotesis Nol):

Metode Elemen Hingga tidak mampu memprediksi nilai tegangan tarik dan tegangan bending material PLA dengan tingkat akurasi yang mendekati hasil pengujian eksperimental