

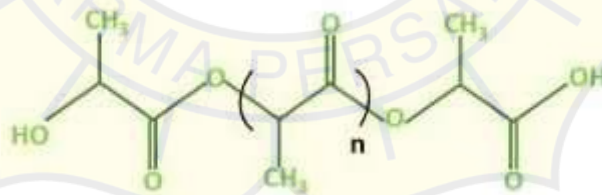
BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 *Polylactic Acid* (PLA)

Polylactic Acid (PLA) atau *poly-lactide* merupakan biopolimer yang bersifat ramah lingkungan, dapat diuraikan melalui proses komposit, dan mampu terdegradasi secara alami yang dihasilkan dari sumber daya yang dapat diperbaharui. PLA merupakan polimer yang memiliki struktur semi-kristalin dengan titik leleh 180°C [2]. Pada tahun 1932, Carothers memperkenalkan poliester alifatik yang berasal dari laktat. Di antara berbagai polimer yang berbasis bio, ini adalah biopolimer alifatik yang paling banyak diteliti, diaplikasikan, dan berasal dari sumber yang terbarukan[3].

Polylactic acid (PLA) memiliki struktur kimia yang dapat dilihat pada gambar 2.1 di bawah:



Gambar 2. 1 Struktur Kimia *Polylactid Acid* (PLA)

Sumber: [4]

Polylactic Acid (PLA) berasal dari monomer *Lactic Acid* (LA), yang juga dikenal dengan sebutan '*2-hydroxy propanoic acid*'. PLA merupakan salah satu jenis polimer yang tergolong dalam kategori komoditas yang dapat diperoleh

dari sumber terbarukan dan digunakan sebagai alternatif untuk bahan plastik yang ada saat ini[3].

Polylactic Acid (PLA) adalah jenis *polyester* termoplastik yang umum digunakan dalam dunia percetakan 3D. Keberadaan bahan ini yang berasal dari sumber yang dapat diperbaharui (seperti pati jagung, umbi-umbian atau tebu) sehingga menjadikannya plastik berbasis bio kedua terpopuler secara global, meskipun tidak tergolong sebagai polimer komoditas. Dalam industri pencetakan 3D, PLA merupakan filamen plastik yang paling unggul, khususnya pada metode *Fused Deposition Modelig* (FDM)[5].

Filamen PLA kerap dipilih sebagai material untuk pencetak 3D karena beberapa alasan seperti kemudahan dalam proses pembentukan, harga yang terjangkau, serta daya tahan yang cukup baik[6][7].

Polylactid Acid (PLA) memiliki sifat kimia seperti pada tabel 2.1

Tabel 2. 1 Sifat Fisik *Polylactid Acid* (PLA)[4]

Property	Values
Spesific Gravity	1-1.5
Surface Energy (dynes)	36-40
Melting Temperature (°C)	140-210
Molecular Weight (Daltons)	Approx. 1.6×10^5
Melt Flow Index (g/10 min)	4-22
Crystallinity (%)	5-35
Glass Transition Temperature (°C)	50-75
Solubility Parameters ($J^{0.5}/cm^{1.5}$)	21

Lebih lanjut, polimer PLA murni memiliki suhu transisi kaca yang lebih rendah (55-65°C) dibandingkan dengan polimer berbasis fosil lainnya. Hal ini berarti bahwa proses pengolahan dan pembentukan PLA membutuhkan energi yang lebih sedikit. Oleh karena itu, PLA menjadi salah satu *biopolymer* yang paling umum tersedia di pasar. Botol transparan, wadah makanan, serta kemasan dapat diproduksi menggunakan PLA, yang juga memiliki sifat transparan, terurai secara alami, dan dapat dikomposkan. Selain itu, PLA digunakan secara luas untuk berbagai produk dalam layanan makanan, tas belanja, serta sebagai pelapis pada kertas dan karton. Penelitian menunjukkan bahwa saat ini PLA dan *biopolymer* lainnya semakin populer dalam kemasan produk dengan umur simpan pendek yang tidak memerlukan perlindungan tinggi terhadap gas dan kelembapan[8].

Dapat dilihat juga perbandingan *Polylactid Acid* (PLA) dengan Polimer lain seperti pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Perbandingan PLA dengan Polimer Lain[9]

Properties Polymer → ↓	Tensile Modulus (Gpa)	Yield Strength (Mpa)	Flexural Strength (Mpa)	Elongation (%)
Polylactid Acid (PLA)	3.2	49	70	2.5
Polyvinyl Chloride (PVC)	2.6	35	90	3.0
Polypropylene (PP)	1.4	35	49	10
Polystyrene (PS)	3.4	49	80	2.5
Nylon	2.9	71	95	5

Berbagai karakteristik mekanis dari material ini, yang bervariasi dari yang lunak dan elastis hingga yang keras dan sangat kuat, menjadikan PLA ideal untuk berbagai aplikasi. Selain itu, PLA dapat dikombinasikan atau dikopolimerisasi

dengan polimer lain atau bahan *non*-polimer. Oleh karena itu, polimer ini memiliki karakteristik kimia, fisik dan aliran yang sesuai. Memahami fungsi dari karakteristik ini serta memilih teknik pemrosesan yang tepat sangat penting bagi pengguna dan beragam aplikasi yang diinginkan[10].

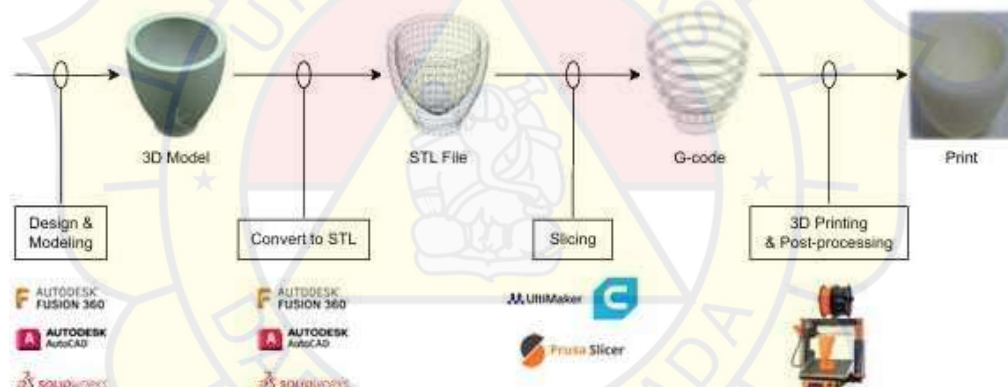
2.2 3D Printing (*Additive Manufacturing*)

Additive Manufacturing (AM) merupakan inovasi terkini dalam pengolahan material dan pembuatan objek berdasarkan model tiga dimensi (3D), umumnya dilakukan dengan menambahkan lapisan secara bertahap. Proses AM terbagi menjadi dua langkah: langkah pertama adalah fase virtual yang melibatkan model yang dirancang menggunakan *software Computer Aided Design* (CAD) dan langkah kedua adalah fase nyata untuk memproduksi objek fisik[11].

Pendekatan ini telah mengalami kemajuan yang signifikan selama sepuluh tahun terakhir dan telah digunakan secara luas dalam berbagai sektor, seperti teknik, pembangunan, kesehatan, penerbangan, dan lainnya. Parameter pada printer 3D mencakup suhu pada *nozzle*. Suhu pada permukaan, kecepatan pencetakan, laju penyediaan bahan, ketebalan lapisan ukuran lubang udara dan berbagai aspek lainnya[12].

Proses utama dalam teknologi pencetakan 3D melibatkan pembuatan komponen dengan cara mencetak lapisan bahan yang disusun satu per satu di atas lapisan sebelumnya. Dalam alur kerja pencetakan 3D, model CAD dari objek yang ingin dibuat dirancang, kemudian file uji selesai diubah menjadi *Standard Triangle Language* (STL) dihasilkan dari model CAD tersebut. Proses dalam pembuatan file STL terutama melibatkan konversi geometri kontinyu dari file CAD menjadi beberapa segitiga kecil. File STL selanjutnya diekspor ke *software* pemotongan

model yang membuat jalur bagi printer 3D. Pada tahap ini, model yang dicetak diubah menjadi irisan 2D yang berisi data mengenai penampang. Printer 3D kemudian memulai langkah-langkah untuk mengolah dan melapisi bahan. Produk akhir kemudian dikeluarkan dari printer. Terdapat berbagai faktor yang dapat memengaruhi proses pencetakan dan menentukan kualitas keseluruhan dari bagian yang dihasilkan. Misalnya, file STL berpotensi memengaruhi kualitas hasil cetakan. Ukuran segitiga yang lebih kecil dalam file STL berkontribusi pada akurasi bentuk objek atau bagian yang dicetak. Posisi bagian selama proses pencetakan dapat memengaruhi sifat mekaniknya, sementara faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan juga berperan terhadap kualitas produk akhir yang dihasilkan[13].



Gambar 2. 2 Alur Kerja Keseluruhan dari Proses Manufaktur Aditif

Sumber: [14]

2.2.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Fused Deposition Modeling (FDM) merupakan sebuah metode percetakan tiga dimensi yang memanfaatkan ekstrusi filamen untuk menghasilkan elemen tiga dimensi secara langsung dari model *Computer Aided Design* (CAD). Teknik ini diperkenalkan dan dikomersialkan pada tahun 1990-an oleh Perusahaan *Stratasys* yang berbasis di Amerika. Dalam proses ini, material disusun di atas permukaan

yang dipanaskan dengan cara mengekstrusi bahan yang sudah meleleh melalui *nozzle* dengan ukuran tertentu. Selama periode yang panjang, metode ini telah digunakan untuk mencetak berbagai jenis material, termasuk polimer, serbuk logam, keramik, dan bahan komposit lainnya. Selain itu, FDM diakui sebagai salah satu teknologi percetakan tiga dimensi (3D) yang paling populer dalam penelitian biomaterial karena harganya yang relatif rendah, presisinya yang tinggi, kemampuannya untuk menciptakan struktur yang kompleks, serta tidak memerlukan pelarut organik[15].

Fused Deposition Modeling (FDM) yang kerap disebut sebagai *Fused Filament Fabrication* (FFF) merupakan teknik menempatkan filamen termoplastik secara bertahap di atas permukaan cetak. Filamen polimer dipanaskan hingga mencapai kondisi semi-padat dan kemudian ditempatkan di atas area cetak yang telah dipanaskan[13].

Dasar dari teknik manufaktur FDM adalah pencairan bahan baku dan pembentukan menjadi bentuk yang baru. Bahan yang digunakan adalah filamen yang tersedia dalam bentuk gulungan, yang kemudian ditarik oleh rol penggerak, dan dimasukkan ke dalam kepala *nozzle* yang diatur suhunya dan dipanaskan hingga menjadi setengah cair. *Nozzle* dengan akurasi mengekstrusi dan mengarahkan bahan dalam lapisan tipis demi lapisan untuk membentuk elemen struktural secara bertahap. Proses ini mengikuti kontur yang telah ditentukan oleh perangkat lunak, umumnya CAD, yang telah diunggah ke dalam sistem FDM[16].

2.3 Heat Treatment

Perlakuan panas atau *Heat Treatment* bertujuan untuk meningkatkan keuletan, menghilangkan tegangan termal, memperhalus ukuran butiran kristal,

serta meningkatkan kekuatan atau tegangan tarik pada logam. Berbagai faktor yang dapat mempengaruhi proses perlakuan panas meliputi suhu pemanasan atau pendinginan logam atau paduannya dalam keadaan padat untuk memperoleh karakteristik tertentu. Untuk mencapai hasil ini, laju pendinginan dan batas suhu memiliki pengaruh signifikan[17].

Perlakuan panas memiliki peran krusial dalam menetapkan ketahanan suatu material atau elemen. Oleh karena itu, sangat penting untuk melepaskan tegangan pada material sebelum diterapkan dalam proses produksi[18].

Perlakuan panas adalah metode yang mengubah karakteristik metalurgi suatu material agar sesuai dengan kebutuhan spesifik. Fitur-fitur material yang umumnya dimodifikasi selama perlakuan termal meliputi kekuatan, daya tahan, kekerasan, dan kelenturan. Namun, hal yang sangat penting dalam perlakuan panas adalah bahwa karakteristik yang diinginkan dari material tersebut harus dicapai dengan cara yang aman tanpa menyebabkan kerusakan atau kegagalan pada material tersebut. Dalam banyak kesempatan, sifat yang diharapkan umumnya dianalisis selama proses modifikasi untuk menilai keuntungan bagi material[18].

Proses perlakuan panas secara umum meliputi *hardening*, *tempering*, *carburizing*, dan *annealing*. Ada beberapa elemen yang mempengaruhi kekerasan dari perlakuan panas, seperti suhu, waktu penahanan, dan jenis media pendingin. Dalam penelitian ini, fokus utama adalah pada *annealing*[19].

2.3.1 Annealing

Annealing merupakan metode pemanasan logam yang kemudian diikuti dengan pendinginan secara perlahan di dalam tungku yang dimatikan[20]. Proses

pemanasan logam dilakukan pada suhu sedikit lebih tinggi dari suhu kritis. Setelah pemanasan, logam dibiarkan hingga suhunya stabil sebelum didinginkan secara perlahan. Penting untuk menjaga agar temperatur bagian luar dan dalam logam sama selama proses pendinginan. Tujuan dari langkah ini adalah untuk menurunkan tegangan dalam, menghaluskan butiran, serta mengurangi kekerasan yang berfungsi sebagai pelunakan logam. Dengan melaksanakan proses ini, material akan memiliki sifat yang lebih palstis dan ulet. Karakteristik ini memudahkan pemrosesan benda kerja dengan mesin dan memungkinkan untuk diperkeras kembali setelahnya. Proses ini juga dapat mengatasi struktur yang tidak seragam dan tegangan yang muncul akibat proses rol atau tempa[21].

Proses *Annealing* dengan laju pemanasan/pendinginan yang lambat secara substansial memperbaiki tingkat kristalinitas dan sebagai hasilnya meningkatkan kekuatan tarik serta *modulus young*. Peningkatan ini berkaitan erat dengan penurunan tegangan sisa dan hilangnya cacat yang disebabkan oleh perlakuan setelah *pasca*-pemrosesan[22].

Proses ini sangat krusial karena meningkatkan ketahanan dan ketangguhan logam. Sebagai hasilnya, logam menjadi lebih mudah diproses terutama saat mengalami pengerjaan dingin. Salah satu tujuan utama dari *annealing* adalah mengurangi tekanan internal, sehingga distorsi plastik dapat dihilangkan selama proses berlangsung[18]. Tujuan lainnya adalah untuk memperbaiki ukuran butir dan dalam beberapa situasi juga dapat meningkatkan *machinability*. Selain itu, pelunakan juga dilakukan untuk meningkatkan keuletan dan mengurangi tegangan internal yang dapat membuat material bersifat getas[23].

Proses *annealing* juga mampu meningkatkan karakteristik mekanik lainnya (ketahanan) meskipun hal ini dapat menyebabkan penurunan pada tingkat kekerasan akibat perubahan struktur mikro yang terjadi pada material tersebut. Maka dari itu, untuk meningkatkan kekerasan pada permukaan diperlukan perlakuan tambahan[24].

Annealing pada bahan plastik merupakan langkah pemrosesan tambahan dalam pengolahan yang melibatkan penempatan komponen plastik dalam kondisi yang tepat pada temperatur yang berada di antara suhu leleh dan suhu transisi kaca, diikuti dengan penahanan suhu tersebut selama periode waktu tertentu sebelum mendinginkan plastik secara perlahan. Medium yang digunakan untuk pemanasan dapat berupa: cairan seperti air, minyak, *ethylene glycol*, dan lain-lain, atau dapat juga menggunakan udara. Teknik pengolahan yang diterapkan seperti injeksi atau ekstrusi akan mempengaruhi parameter parameter *annealing* untuk plastik, dan kondisi yang digunakan harus sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai[25].

Berikut adalah manfaat yang bisa diperoleh dari perlakuan panas tersebut[21]:

1. Mengurangi kekerasan
2. Menghilangkan tegangan pada struktur kuningan
3. Meningkatkan sifat mekanik sisa
4. Meningkatkan kemampuan mesin serta kemampuan bentuk
5. Menghapus risiko terjadinya retak panas
6. Mengurangi atau menghilangkan ketidak-homogenan pada struktur
7. Menghaluskan ukuran butir

2.3.2 Pengaruh *Annealing* terhadap Sifat Mekanik PLA

Proses pemanasan ulang dapat memperbaiki tingkat kristalisasi pada polimer dengan menggunakan suhu yang berada di antara titik transisi gelas (T_g) dan titik leleh (T_m). Pemanasan ulang memicu proses pembentukan inti polimer yang mendorong proses kristalisasi dengan lebih efektif. Area *amorf* serta kristal kecil dalam polimer membantu menciptakan area kristal yang lebih besar dengan struktur kristal yang lebih baik, sehingga menghasilkan perilaku polimer yang lebih kuat, terutama pada suhu yang tinggi[26].

Semakin lama proses pemanasan dan semakin tinggi temperaturnya, bahan PLA akan menjadi semakin rapuh. Hal ini disebabkan oleh kristalisasi yang meningkat membuat bahan menjadi lebih kaku dan tidak mampu menyerap energi ketika mengalami deformasi, sehingga beresiko untuk patah secara mendadak setelah melewati batas beban maksimum[26].

Pemanasan (*annealing*) dapat diartikan sebagai proses mendinginkan perlahan benda uji di dalam oven. Untuk menilai karakteristik mekanik PLA yang telah melalui pemanasan, uji tarik dilaksanakan[27].

Proses *annealing* menghasilkan peningkatan pada kekuatan tarik material, tetapi juga menyebabkan perubahan ukuran akibat adanya pemadatan dalam struktur lapisan. Suhu yang dihasilkan selama *annealing* membuat lapisan filamen menjadi saling mengikat satu sama lain dengan lebih kuat. Penggabungan ikatan antara filamen yang terjadi bersamaan dengan penutupan celah di antara filamen. Hal ini menyebabkan ukuran material mengalami penurunan[26].

Hasil pengujian tarik dari proses *annealing* menunjukkan bahwa kekuatan tarik maksimum dari filamen ST PLA dicapai melalui proses *annealing* dengan tiga variasi parameter yaitu waktu *annealing*, suhu, dan media *annealing*. Spesimen memberikan kekuatan tarik tertinggi yang dihasilkan setelah *annealing* selama 15 menit, pada suhu 110°C, dan menggunakan kopi sebagai media *annealing*. Kekuatan tarik yang dihasilkan mencapai angka 49,65 MPa. Sementara itu, spesimen dengan waktu *annealing* 20 menit, suhu *annealing* 110°C, dan menggunakan gandum sebagai media *annealing* menunjukkan nilai kekuatan tarik terendah yaitu 44,65 MPa[28].

Dengan kata lain, proses *annealing* meningkatkan kekuatan mekanik PLA dengan memperbaiki struktur kristal menjadi lebih teratur dan padat. Namun, penting untuk dioptimalkan agar elastisitas tidak menurun dan tidak membuat material menjadi terlalu rapuh.

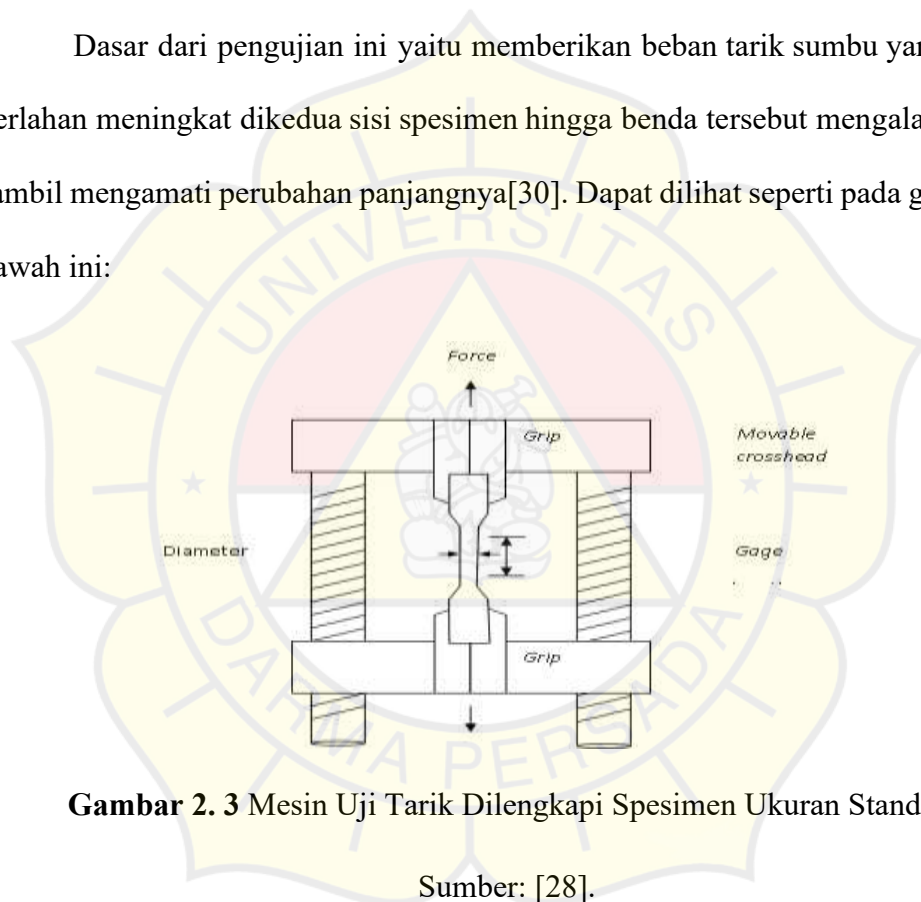
Dengan demikian, *annealing* memberikan dampak yang baik terhadap sifat mekanik PLA dengan meningkatkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas melalui peningkatan kristalinitas, namun perlu pengaturan suhu dan waktu agar tidak menimbulkan getas yang berlebihan pada material.

2.4 Uji Kekuatan Tarik

Uji Tarik merupakan salah satu metode pengujian untuk menilai karakteristik suatu material. Dengan cara menarik suatu material, kita dapat langsung memahami respon bahan tersebut terhadap gaya tarik dan mengukur perubahan panjangnya. Alat yang digunakan dalam pengujian ini perlu menyediakan cengkaman yang kuat dan memiliki tingkat kekakuan yang tinggi[29].

Secara sederhana, kekuatan tarik mengukur kemampuan material untuk menahan beban tarikan tanpa putus. Nilai kekuatan tarik biasanya diperoleh dari uji tarik dengan menarik spesimen bahan hingga putus, kemudian menghitung rasio antara gaya tarik maksimum dan luas penampang awal material. Kekuatan tarik ini menjadi parameter penting dalam menentukan ketahanan dan kualitas material dalam berbagai aplikasi teknik dan manufaktur.

Dasar dari pengujian ini yaitu memberikan beban tarik sumbu yang secara perlahan meningkat di kedua sisi spesimen hingga benda tersebut mengalami patah sambil mengamati perubahan panjangnya[30]. Dapat dilihat seperti pada gambar di bawah ini:

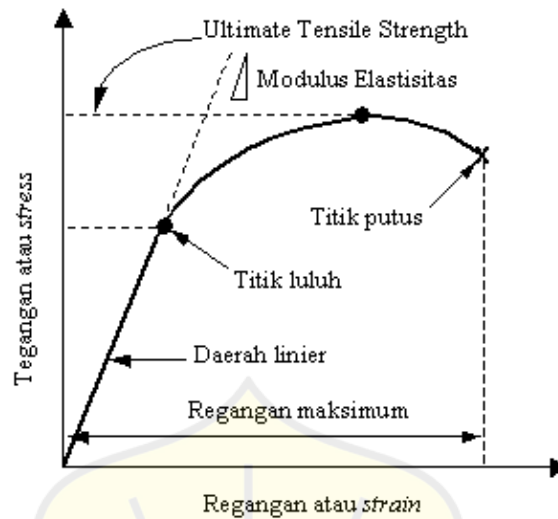


Gambar 2. 3 Mesin Uji Tarik Dilengkapi Spesimen Ukuran Standar

Sumber: [28].

Dengan melakukan penarikan terhadap material, kita dapat segera memahami bagaimana material bereaksi terhadap gaya tarik serta seberapa banyak panjangnya bertambah. Banyak aspek yang dapat diperoleh dari hasil pengujian tarik, jika kita terus menarik suatu material hingga patah, akan diperoleh kurva tarikan yang komprehensif seperti yang terlihat di bawah. Kurva ini menunjukkan hubungan antara kekuatan tarik dan perubahan panjang. Kurva ini sangat penting

dalam perancangan produk yang menggunakan material tersebut[29].



Gambar 2. 4 Kurva Uji Tarik

Sumber: [29]

Kurva tegangan-regangan yang berkaitan dengan rekayasa dihasilkan melalui pengujian tarik dengan cara membagi gaya tarik dengan penampang awal untuk mendapatkan nilai tegangan, sedangkan regangan dihitung dari perubahan panjang relatif dari material yang diuji. Uji tarik dilakukan untuk mengumpulkan informasi mengenai tegangan regangan, serta modulus elastisitas suatu material dengan menarik material hingga mengalami patah. Proses pengujian ini menggunakan mesin uji tarik atau mesin uji universal dan mengikuti standar *ASTM D638 IV*.

Hubungan antara tegangan dan regangan selama proses pengujian ditentukan berdasarkan persamaan yang tertera dalam standar tersebut. Relasi antara tegangan dan regangan selama pengujian ditetapkan berdasarkan rumus yang tercantum dalam standar tersebut.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Keterangan :

σ = *tegangan* (Kgf/mm²)

F = *beban* (Kgf)

A = *luas penampang* (mm²)

Untuk mengeksplorasi karakteristik mekanik dari spesimen 3D yang sudah dibuat, penelitian ini melaksanakan uji tarik[26].

2.5 Hipotesis Penelitian

Hipotesis ini didasari oleh sifat PLA sebagai polimer termoplastik yang rentan terhadap tegangan residual dari proses cetak 3D (FDM). Mengacu pada latar belakang masalah, hipotesis dalam penelitian ini berfokus pada pengaruh signifikan *annealing post-processing* terhadap kekuatan tarik PLA hasil cetak 3D. Proses *Annealing* dapat meningkatkan kekuatan tarik (*tensile strength*) dari bahan *Polylactic Acid* (PLA) hasil cetak 3D dibandingkan dengan bahan tanpa perlakuan *annealing*, karena proses pemanasan dan pendinginan yang terkendali dapat mengurangi tegangan internal dan meningkatkan kristalisasi polimer.

Hal ini didasarkan pada teori yang menyatakan bahwa proses *annealing* pada suhu di bawah titik leleh PLA (sekitar 180°C) dapat meningkatkan kristalisasi material, mengurangi tegangan sisa (*residual stress*) yang muncul selama proses pencetakan 3D, meningkatkan densitas dan kekuatan mekanik serta memperbaiki ikatan antar *layer* yang terbentuk. Hipotesis dapat diuji melalui eksperimen dengan *annealing* dan pengukuran kekuatan tarik menggunakan mesin uji tarik (*tensile tester test*).