

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pengelasan

Pengelasan merupakan salah satu tahap yang penting dalam dunia industri manufaktur. Jenis pengelasan yang umum digunakan dalam masyarakat adalah pengelasan busur listrik atau pengelasan SMAW dan pengelasan gas. Akan tetapi terdapat beberapa masalah yang terdapat dalam proses pengelasan busur listrik dan gas tersebut [24]. Werdana (2024) mendefinisikan las sebagai proses penyatuan logam secara permanen melalui ikatan metalurgi, yang dilakukan saat logam dalam keadaan cair atau mendekati titik cair [25]. Meskipun terdapat perbedaan dalam penekanan, definisi di atas memiliki kesamaan dalam hal penggunaan panas untuk menyatukan logam.



Gambar 2.1 Pengelasan

Sumber : (posonsky, 2021).

Penyambungan logam dilakukan dengan menghasilkan panas melalui kombinasi gaya gesek dan tekanan pada dua permukaan logam yang bersentuhan. Panas ini kemudian digunakan untuk melelehkan sebagian kecil dari logam dasar dan logam pengisi (jika digunakan). *Friction Welding* merupakan salah satu metode

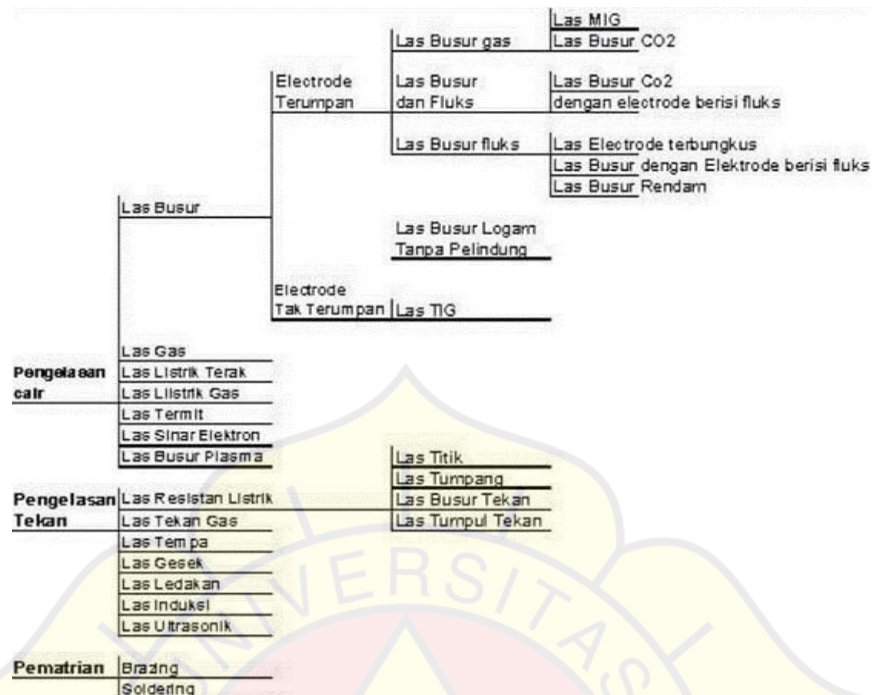
penyambungan logam yang tidak memerlukan bahan tambahan, karena prosesnya mengandalkan panas yang dihasilkan dari gesekan antara dua permukaan logam. Panas ini menyebabkan material di area sambungan melunak atau mendekati kondisi plastis, sehingga saat tekanan diberikan, kedua logam dapat bersatu secara permanen. Teknik ini memungkinkan terbentuknya ikatan metalurgi tanpa mencairkan seluruh volume logam, melainkan hanya pada zona antarmuka sambungan. Dengan demikian, *Friction Welding* efektif menghasilkan sambungan yang kuat dan presisi tanpa memerlukan proses peleburan secara menyeluruh [25].

2.2 Klasifikasi Pengelasan

Menurut Werdhana (2024), pengelasan dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok utama berdasarkan prinsip kerjanya: [25].

1. Pengelasan cair, yaitu metode penyambungan logam dengan memanfaatkan sumber panas, seperti busur listrik atau nyala api, yang memanaskan logam hingga mencapai titik lelehnya. Setelah meleleh, logam akan menyatu dan membentuk sambungan permanen saat mendingin.
2. Pengelasan tekan, yaitu proses pengelasan yang dilakukan dengan memanaskan logam pada area sambungan tanpa mencapai titik leleh, kemudian diberikan tekanan tinggi agar terjadi penyatuan melalui mekanisme difusi antar atom.
3. Pematrian, yaitu teknik penyambungan logam menggunakan logam pengisi yang memiliki titik leleh lebih rendah dari logam dasar. Dalam proses ini, logam dasar tidak mengalami pelelehan.

Klasifikasi tersebut dijelaskan lebih lanjut pada Gambar 2.2 berikut:

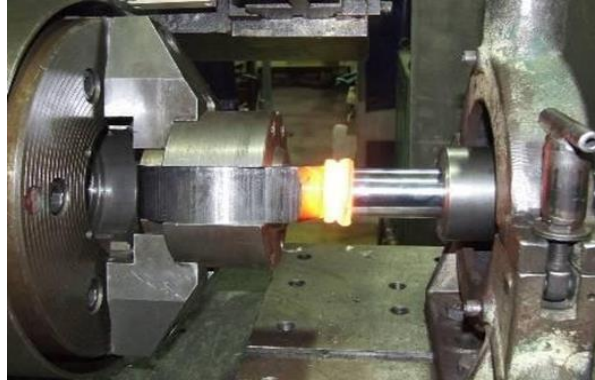


Gambar 2.2 Klasifikasi Pengelasan

Sumber : (Werdhana, 2024)

2.3 Pengelasan Gesek (*Friction Welding*)

Friction Welding, atau yang dikenal sebagai las gesek, merupakan salah satu metode pengelasan logam, khususnya baja, yang memiliki karakteristik unik. Proses ini bekerja dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan akibat gesekan antara dua permukaan baja yang akan disambungkan. Dalam pelaksanaannya, salah satu batang baja diputar sementara batang lainnya tetap diam, kemudian tekanan axial diterapkan pada keduanya. Gesekan yang berlangsung secara terus-menerus menyebabkan peningkatan suhu di area kontak. Ketika suhu tersebut mendekati titik leleh material, terjadi pelunakan pada permukaan sambungan yang memungkinkan kedua batang menyatu secara permanen melalui ikatan metalurgi. (Wahyu, 2023)



Gambar 2.3 Pengelasan Gesek

Sumber : (Wahyu, 2023)

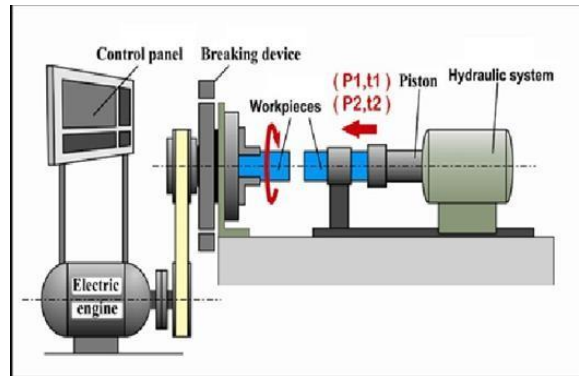
Pada tahun 1950, seorang insinyur mesin asal *Uni Soviet* bernama A.L. Chudikov mengemukakan teori fundamental mengenai konversi energi. Dalam publikasi yang didokumentasikan oleh Asosiasi Pengelasan Indonesia, Chudikov menjelaskan bahwa energi mekanik dapat dikonversi menjadi energi panas melalui gesekan. Fenomena ini umum terjadi pada mesin, di mana kontak antar komponen yang bergerak menghasilkan panas dan menyebabkan berkurangnya energi mekanik secara signifikan. Berdasarkan pengamatan tersebut, Chudikov menyadari bahwa panas akibat gesekan yang sebelumnya dianggap sebagai kerugian energi dapat dimanfaatkan secara positif, salah satunya untuk proses penyambungan logam. Gagasan ini mendorong dilakukannya berbagai eksperimen intensif hingga akhirnya Chudikov dan timnya berhasil mengembangkan suatu metode pengelasan baru yang dikenal sebagai *friction welding*, yaitu teknik pengelasan yang memanfaatkan panas gesekan sebagai sumber energinya (Haryanto, Ismail, Jamari, & Nugroho, 2023)

Proses *friction welding* kemudian berkembang dan diklasifikasikan ke dalam tiga metode utama, yaitu *Friction Stir Welding (FSW)*, *Linear Friction*

Welding (LFW), dan *Rotary Friction Welding (RFW)*. Ketiga metode tersebut memiliki karakteristik gerakan yang berbeda, namun prinsip dasarnya tetap serupa: memanfaatkan gesekan untuk menghasilkan peningkatan suhu secara lokal di area sambungan. Dalam proses ini, parameter seperti suhu, tegangan, regangan, dan laju regangan menjadi faktor krusial yang memengaruhi keberhasilan sambungan. Panas lokal yang dihasilkan menciptakan kondisi yang memungkinkan deformasi plastis pada material sambungan, sehingga terjadi ikatan permanen antara kedua bagian logam (Wahyu, 2023).

2.3.1 Rotary Friction Welding (RFW)

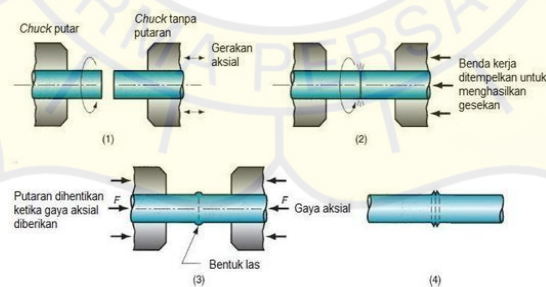
Rotary Friction Welding (RFW) adalah teknik pengelasan solid-state yang diakui oleh *American Welding Society (AWS)*. Proses ini berlangsung pada suhu yang lebih rendah dari titik leleh material penyambung, namun tetap mampu membentuk ikatan yang kokoh serta memiliki daya tahan tinggi dalam jangka waktu lama. Salah satu keunggulan utama dari RFW adalah kemampuannya dalam membersihkan permukaan sambungan dari kontaminan dan lapisan oksida, sehingga menciptakan antarmuka yang lebih reaktif secara fisik maupun kimia. Selain itu, kombinasi suhu tinggi pada area sambungan dan tekanan aksial yang diberikan turut berkontribusi dalam memperkuat ikatan antar material. Mekanisme penyambungan dalam proses ini mencakup perpaduan antara difusi, di mana atom dari masing-masing permukaan saling bercampur dan fusi lokal di mana terjadi penyatuan pada tingkat mikrostruktur [26].



Gambar 2.4 Rotary Friction Welding (RFW)

Sumber : (Alves, Neto, & An, 2019)

Gambar 2.7 menggambarkan proses pengelasan gesekan. Dalam metode ini, dua material yang ingin disambungkan dihubungkan dengan cara satu batang diputar dan batang lainnya diam. Gesekan terjadi ketika batang yang diam ditekan. Kombinasi antara tekanan dan gesekan secara terus-menerus menghasilkan peningkatan suhu hingga mendekati titik leleh material, yang menyebabkan bagian permukaan kedua material menjadi lunak. Ketika kondisi tersebut tercapai, permukaan yang saling bersentuhan menyatu dan membentuk sambungan yang kuat serta permanen. [25].



Gambar 2.5 Skema pengelasan gesek

Sumber : (Werdhana, 2024)

Salah satu keunggulan utama dari proses pengelasan gesekan (*friction welding*) adalah efisiensinya dalam hal penggunaan material tanpa memerlukan bahan tambahan serta kemampuannya menghemat waktu dalam proses

penyambungan, baik pada material yang sejenis maupun berbeda. Dalam penerapannya, keberhasilan sambungan tidak hanya ditentukan oleh parameter proses, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik material yang digunakan. Kelebihan lain dari teknik ini terletak pada kemampuannya untuk menyatukan seluruh permukaan kontak secara menyeluruh, sehingga menghasilkan sambungan dengan integritas struktural yang tinggi. Hal ini sulit dicapai melalui metode pengelasan konvensional seperti *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), yang sering kali menghasilkan zona sambungan dengan kualitas yang tidak merata [25].

2.4 Daerah Pengelasan

Ilustrasi di bawah ini menampilkan bagian-bagian penting yang terdapat pada zona pengelasan



Gambar 2.6 Pembagian Daerah Pengelasan

Sumber : (Soedarmadji, 2020)

1. Logam Las (*Weld Metal*)

Merupakan bagian dari material yang mengalami proses pelelehan akibat suhu tinggi selama pengelasan, kemudian memadat dan membentuk sambungan setelah proses pendinginan berlangsung. Area ini merupakan hasil langsung dari proses peleburan.

2. Garis Fusi (*Fusion Line*)

Yaitu batas antarmuka yang memisahkan logam las dengan logam dasar. Garis ini menandai peralihan antara area yang meleleh secara penuh dan area yang tidak mengalami peleburan namun tetap terkena pengaruh termal.

3. Zona Terpengaruh Panas (*Heat Affected Zone/HAZ*)

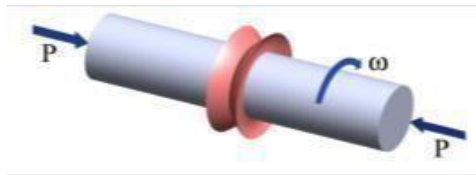
Merupakan wilayah di sekitar sambungan yang tidak meleleh, tetapi terpapar suhu tinggi selama proses pengelasan. Akibatnya, terjadi perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik logam, meskipun tidak sampai pada fase leleh.

4. Logam Induk (*Base Metal*)

Adalah bagian dari material asli yang tidak mengalami perubahan struktur maupun sifat mekanik secara signifikan, karena berada di luar jangkauan pengaruh termal dari proses pengelasan.

2.5 *Rotary Friction Welding (RFW)*

Proses *Rotary Friction Welding* (RFW) dilakukan dengan menggunakan dua buah benda berbentuk silinder, di mana salah satu benda diputar sementara benda lainnya tetap diam dan dikenai tekanan aksial, yaitu tekanan yang bekerja sejajar dengan sumbu longitudinal. Kombinasi antara gerakan rotasi dan tekanan ini menghasilkan panas akibat gesekan pada permukaan kontak kedua benda, sehingga memungkinkan terjadinya penyambungan. Ilustrasi proses ini dapat dilihat pada gambar berikut: (Yohanes, Siregar, Susilawati, & Badri, 2018)



Gambar 2.7 *Rotary Friction Welding (RFW)*

Sumber : (Yohanes, Siregar, Susilawati, & Badri, 2018)

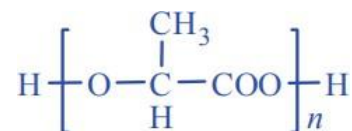
American Welding Society (AWS) menggolongkan *Rotary Friction Welding (RFW)* ke dalam jenis pengelasan *solid-state*, yaitu proses penyambungan logam yang tidak melibatkan pencairan material secara menyeluruh. Prinsip dasar dari metode ini adalah menyatukan dua material dengan cara memberikan tekanan sambil menghasilkan panas akibat gesekan, sehingga terjadi ikatan antar material. Proses ini berlangsung pada temperatur di bawah titik leleh material, umumnya mencapai sekitar 80% dari suhu lelehnya, sehingga material berada dalam kondisi plastis yang memungkinkan deformasi dan difusi antar permukaan untuk membentuk sambungan yang kuat (Saputra, 2020). Pada tahap kritis proses *Rotary Friction Welding (RFW)*, tekanan diberikan pada material untuk menghasilkan panas melalui gesekan sekaligus menciptakan interferensi mekanis yang diperlukan guna membentuk sambungan. Setelah fase tersebut, daerah sambungan mengalami penempaan (*forging*) yang berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan kualitas ikatan. Proses RFW dikenal menghasilkan siklus termal yang optimal, sehingga mampu meminimalkan kemungkinan cacat seperti retakan dan penyusutan. Akibatnya, zona terpengaruh panas (*Heat Affected Zone* atau *HAZ*) yang terbentuk cenderung lebih kecil, sementara kekuatan sambungan meningkat secara signifikan. Keunggulan lain dari metode ini adalah tidak memerlukan gas pelindung maupun

logam pengisi, mampu menggabungkan logam yang berbeda jenis, serta menghasilkan sambungan dengan tingkat porositas yang sangat rendah. Dengan karakteristik tersebut, RFW menjadi solusi yang efisien dan ideal terutama untuk penyambungan poros padat yang sulit dijangkau oleh teknik pengelasan konvensional (Purwaningrum, Fatha, & Pratama, 2022).

2.6 *Polylactic Acid (PLA)*

Polylactic acid (PLA) merupakan jenis polimer biodegradable yang termasuk dalam kelompok poliester alifatik karena kemampuannya untuk terurai secara alami di lingkungan, khususnya di dalam tanah. Material ini bersifat ramah lingkungan dan serbaguna, serta diperoleh dari proses polimerisasi asam laktat. Asam laktat tersebut berasal dari sumber daya terbarukan yang dapat didaur ulang, seperti gula, jagung, gandum, singkong, serta berbagai tanaman lain yang memiliki kandungan pati tinggi [27].

Polylactic acid (PLA) merupakan jenis polimer semi-kristalin yang secara alami memiliki sifat yang cenderung rapuh atau getas. Oleh karena itu, dalam proses pembentukannya sering diperlukan penambahan plasticizer guna meningkatkan fleksibilitas serta memperbaiki sifat mekanisnya. Struktur kimia dari PLA dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Poly(lactic acid)

Gambar 2.8 *Polylactic acid* (PLA)

Sumber : (Ardiansyah, 2022)

Menurut (Hendraloka, 2019) *polylactic acid* memiliki beberapa kelebihan seperti:[28].

1. Biodegradabilitas – PLA mampu terurai secara alami melalui aktivitas mikroorganisme di lingkungan, sehingga tidak meninggalkan limbah jangka panjang.
2. Biokompatibilitas – Material ini dapat diterima oleh jaringan biologis dalam kondisi normal, sehingga aman digunakan dalam aplikasi medis tertentu.
3. Berasal dari sumber terbarukan – PLA tidak dibuat dari minyak bumi, melainkan dari bahan-bahan yang dapat diperbarui, termasuk limbah atau sisa hasil industri pertanian seperti jagung dan singkong.
4. Dapat didaur ulang – PLA memiliki kemampuan untuk diproses ulang, sehingga mendukung prinsip ekonomi sirkular dan pengurangan limbah plastik.
5. Ramah terhadap lingkungan dalam proses produksinya – Pembuatan PLA tidak memerlukan penggunaan pelarut organik beracun, sehingga meminimalkan dampak terhadap lingkungan dan kesehatan.
6. Pembakaran bersih – Ketika dibakar, PLA dapat terurai secara sempurna menjadi karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O), tanpa menghasilkan residu berbahaya.

Saat ini, *Polylactic acid* (PLA) telah banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, salah satunya sebagai bahan dasar dalam teknologi pencetakan 3D (*3D printing*). PLA digunakan dalam bentuk filamen yang kompatibel dengan berbagai jenis printer 3D. Salah satu produk filamen PLA yang diproduksi oleh R3D MAKER memiliki rentang suhu pencetakan antara 200 hingga 230°C, yang

menjadikannya cocok untuk digunakan dalam proses pencetakan dengan parameter standar. Material Properties dari bahan PLA dapat dilihat pada tabel 2.1 dan tabel 2.2.

Tabel 2.1 Material Properties PLA

SIFAT FISIK	NOMINAL
Spesific Gravity (23°C)	1,24 to 1,26 g/cm ³
Melt Mass-Fr	
210°C/2,16 kg	60 to 78 g/10 min
190°C/2,16 kg	1,5 to 36 g/10 min
Diameter tolerance	+0,10 mm/ -0,15 mm
Ovalidity tolerance (max)	±5%
SIFAT MEKANIK	NOMINAL
Tensile modulus (23°C)	2020 - 3550 MPa
Tensile strength yield (23°C)	15,5 - 72 MPa
Tensile strength break (23°C)	14 - 70 MPa
Tensile elongation yield (23°C)	9,8 - 10%
Tensile elongation break (23°C)	0,5 - 9,2%
Flexural modulus (23°C)	2392 - 4930 MPa
Fluxural strength (23°C)	48 - 110 MPa

Polymer ^a	M_w	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Flexural modulus ^b (MPa)	Yield (%)	Elongation @break (%)
Poly(ortho esters)						
±-CDM:1,6-HO = 30:00 [1a]	99 700	20	820	900	4.1	220
±-CDM:1,6-HO = 70:30 [1b]	101 000	19	800	1000	4.1	180
±-CDM:1,6-HO = 90:10 [1c]	131 700	27	1150	1250	3.4	7.0
Poly(glycolic acid) [2]	50 000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Poly(lactone acids) [3]						
l-PLA	60 000	28	1200	1400	3.7	6.0
l-PLA	100 000	50	2700	3000	2.6	3.3
l-PLA	300 000	48	3000	3250	1.8	2.0
d,l-PLA	21 000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
d,l-PLA	107 000	29	1900	1950	4.0	6.0
d,l-PLA	660 000	35	2400	2350	3.5	6.0
Poly(oligoesteramides) [4]						
Homopolymer [0 mol% HV] [4a]	370 000	36	2600	2850	2.2	2.5
Copolymer [7 mol% HV] [4a]	460 000	24	1400	1600	2.3	2.8
Copolymer [11 mol% HV] [4a]	529 000	20	1100	1300	6.5	17
Copolymer [22 mol% HV] [4a]	227 000	16	620	750	8.5	36
Poly(<i>l</i> -cysteine) [5]	44 000	16	400	600	7.0	90
Polyamides						
Poly(CPP-SA-ISO anhydride) [6]	31 000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Poly(SA HDA anhydride) [7]	142 000	4	40	N/A	14	65
Poly(trimethylolpropane carbonate) [8]	68 000	0.5	3	N/A	20	160
Poly(amicarbonates)						
Poly(BHAA-monoacetate) [11]	106 000	60	2150	2400	3.6	4.0
Poly(BTHAA-diacetate) [11]	101 000	40	1630	N/A	3.5	7.0

Gambar 2.9 Sifat Mekanik PLA dan Polimer Lain

2.7 Mesin 3D Printer

Mesin 3D printer merupakan perangkat yang digunakan untuk memproduksi objek tiga dimensi dengan berbagai bentuk berdasarkan model digital yang dirancang menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design (CAD)*. Proses pencetakan dilakukan dengan menerapkan teknologi manufaktur aditif, yaitu metode pembuatan objek secara bertahap melalui penambahan material lapis demi lapis (*layer by layer*) (Cahyati & Sanora, 2019).

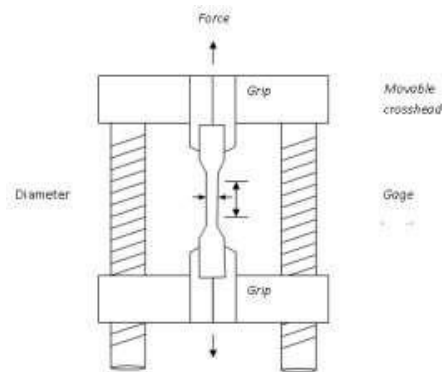
Proses pencetakan pada mesin 3D printer dilakukan melalui mekanisme pelelehan termoplastik, di mana material dipanaskan hingga mencair kemudian diekstrusi melalui *nozzle* yang digerakkan oleh motor. Material yang keluar dari

nozzle akan disusun secara bertahap di atas printing bed, yang dapat bergerak secara presisi dalam tiga sumbu utama, yaitu X, Y, dan Z (A. Kholil, F. AEFI, & E. A. Syaefudin, 2020).

Teknologi ini memungkinkan pencetakan objek secara akurat sesuai dengan desain tiga dimensi (3D) yang dibuat menggunakan perangkat lunak komputer. Mesin 3D printer menggunakan filamen sebagai material utama untuk pencetakan. Jenis filamen yang dapat digunakan sangat beragam, mulai dari termoplastik (seperti PLA, ABS), hingga bahan lain seperti kayu, logam, dan lilin, tergantung pada jenis printer dan kebutuhan aplikasi. Filamen yang paling sering digunakan untuk membuat produk 3D printer ialah filamen termoplastik. [29].

2.8 Uji Kekuatan Tarik

Uji tarik merupakan salah satu metode pengujian mekanik yang digunakan untuk menentukan kekuatan suatu material dengan memberikan beban gaya searah dalam satu sumbu. Melalui pengujian ini, dapat diamati respons struktur internal material terhadap gaya tarik yang diberikan, termasuk perilaku deformasi serta batas elastisitasnya. Selain itu, uji tarik juga memberikan informasi mengenai perubahan panjang spesimen akibat pembebanan, yang menjadi dasar dalam menentukan sifat mekanik seperti modulus elastisitas dan kekuatan tarik maksimum (Firmansyah, 2020).

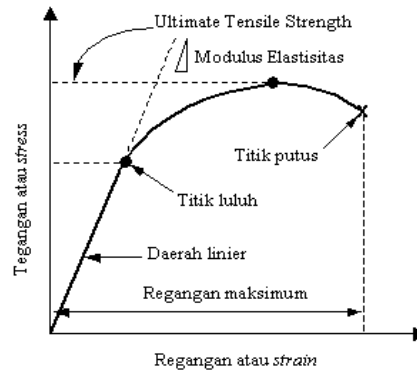


Gambar 2.10 Contoh Mesin Uji Tarik dengan Spesimen

Sumber : (Firmansyah, 2020)

Prinsip dasar dari pengujian tarik adalah memberikan beban tarik secara uniaxial (satu arah) pada spesimen yang telah disiapkan dengan dimensi standar. Spesimen diletakkan pada mesin uji tarik, lalu dikenai gaya tarik yang meningkat secara bertahap dan kontinyu hingga material mengalami kegagalan atau putus. Selama proses penarikan berlangsung, dilakukan pengamatan dan pencatatan data secara real-time, seperti gaya yang diterapkan, perubahan panjang, serta bentuk deformasi material. Data tersebut kemudian digunakan untuk menentukan sifat mekanik material seperti tegangan maksimum, regangan, dan modulus elastisitas [30].

Uji tarik rekayasa dilakukan untuk melengkapi data rancangan kekuatan bahan dan menjadi acuan dalam menentukan spesifikasi material yang sesuai kebutuhan teknik. Pada uji tarik, benda uji diberi beban gaya tarik sesumbu yang bertambah secara berkelanjutan, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan terhadap perpanjangan yang dialami benda uji [31].



Gambar 2.11 Kurva Tegangan Regangan

Sumber : (Putra, 2019)

Kurva tegangan–regangan rekayasa diperoleh dari hasil uji tarik dengan membagi gaya tarik terhadap luas penampang mula-mula untuk mendapatkan nilai tegangan, sedangkan nilai regangan dihitung dari perubahan panjang spesimen terhadap panjang awalnya.

Pengujian tarik dilakukan untuk memperoleh data mengenai tegangan, regangan, serta modulus elastisitas suatu material dengan cara menarik spesimen hingga mengalami kerusakan. Proses pengujian ini menggunakan alat uji tarik atau universal testing machine dan mengikuti ketentuan dari standar ASTM D638. Relasi antara tegangan dan regangan selama pengujian ditentukan berdasarkan rumus yang tercantum dalam standar tersebut.

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

Keterangan :

σ = tegangan(Kgf/mm²)

F = beban (Kgf)

A = luas penampang (mm²)

2.8.1 *Ultimate Tensile Strength (UTS)*

Kekuatan Tarik Maksimum (*Ultimate Tensile Strength/UTS*) adalah salah satu parameter penting yang digunakan untuk menilai karakteristik mekanik suatu material, khususnya dalam pengujian tarik. UTS mengukur tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh suatu spesimen sebelum mengalami kegagalan atau putus. Parameter ini menjadi indikator penting untuk mengetahui seberapa kuat material menahan gaya eksternal, khususnya gaya tarik, sebelum terjadi deformasi permanen yang menyebabkan kerusakan struktural.

UTS sering digunakan dalam evaluasi kelayakan material untuk aplikasi struktural dan teknik karena secara langsung berkaitan dengan keamanan dan kekuatan. Material dengan nilai UTS tinggi biasanya digunakan dalam konstruksi, manufaktur, otomotif, kedirgantaraan, dan bidang teknik lainnya yang menuntut performa mekanik tinggi. Nilai ini tidak hanya mencerminkan kemampuan material terhadap gaya maksimum, tetapi juga berfungsi sebagai dasar perhitungan untuk menentukan batas desain suatu komponen teknik.

Beberapa faktor yang memengaruhi nilai UTS antara lain komposisi kimia material, struktur mikro, kondisi manufaktur, proses perlakuan panas, serta keberadaan cacat internal seperti pori, retakan mikro, dan inklusi. Selain itu, kecepatan pembebanan (*Strain rate*), suhu pengujian, serta kondisi lingkungan juga dapat memengaruhi hasil uji tarik.

Dalam banyak pengujian, UTS dianggap sebagai parameter kritis karena menunjukkan batas atas performa suatu material dalam kondisi statis. Oleh

karena itu, pengujian UTS sering dijadikan standar dalam pengujian material teknik seperti logam, polimer, komposit, dan keramik.

2.8.2 *Strain* (Regangan)

Strain atau regangan merupakan parameter mekanik yang menggambarkan sejauh mana deformasi terjadi pada material akibat beban luar, seperti gaya tarik atau tekan. *Strain* terjadi ketika dimensi awal material berubah, dan nilainya menunjukkan seberapa besar perubahan bentuk yang dapat ditoleransi material sebelum rusak atau patah. Dalam teknik mesin, konsep *Strain* penting untuk menganalisis kekuatan, keuletan, dan batas deformasi struktur.

Strain terbagi menjadi dua jenis, yaitu *Strain* elastis dan *Strain* plastis. *Strain* elastis terjadi saat deformasi masih dapat kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan, sedangkan *Strain* plastis merupakan deformasi permanen setelah melewati batas elastis. Dalam pengujian tarik, besarnya *Strain* digunakan untuk menilai keuletan material. Material ulet menunjukkan *Strain* tinggi, sedangkan material getas cenderung memiliki *Strain* rendah.

Dalam proses penyambungan termoplastik seperti *Rotary Friction Welding* (RFW), pengamatan terhadap nilai *Strain* penting untuk mengevaluasi kualitas sambungan. Sambungan yang baik mampu menahan deformasi tanpa langsung mengalami kerusakan. Selain itu, nilai *Strain* yang terlalu rendah dapat mengindikasikan adanya cacat mikro seperti *void* atau retakan, sehingga analisis *Strain* juga berperan dalam menilai integritas struktural sambungan.

Secara matematis, *Strain* dirumuskan sebagai:

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \text{ (2.2)}$$

dengan:

- $\varepsilon = \textit{Strain}$ (tanpa satuan)
- $\Delta L =$ perubahan panjang (mm)
- $L_0 =$ panjang awal spesimen (mm)

Rumus ini digunakan dalam uji tarik untuk mengukur seberapa besar deformasi relatif yang dialami material akibat pembebanan.

2.8.3 Modulus Elastisitas

Uji tarik merupakan salah satu metode paling umum dan fundamental dalam menguji sifat mekanik material, khususnya untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum (Ultimate Tensile Strength/UTS), modulus elastisitas, dan elongation. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan gaya tarik secara aksial pada spesimen hingga terjadi kegagalan, guna mengamati perilaku material terhadap beban. Dalam konteks penelitian ini, uji tarik digunakan untuk mengevaluasi performa mekanik sambungan yang dihasilkan melalui proses *Rotary Friction Welding* (RFW) pada material hasil cetak 3D. Jumlah spesimen yang diuji adalah sebanyak 20, yang terdiri dari lima spesimen kontrol (tanpa proses RFW) serta lima spesimen untuk masing-masing variasi parameter proses seperti kecepatan putar, waktu gesek, tekanan aksial, dan ketebalan lapisan. Pengujian ini dilakukan menggunakan mesin uji tarik standar dengan kondisi terkontrol agar hasilnya valid dan dapat dibandingkan secara objektif.

Secara teoritis, salah satu acuan penting dalam uji tarik adalah Hukum Hooke, yang menjelaskan hubungan antara tegangan dan regangan pada daerah

elastis suatu material. Hukum ini menyatakan bahwa dalam batas elastisitas, tegangan (σ) berbanding lurus dengan regangan (ϵ), dan hubungan ini dapat dituliskan:

$$\sigma = E \times \epsilon \text{ (2.3)}$$

dengan keterangan sebagai berikut:

- σ = tegangan (N/mm² atau MPa), yaitu gaya per satuan luas penampang
- ϵ = regangan (tanpa satuan atau dinyatakan dalam persen), yaitu perubahan panjang relatif terhadap panjang awal
- E = modulus elastisitas (MPa), yang menggambarkan kekakuan material

Pemahaman terhadap hubungan ini sangat penting dalam menganalisis hasil pengujian, khususnya dalam menentukan seberapa besar deformasi elastis yang terjadi sebelum material mengalami deformasi plastis atau putus. Selain itu, data tegangan-regangan dari pengujian ini juga digunakan untuk menilai kualitas sambungan, efektivitas mekanisme *interlocking*, dan kemampuan sambungan dalam mempertahankan kekuatan tarik selama digunakan dalam kondisi pembebanan nyata. Dengan demikian, uji tarik menjadi bagian krusial dalam menilai keberhasilan proses RFW terhadap performa struktural material cetak 3D.

2.9 Fusi

Secara umum, fusi adalah proses penyatuan dua material melalui pemanasan hingga mencapai kondisi lunak atau cair, kemudian ditekan agar permukaannya menyatu secara permanen setelah proses pendinginan. Konsep ini banyak digunakan dalam berbagai disiplin ilmu, mulai dari fisika, metalurgi, hingga

teknologi manufaktur. Dalam pengelasan atau penyambungan material, fusi berarti penyatuan dua benda kerja tanpa bantuan bahan pengisi (*filler*), melainkan hanya mengandalkan panas dan tekanan. Tujuan utamanya adalah untuk menciptakan sambungan yang kuat, menyatu secara struktural dan mekanis layaknya material utuh.

Fusi dalam pengelasan konvensional (seperti pengelasan logam) biasanya terjadi pada suhu tinggi hingga material mencair dan kemudian membeku bersama. Namun, pada material non-logam seperti polimer termoplastik, fusi tidak memerlukan suhu setinggi itu. Hal ini disebabkan karena sifat termoplastik memungkinkan material mencair pada suhu yang jauh lebih rendah, dan kembali mengeras saat didinginkan tanpa merusak struktur kimianya.

Pada material termoplastik, seperti *Polylactic acid* (PLA), fusi terjadi saat permukaan dua komponen dipanaskan hingga mencapai titik lunaknya (*softening point*), kemudian ditekan bersama hingga molekul-molekul rantai polimer dari kedua sisi berpindah dan saling terjerat (*entanglement*). Proses ini dikenal sebagai *fusion bonding* atau *thermal fusion*, dan terjadi tanpa perubahan fasa total atau reaksi kimia baru. Sambungan yang terbentuk dipengaruhi oleh tingkat kontak molekul dan waktu difusi selama material dalam kondisi lunak.

Dalam proses *Rotary Friction Welding* (RFW), fusi tercapai melalui panas gesekan yang dihasilkan dari putaran satu bagian terhadap bagian lain di bawah tekanan. Proses ini menghasilkan panas lokal yang cukup untuk melembekkan permukaan material PLA, kemudian putaran dihentikan dan tekanan tetap diberikan hingga sambungan mendingin dan mengeras kembali. Tidak ada proses pelelehan

penuh, karena suhu tetap dijaga di bawah titik degradasi, menjadikan fusi pada RFW bersifat solid-state fusion yang cocok untuk polimer.

Keberhasilan fusi pada material termoplastik sangat tergantung pada beberapa parameter seperti suhu, waktu kontak, tekanan, dan kondisi permukaan. Desain sambungan seperti penggunaan mekanisme *interlocking* dapat meningkatkan area kontak dan memperbaiki kekuatan mekanis hasil sambungan. Oleh karena itu, pemahaman tentang teori fusi sangat penting dalam merancang dan menganalisis kualitas sambungan pada pengelasan termoplastik berbasis gesekan seperti dalam penelitian ini.

2.9.1 Prinsip Fusi pada Material Termoplastik

Material termoplastik adalah jenis polimer yang dapat melembek ketika dipanaskan dan mengeras kembali saat didinginkan tanpa mengalami perubahan struktur kimia secara permanen. Sifat ini memungkinkan termoplastik untuk disambungkan kembali menggunakan metode penyambungan berbasis panas, seperti pengelasan, pencetakan, atau fusi termal. Salah satu prinsip utama dalam penyambungan termoplastik adalah fusi termal (*thermal fusion*), yaitu proses penyatuan dua permukaan termoplastik melalui pemanasan hingga mencapai suhu lunak, disertai dengan penekanan agar rantai polimer dari kedua permukaan dapat saling berinteraksi dan membentuk ikatan mekanis serta fisik yang kuat.

Pada saat permukaan dua material termoplastik dipanaskan, segmen-segmen molekul polimer memperoleh energi kinetik dan mulai bergerak lebih bebas. Ketika dua permukaan yang telah dilunakkan ini ditekan bersama, rantai-rantai molekul dari masing-masing sisi dapat saling menyusup atau terjat

(entanglement) dalam skala mikroskopik. Setelah tekanan dipertahankan dan suhu turun kembali, material mengalami pendinginan dan mengeras, sehingga terbentuk sambungan yang bersifat permanen.

Proses fusi pada termoplastik dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, di antaranya:

- Suhu sambungan: harus cukup tinggi untuk melunakkan permukaan tetapi tidak melebihi suhu degradasi material.
- Waktu kontak: waktu cukup diperlukan agar rantai polimer dapat saling berinteraksi dan membentuk jaringan ikatan.
- Tekanan: memastikan kedua permukaan saling menempel rapat untuk memaksimalkan kontak molekular.
- Kebersihan dan kerataan permukaan: permukaan yang bersih dan rata meningkatkan kualitas sambungan fusi.

Dalam konteks pengelasan gesek seperti *Rotary Friction Welding* (RFW), prinsip fusi pada termoplastik diterapkan dengan cara memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gesekan antara dua permukaan material. Gesekan ini menaikkan suhu lokal pada antarmuka sambungan hingga permukaan material mencapai kondisi lunak. Setelah putaran dihentikan, tekanan tetap diberikan untuk memungkinkan terjadinya fusi antar permukaan. Karena tidak terjadi pelelehan penuh, proses ini tergolong dalam kategori solid-state fusion yang efisien untuk penyambungan material termoplastik seperti PLA.

Penerapan prinsip fusi pada material termoplastik memberikan berbagai keuntungan, seperti proses yang cepat, tidak membutuhkan bahan pengisi, dan

memungkinkan terbentuknya sambungan yang kuat secara struktural. Oleh karena itu, pemahaman mengenai fusi sangat penting dalam merancang sambungan berkualitas tinggi pada material hasil cetak 3D, terutama dengan pendekatan inovatif seperti penggunaan mekanisme *interlocking* untuk memperluas area fusi dan meningkatkan kekuatan tarik sambungan.

