

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pengelasan

Pengelasan adalah metode untuk menyatukan logam atau non-logam pada titik tertentu, yang dilakukan dengan cara memanaskan bahan sampai mencapai suhu yang diperlukan untuk pengelasan. Prosedur ini dapat dilaksanakan baik dengan tekanan maupun tanpa tekanan, serta dapat melibatkan penggunaan bahan pengisi atau tidak, tergantung pada metode pengelasan yang digunakan.

Banyak faktor yang memengaruhi kekuatan sambungan las, sehingga proses pengelasan perlu dilakukan sesuai dengan persyaratan tertentu, di antaranya: [13].

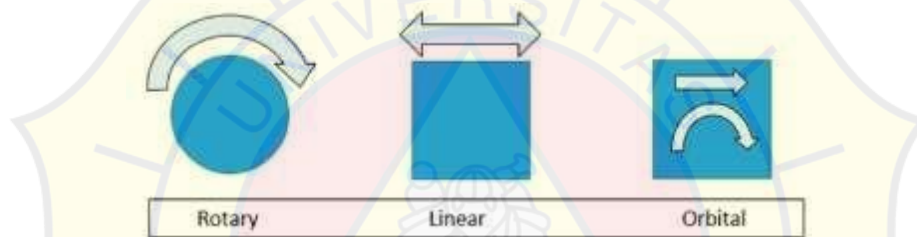
1. Bahan induk pada spesimen las harus mampu melebur dan melunak saat terkena panas.
2. Bahan yang disambung sebaiknya memiliki sifat las yang serupa, sehingga sambungan tidak melemah atau menimbulkan cacat pada hasil pengelasan..
3. Metode yang digunakan dalam proses penyambungan harus disesuaikan dengan sifat material serta tujuan dari penyambungan itu sendiri.

2.2 Pengelasan Gesek (*Friction Welding*)

Friction welding adalah metode pengelasan yang termasuk dalam kategori pengelasan keadaan padat (*solid state welding*), dimana proses penyambungan dilakukan dalam keadaan padat antara dua permukaan pada suhu di bawah titik lebur bahan induk tanpa adanya penambahan bahan maupun logam pengisi serta juga dapat dilakukan Dengan atau tanpa penerapan tekanan.. *Friction welding* adalah proses penyambungan yang memanfaatkan panas akibat gesekan mekanis,

dikombinasikan dengan tekanan antara dua permukaan material, di mana salah satu material diputar sementara yang lain tetap diam. Gesekan berlangsung terus-menerus hingga suhu pengelasan tercapai, kemudian diikuti dengan proses penempaan menggunakan gaya aksial setelah putaran dihentikan, sehingga terjadi penyambungan permanen antara kedua bahan induk. [13].

Proses pengelasan gesek diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan metode pelaksanaannya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1, yaitu *Rotary Friction Welding*, *Linear Friction Welding*, dan *Orbital Friction Welding*..



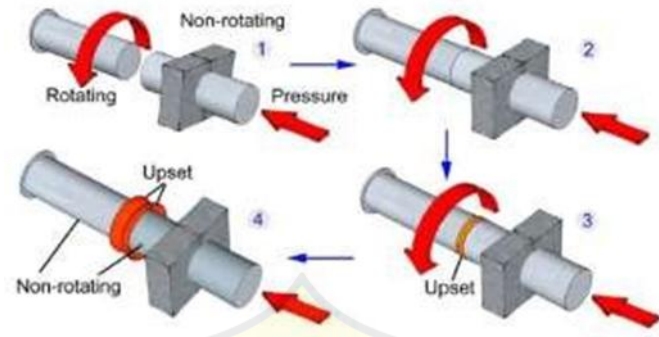
Gambar 2.1 Tiga Jenis Proses Pengelasan Gesek

Sumber : (Putra, 2020)

2.3 *Rotary Friction Welding (RFW)*

Rotary Friction Welding adalah metode pengelasan gesek di mana proses penyambungan berlangsung karena panas yang dihasilkan dari gesekan antara dua permukaan bahan. Hal ini terjadi karena putaran spindle yang memutar benda kerja 1 dengan kecepatan tetap yang diberi tekanan dari permukaan sambungan benda kerja 2 yang tetap diam pada mesin las gesek, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2., dalam proses RFW, penyambungan juga dapat dilakukan menggunakan mesin bubut, di mana gaya tekan diberikan secara bertahap melalui tailstock. Biasanya,

metode ini digunakan untuk menyambung bahan induk berbentuk silinder pejal. [13].



Gambar 2.2 Skema Proses *Rotary Friction Welding*

Sumber : (Putra, 2020)

Gesekan antara permukaan material menyebabkan suhu pada area sambungan meningkat dengan cepat, sehingga material mengalami deformasi plastis yang dipengaruhi oleh tekanan dan gaya sentrifugal, membentuk flash. Kehadiran flash ini membantu menghapus kotoran dan oksida dari area tersebut, sehingga menciptakan interaksi permukaan dengan kekuatan adhesi baik secara kimia maupun fisik yang signifikan. Peningkatan temperatur dan penerapan tekanan ini juga mendorong terjadinya difusi antar kedua bahan, sehingga penyatuan material dapat tercapai. [2].

2.4 Proses Fusi

Proses fusi adalah suatu metode penyambungan material yang mengandalkan panas untuk melembutkan atau melelehkan permukaan dua benda kerja yang akan disatukan. Setelah mencapai suhu yang cukup, material dalam kondisi semi-cair ditekan satu sama lain hingga terjadi penyatuan antar molekul. Setelah pendinginan, permukaan tersebut membentuk sambungan yang bersifat

permanen. Fusi biasa diterapkan pada logam dan polimer, terutama pada manufaktur berbasis cetak 3D dan pengelasan termoplastik.

Fusi bukan hanya persoalan melelehkan dua sisi permukaan, melainkan juga melibatkan difusi molekul yang aktif. Ketika dua permukaan meleleh dan bertemu, molekul dari masing-masing sisi mulai berdifusi ke sisi lainnya, membentuk ikatan antar muka yang kuat. Proses ini dikenal sebagai interdiffusion, dan sangat dipengaruhi oleh waktu sambungan, suhu fusi, dan tekanan kontak. Jika salah satu parameter tidak optimal, maka ikatan yang terbentuk cenderung lemah.

Pada material termoplastik seperti PLA dan *Nylon*, proses fusi sangat sensitif terhadap kecepatan pemanasan dan pendinginan. Pemanasan yang terlalu cepat dapat menyebabkan degradasi material, sedangkan pendinginan yang terlalu cepat bisa menghasilkan struktur *amorf* yang rapuh. Oleh karena itu, kontrol suhu sangat penting dalam menghasilkan kualitas sambungan yang baik. Kesalahan kecil dalam parameter proses fusi dapat mengakibatkan cacat seperti incomplete fusion atau *voids*.

Dalam pengelasan gesek putar (*Rotary Friction Welding / RFW*), Panas dihasilkan akibat gesekan antara permukaan dua benda yang bergerak relatif satu sama lain. Mekanisme ini sangat efisien karena tidak memerlukan material tambahan atau sumber panas eksternal. Sambungan yang dihasilkan bersifat homogen dengan struktur fasa yang relatif seragam jika prosesnya tepat. Teknologi ini banyak diterapkan pada sambungan logam dan polimer rekayasa, termasuk komponen hasil cetak 3D.

Pemahaman tentang teori fusi sangat penting dalam konteks penelitian ini karena kekuatan sambungan sangat bergantung pada keberhasilan proses difusi dan pembentukan zona fusi yang merata. Material hasil cetak 3D memiliki kelemahan pada kekuatan antar layer, sehingga kemampuan fusi antar lapisan sangat menentukan kualitas akhir komponen. Oleh karena itu, parameter proses fusi perlu dikaji secara sistematis agar didapatkan kualitas sambungan yang optimal.

2.5 *Filament PLA (Polylactic Acid)*

Poli (asam laktat), atau Polylactic Acid (PLA), yang juga disebut polilaktida, merupakan jenis poliester alifatik termoplastik yang dapat terurai secara alami dan memiliki sifat bioaktif, yang diperoleh dari sumber daya yang dapat diperbarui seperti pati jagung (di wilayah Amerika Serikat dan Kanada), singkong, pati atau tepung (di kawasan Asia), serta tebu (secara global). Pada tahun 2010, PLA berada di urutan kedua dalam hal total penggunaan bioplastik di dunia.

PLA dapat membentuk stereokompleks yang sangat teratur, sehingga meningkatkan tingkat kristalinitasnya. Stabilitas termal paling optimal dicapai saat campuran PLA dan PDLA digunakan dengan perbandingan 1:1, meskipun peningkatan kristalinitas yang signifikan tetap terjadi bahkan pada konsentrasi PDLA yang lebih rendah (3–10%). Dalam kondisi ini, PDLA berfungsi sebagai agen nukleasi, sehingga mempercepat laju kristalisasi. Selain itu, biodegradasi PDLA berlangsung lebih lambat daripada PLA karena kristalinitasnya yang lebih tinggi. PLA juga memiliki modulus lentur yang lebih tinggi dibanding polistirena serta menunjukkan ketahanan panas yang baik..

Beberapa teknologi seperti proses annealing, menambahkan agen nukleasi, membuat komposit dengan serat atau nano partikel, memperpanjang rantai, serta memperkenalkan struktur silang telah diterapkan untuk meningkatkan sifat mekanik polimer asam polilaktat (PLA). PLA dapat diproses seperti termoplastik lain, misalnya menjadi serat melalui pemintalan lelehan atau dijadikan film. Sifat mekaniknya menyerupai polimer PETE, meskipun suhu operasi kontinu PLA jauh lebih rendah secara signifikan. Dengan energi permukaan tinggi, PLA mudah dicetak, sehingga banyak dimanfaatkan dalam teknologi pencetakan 3D. Kekuatan tarik PLA hasil cetak 3D telah ditentukan sebelumnya. Filamen PLA (Polylactic Acid) dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Filament PLA (Polylactic Acid)

2.6 Filament Nylon

Nylon (Poliamida) merupakan bahan yang sering dipakai dalam industri plastik karena kekuatan dan kelenturannya. Filamen Nylon biasanya memerlukan suhu ekstrusi sekitar 250 °C, meskipun beberapa produsen memungkinkan pencetakan pada suhu lebih rendah, kira-kira 220 °C, berdasarkan komposisi kimianya. Sebagian besar printer 3D tidak dilengkapi *hotend*. Khusus tetap mampu mencapai suhu 250°C dengan aman. Salah satu tantangan utama dalam penggunaan filament Nylon adalah sifat higroskopisnya, yang membuatnya mudah menyerap uap air dari udara., yang berarti dia dengan mudah menarik uap air dari lingkungannya

yang dapat menimbulkan masalah kualitas pencetakan, sehingga penyimpanan filamen sangat penting dan membutuhkan perhatian ekstra.[15].

Nylon menawarkan sifat mekanik yang baik, dengan tarik maksimum antara 40–85 MPa, level kekerasan 5/10, dan ketahanan 10/10. Suhu operasi maksimal berkisar antara 80–95 °C, dengan koefisien ekspansi termal 95 $\mu\text{m/m}\cdot^\circ\text{C}$ dan massa jenis 1,06–1,14 g/cm^3 . Nylon memiliki kapasitas pencetakan 8/10 dengan suhu bed 70–90 °C. Selain itu, Nylon memiliki sifat higroskopik, mampu menyerap lebih dari 10 % beratnya dalam air dalam 24 jam [16].

Sebagian besar printer 3D menggunakan PEEK dan PTFE. Kedua material ini mulai terurai di atas 240°C dan dapat terbakar, menghasilkan asap beracun. Oleh karena itu, untuk berhasil mencetak dengan filamen Nylon, dibutuhkan printer yang mampu mencapai suhu minimal 250°C..

Nylon memiliki keunggulan berupa ketangguhan dan fleksibilitas tinggi, tahan terhadap benturan, tidak menimbulkan bau tidak sedap saat dicetak, serta memiliki ketahanan aus yang baik. Nylon juga kurang rentan terhadap kondisi lingkungan, sehingga perlu disimpan dalam wadah kedap udara untuk mencegah kesalahan pencetakan, dan tidak cocok digunakan di lingkungan yang lembap [12].

Filament Nylon dapat dilihat pada gambar 2.4



Gambar 2.4 *Filament Nylon*

Sumber : (Fadhil, 2023)

2.7 **Mesin 3D Printer**

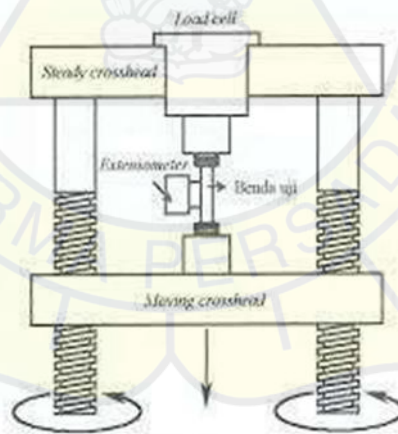
Mesin 3D Printer adalah mesin yang membuat objek 3D dengan bentuk apapun dari model digital 3D CAD sebagai perangkat lunak desain dan pencetakannya menggunakan teknologi manufaktur penambahan (*layer by layer*) [17]. Proses pencetakan pada mesin printer ini ialah dengan memanfaatkan proses pelelehan termoplastik yang dijalankan ekstrusi dari nozzle 3D Printer yang digerakkan oleh motor lalu dicetak pada printing bed yang mampu bergerak pada arah sumbu x, y, z [18].

Printer ini memiliki kemampuan khusus untuk mencetak objek secara presisi sesuai dengan desain 3D yang dibuat di komputer. Mesin 3D *Printer* menggunakan material cetak berupa filamen, yang tersedia dalam berbagai jenis, seperti termoplastik, kayu, logam, lilin, dan lain-lain. Di antara semua jenis filamen, termoplastik merupakan yang paling umum digunakan untuk mencetak produk dengan 3D *Printer*. [19].

2.8 Uji Kekuatan Tarik

Uji tarik adalah salah satu metode pengujian yang digunakan untuk mengetahui sifat mekanik suatu bahan. Dengan melakukan tarikan pada material, kita dapat mengamati bagaimana bahan tersebut merespons gaya tarik dan sejauh mana material mengalami pertambahan panjang. Peralatan yang digunakan untuk uji tarik harus memiliki cengkeraman yang kuat serta kekakuan tinggi (*highly stiff*) agar pengujian dapat berlangsung akurat. [14].

Berbagai hal bisa kita pelajari dari hasil uji tarik. Jika kita tetap menarik suatu bahan (dalam hal ini suatu spesimen) sampai putus, grafik ini memperlihatkan hubungan antara gaya tarik dan perubahan panjang bahan. Profil ini krusial bagi perancangan yang memakai bahan itu [20]. Mesin uji tarik memakai spesimen berukuran standar, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Mesin Uji Tarik Dilengkapi Spesimen Ukuran Standar

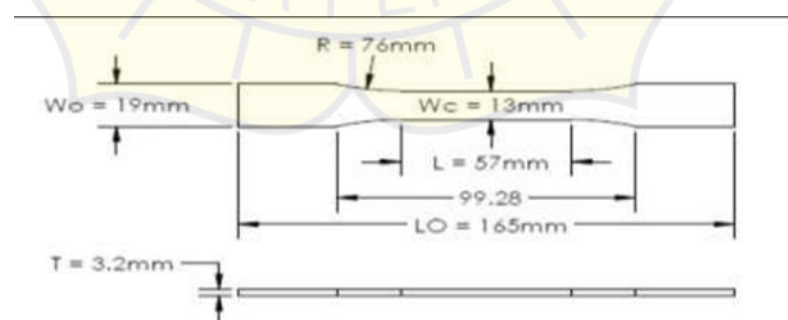
Sumber : (Lubis *et al.*, 2021)

Uji tarik dimaksudkan untuk memperoleh gambaran mengenai sifat serta perilaku suatu logam. Uji dilakukan dengan penambahan beban secara bertahap, sehingga terjadi pertambahan panjang yang proporsional dengan gaya yang

diterapkan. Proporsionalitas ini berlangsung sampai mencapai titik kesejajaran. Setelah melewati titik tersebut, penambahan panjang tidak lagi proporsional dengan penambahan beban, di mana beban yang sama menghasilkan penambahan panjang yang lebih besar, sampai akhirnya batang uji memanjang tanpa beban tambahan, yang menandakan material telah mengalami yield (luluh). Kondisi ini hanya berlangsung sesaat dan kemudian akan naik kembali

Spesimen uji seharusnya sesuai dengan standar dan spesifikasi ASTM E8 atau D638. Bentuk spesimen krusial untuk mencegah patah atau retak pada area *grip* maupun bagian lain. Penstandar dan bentuk spesimen agar retak dan patahan terjadi pada wilayah *gage length*. *Face* dan *grip* merupakan elemen penting; jika pengaturan tidak tepat, spesimen dapat meluncur atau bahkan retak di area *grip* (*jaw break*), sehingga menyajikan data yang tidak sah. Permukaan wajah wajib tertutup penuh di daerah kontak dengan *grip*. [3].

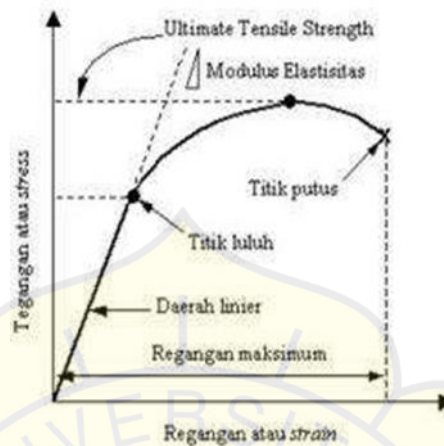
Untuk menghindari gesekan langsung antara spesimen uji dengan *face*, diterapkan pengaturan khusus. Standar dimensi serta ukuran spesimen pada uji tarik dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Standar dimensi dan ukuran untuk uji Tarik

Sumber : (Margono, *et al.*, 2023)

Beban yang diberikan pada bahan uji ditransmisikan lewat pegangan spesimen. Dimensi serta ukuran spesimen diadaptasi dengan standar pengujian yang ada. Contoh kurva hasil uji tarik dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Contoh kurva uji tarik

Tegangan pada kurva uji tarik adalah tegangan aksial rata-rata hasil pengujian. Tegangan ini dihitung dengan membagi beban yang diberikan dengan luas penampang awal spesimen.

$$\delta = \frac{P}{A_0} \text{----- (2.1)}$$

Regangan pada grafik tegangan-regangan teknik merupakan regangan linear rata-rata, yang dihitung dengan cara membagi penambahan panjang spesimen pasca pengujian dengan panjang awalnya..

$$e = \frac{L-L_0}{L_0} \text{----- (2.2)}$$

Kurva tegangan-regangan pada sebuah spesimen dipengaruhi oleh komposisi material, perlakuan panas, deformasi plastik, laju regangan, suhu, serta kondisi tegangan saat pengujian. Salah satu parameter penting untuk mendeskripsikan kurva ini pada logam adalah kekuatan tarik, kekuatan luluh atau titik luluh, persen

penambahan dan penyusutan luas. Dan parameter pertama adalah parameter kekuatan, sementara dua parameter akhir menunjukkan keuletan bahan.

Pada zona elastis kurva tegangan-regangan, tegangan sebanding dengan regangan. Deformasi pada zonaini bersifat sementara, dan spesimen akan kembali ke bentuk asal bila beban dihilangkan. Daerah ini disebut daerah elastis. Ketika beban melebihi kekuatan luluh, material memasuki daerah deformasi plastis, di mana deformasi menjadi permanen meskipun beban dilepas. Selain itu, tegangan yang diperlukan untuk melanjutkan deformasi plastis akan meningkat seiring penambahan regangan plastik.

Dari tegangan dan regangan yang diukur, dapat ditentukan nilai modulus elastisitas. Hubungan ini dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

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

Pada permulaan deformasi, pengerasan regang lebih tinggi daripada yang diperlukan untuk menyeimbangkan penyusutan areap enampang spesimen, sehingga tegangan teknik (sebanding dengan beban (F) terus naik seiring dengan meningkatny aregangan. Pada titik tertentu, penyusutan area penampang menjadi lebih utama dibandingkan dengan peningkatan tegangan akibat pengerasan regang..

Keadaan ini pertama kali muncul pada titik tertentu dalam spesimen yang relatif lebih lemah dibandingkan kondisi tanpa beban. Seluruh deformasi plastis selanjutnya terpusat di daerah ini, sehingga spesimen mulai mengalami penyempitan lokal. Karena penurunan luas penampang lintang lebih cepat daripada penambahan deformasi akibat pengerasan regang, beban yang diperlukan untuk melanjutkan perubahan bentuk spesimen akan menurun, begitu pula tegangan

teknik pada persamaan (1) akan menurun hingga spesimen akhirnya mengalami patah.

2.8.1 *Ultimate Tensile Strength (UTS)*

Merupakan parameter mekanik penting yang digunakan untuk menggambarkan kemampuan maksimum suatu material dalam menahan beban tarik sebelum akhirnya mengalami kegagalan. *UTS* menyatakan tingkat ketahanan material terhadap gaya yang cenderung menarik material hingga putus. Dalam praktik teknik, *UTS* digunakan sebagai acuan utama dalam perancangan struktur dan komponen mekanik, terutama yang bekerja dalam kondisi tarik.

Nilai *UTS* diperoleh melalui pengujian tarik di mana spesimen ditarik hingga mencapai beban maksimum sebelum terjadi patah. Nilai beban maksimum tersebut kemudian digunakan untuk menentukan seberapa besar kekuatan tarik material. *UTS* menjadi penentu utama kelayakan material untuk berbagai aplikasi, terutama jika material tersebut akan digunakan pada struktur yang memerlukan kekuatan tinggi dan ketahanan terhadap tegangan.

Dalam konteks material hasil cetak 3D atau sambungan fusi seperti *Rotary Friction Welding*, *UTS* sangat penting karena menunjukkan kualitas penyatuan antar material. Sambungan yang memiliki *UTS* mendekati material aslinya dapat dikatakan memiliki integritas struktural yang baik. Sebaliknya, jika *UTS* jauh lebih rendah dari material induk, maka hal tersebut mengindikasikan adanya kelemahan pada sambungan, seperti porositas, *incomplete fusion*, atau retak mikro.

Nilai *UTS* juga sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor proses. Pada proses cetak 3D misalnya, suhu *nozzle*, kecepatan pencetakan, orientasi layer, serta tingkat *infill* sangat berpengaruh terhadap nilai *UTS* akhir. Orientasi layer yang tidak sejajar dengan arah gaya tarik umumnya menghasilkan nilai *UTS* yang lebih rendah karena kekuatan antar lapisan lebih rentan. Oleh karena itu, pengendalian parameter proses sangat penting untuk mengoptimalkan *UTS*.

Pengukuran *UTS* tidak hanya memberikan informasi numerik, tetapi juga menjadi dasar dalam mengevaluasi dan membandingkan performa dari berbagai metode penyambungan atau teknik produksi. Dalam penelitian rekayasa, *UTS* digunakan sebagai tolak ukur awal untuk memutuskan apakah sebuah material atau metode sambungan layak untuk diterapkan dalam beban kerja sebenarnya. Oleh sebab itu, *UTS* selalu menjadi salah satu fokus utama dalam studi mekanik material.

2.8.2 *Strain* (Regangan)

Strain atau regangan adalah ukuran seberapa besar suatu material mengalami perubahan bentuk akibat gaya luar yang dikenakan padanya, khususnya gaya tarik. Regangan terjadi ketika material ditarik, sehingga panjangnya bertambah dibandingkan panjang awal sebelum diberi beban. Meskipun regangan tidak memiliki satuan, karena merupakan perbandingan antara dua panjang, nilainya sering kali dinyatakan dalam bentuk persen agar lebih mudah dianalisis.

Dalam uji tarik, *strain* menjadi indikator utama untuk menilai seberapa elastis atau plastis suatu material. *Strain* yang rendah biasanya ditemukan pada

material yang kaku dan rapuh, sedangkan *strain* yang tinggi umum dijumpai pada material yang fleksibel dan ulet. Oleh karena itu, pengukuran *strain* dapat memberikan informasi penting mengenai kemampuan deformasi suatu material, baik dalam kondisi elastis maupun plastis.

Regangan terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu *strain* elastis dan *strain* plastis. *Strain* elastis adalah regangan yang dapat kembali ke bentuk semula setelah gaya yang diterapkan dihilangkan, sedangkan *strain* plastis merupakan regangan permanen yang tertinggal setelah material mengalami deformasi melebihi batas elastisitasnya. Perbedaan antara kedua jenis *strain* ini sangat penting dalam memahami perilaku material ketika diberi beban secara berulang atau ekstrem.

Pada material termoplastik seperti PLA dan *Nylon*, nilai *strain* sangat dipengaruhi oleh suhu, jenis cetakan, orientasi layer, serta kualitas sambungan antar lapisan. Material PLA yang bersifat getas biasanya memiliki *strain* rendah, sementara *Nylon* yang lebih ulet mampu mengalami regangan lebih besar sebelum patah. Dalam penelitian sambungan multi-material hasil cetak 3D, perbedaan *Strain* dari tiap kombinasi material dapat memberikan gambaran jelas mengenai kelenturan sambungan.

Strain juga menjadi tolok ukur penting dalam evaluasi kualitas sambungan hasil proses fusi. Sambungan yang mampu mengalami regangan besar sebelum patah menunjukkan bahwa perpaduan antar material berhasil dengan baik. Sebaliknya, jika sambungan langsung patah pada nilai regangan yang rendah, hal tersebut mengindikasikan bahwa adhesi antar lapisan atau antar bahan tidak cukup kuat. Oleh karena itu, *strain* perlu dianalisis secara teliti untuk menilai kelayakan sambungan dalam aplikasi nyata.

2.8.3 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas atau yang biasa dikenal dengan sebutan modulus Young adalah ukuran kekakuan suatu material, yakni sejauh mana material mampu menahan deformasi elastis saat diberi gaya. Modulus ini mencerminkan seberapa besar tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan regangan tertentu dalam batas elastis. Semakin tinggi modulusnya, semakin kaku material tersebut, dan semakin sulit ia mengalami deformasi awal.

Dalam uji tarik, modulus elastisitas ditentukan dari kemiringan kurva tegangan- regangan pada bagian awal yang linier. Pada tahap ini, Hubungan antara tegangan dan regangan tetap proporsional, sesuai dengan Hukum *Hooke*. Oleh karena itu, modulus Young hanya berlaku pada zona elastis material, sebelum terjadinya deformasi plastis. Parameter ini penting untuk menentukan karakteristik elastik dari suatu material secara kuantitatif.

Kekakuan atau modulus elastisitas sangat menentukan bagaimana suatu material berperilaku saat diberi beban. Material yang memiliki modulus tinggi, seperti logam atau serat karbon, bersifat sangat kaku dan tidak mudah berubah bentuk. Sebaliknya, material dengan modulus rendah seperti karet atau beberapa jenis polimer akan mudah meregang meskipun diberi beban kecil. Dalam aplikasi teknik, pemilihan material sering kali didasarkan pada nilai modulus ini.

Pada material hasil cetak 3D atau sambungan fusi seperti *RFW*, nilai modulus dipengaruhi oleh struktur internal material, orientasi cetak, serta kualitas penyatuan antar lapisan. Material cetak dengan orientasi layer sejajar terhadap arah beban tarik cenderung memiliki modulus lebih tinggi dibanding orientasi tegak lurus. Hal ini

disebabkan oleh arah aliran beban yang memanfaatkan kekuatan layer secara maksimal.

Evaluasi terhadap modulus elastisitas sangat penting karena nilai ini memberikan gambaran apakah sambungan memiliki kekakuan yang mendekati material aslinya atau tidak. Jika modulus dari sambungan jauh lebih rendah, maka kemungkinan terdapat kecacatan atau ikatan yang tidak optimal antar lapisan. Oleh karena itu, modulus elastisitas menjadi salah satu parameter kunci yang harus dianalisis secara menyeluruh dalam penelitian pengujian sambungan hasil fusi.

