

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Melihat banyaknya kegunaan metode las titik di dunia industri khususnya otomotif, oleh karena itu banyak dilakukan penelitian untuk mengetahui lebih lanjut mengenai karakteristik sambungan las guna menciptakan sambungan las yang kuat dan optimal. Pengelasan titik material sejenis maupun tidak sejenis sudah banyak diteliti dengan menggunakan variasi parameter yaitu kuat arus pengelasan, waktu penekanan, material lasan, dan gas pelindung. Salah satu material yang sering digunakan dalam industri otomotif seperti pembuatan kerangka dan *body* mobil yaitu paduan antara *stainless steel* 304 dan baja karbon rendah karena dapat mengurangi beban mobil, mengurangi biaya produksi, lebih kuat serta irit bahan bakar. Ada beberapa jurnal penelitian yang memiliki korelasi dengan penelitian ini, diantaranya adalah :

Silaban dkk (2016), meneliti tentang pengaruh tegangan listrik dan waktu penekanan pada *spot welding* terhadap kekuatan geser pada aluminium. Penelitian ini menggunakan variasi waktu penekanan (0,5 detik, 1 detik, 1,5 detik, 2 detik dan tegangan listrik sebesar 1,6 Volt, 1,79 Volt, 2,02 Volt, 2,30 Volt). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa variasi waktu penekanan dengan tegangan berpengaruh terhadap nilai kekuatan tegangan geser. Adapun nilai kekuatan tegangan geser tertinggi berada pada waktu 2,5 detik dengan tegangan arus 2,30 V yaitu sebesar: 14,194 N/mm² sedangkan nilai kekuatan tegangan geser terendah berada pada waktu 0,5 detik dengan tegangan 1,60 V yaitu sebesar: 3,471 N/mm². Dari data tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan arus dan semakin lama waktu pengelasan maka kekuatan tegangan geser semakin besar pula, dan jika waktu tidak tetap maka hasil pengelasan akan mengalami kerusakan.

Fachruddin dkk (2016), melakukan penelitian tentang pengaruh variasi arus pengelasan titik (*spot welding*) terhadap kekuatan geser, kekerasan dan

struktur mikro pada sambungan dissimilar *stainless steel* AISI 304 dengan baja karbon rendah ST 41 dengan ketebalan plat 1 mm. Variasi arus pengelasan yang digunakan sebesar 1000 A, 1200 A, 1400 A, dan 1600 A dengan waktu pengelasan selama 1 detik. Hasil pengujian pada arus pengelasan 1000 A didapatkan nilai kekuatan geser sebesar $76,89 \pm 15,36$ kg/mm², untuk arus pengelasan 1200 A didapatkan nilai kekuatan geser sebesar $60,54 \pm 3,46$ kg/mm², untuk arus pengelasan 1400 A didapatkan nilai kekuatan geser sebesar $57,76 \pm 5,33$ kg/mm², dan arus pengelasan 1600 A didapatkan nilai kekuatan geser $50,89 \pm 3,28$ kg/mm². Dari hasil pengujian dan analisis menunjukkan bahwa seiring meningkatnya arus pengelasan, maka kekuatan geser akan semakin rendah. Hal ini dikarenakan arus pengelasan yang semakin besar akan menghasilkan daerah las yang lebar serta penembusan yang dalam sehingga menghasilkan kekuatan tarik yang rendah serta menambah kerapuhan material. Pada hasil uji struktur mikro menunjukkan pada arus pengelasan 1000 A didominasi oleh struktur ferrit *acicular* yang berfungsi sebagai *interlocking structure* yang mampu menghambat laju perambatan retak.

Amin (2017), melakukan penelitian tentang pengaruh variasi arus listrik terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro sambungan las titik (*spot welding*) logam *dissimilar stainless steel* dan baja karbon rendah. Variasi arus yang digunakan adalah 60 A, 70 A, dan 80 A. Waktu pengelasan yang digunakan adalah 4 detik. Spesimen uji menggunakan material *stainless steel* dengan ketebalan 1,2 mm dan baja karbon rendah dengan ketebalan 0,9 mm. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan arus listrik dari 60 A ke 70 A berdampak pada kenaikan kekuatan tarik. Sedangkan peningkatan arus listrik dari 70 A ke 80 A memperlihatkan penurunan kekuatan tarik. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa kondisi terbaik terjadi pada arus listrik 70 A yang memberikan kekuatan tarik sebesar 190,920 kN/mm². Pengamatan struktur mikro sambungan las titik memiliki *fusion zone* yang tidak simetris karena adanya perbedaan konduktivitas thermal bahan logam. Variasi dengan arus listrik 70 A menghasilkan daerah HAZ yang didominasi oleh struktur perlit

dengan butiran yang lebih halus dan homogen dibandingkan spesimen lainnya.

Hendrawan dan Rusmawan (2014), meneliti tentang pengaruh arus dan waktu pengelasan terhadap sifat mekanik sambungan las titik (*spot welding*) logam tak sejenis. Penelitian ini menggunakan material baja karbon rendah dan baja tahan karat austenit tipe 316L dengan tebal masing-masing 0,9 mm. Parameter variasi kuat arus yang digunakan yaitu 5000 A, 6000 A, dan 7000 A, Sedangkan variasi waktu adalah 0,4 dt, 0,5 dt, dan 0,6 dt. Hasil pengujian menunjukkan pada kuat arus 5000 A dengan waktu 0,4, 0,5, 0,6 detik memiliki daya beban sebesar 4,857 kN, 4,860 kN, 5,160 kN. Pada kuat arus 6000 A dengan waktu yang sama memiliki daya beban sebesar 4,940 kN, 4,977 kN, 5,313 kN. Sedangkan pada kuat arus 7000 A memiliki daya beban sebesar 5,267 kN, 5,277 kN, 5,323 kN. Nilai kekerasan yang paling optimal pada daerah logam induk adalah pada variasi kuat arus 7000 A dan waktu 0,6 detik dengan material baja karbon rendah terjadi peningkatan rata-rata nilai kekerasan yaitu 3,47 kali yang lebih besar dibanding nilai kekerasan rata-rata pada baja karbon tahan karat yaitu 2,06 kali. Kenaikan nilai daya beban dukung tarik geser dipengaruhi oleh peningkatan dari kuat arus dan waktu yang digunakan, sedangkan nilai kekerasan dari pengujian kekerasan ini dipengaruhi oleh masukan panas dan pendinginan cepat.

Anrinal dan Hendri (2012), meneliti tentang analisa kekuatan tarik hasil *spot welding* baja karbon rendah. Material yang digunakan adalah plat baja karbon rendah ST 34 dengan ketebalan 1,5 mm dengan parameter variasi waktu tekan pengelasan adalah 20 detik, 25 detik, dan 30 detik, serta arus pengelasan yang digunakan adalah 70 A. Hasil dari grafik pengujian tegangan tarik menunjukkan bahwa semakin lama waktu pengelasan maka semakin besar tegangan tarik yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh waktu penekanan yang merupakan parameter sangat penting pada proses pengelasan. Semakin lama waktu pengelasan juga mengakibatkan diameter *nugget* semakin besar. Dengan melihat besarnya beban yang diberikan terhadap benda uji pada masing-masing sampel, maka dapat dilihat perbedaan

beban yang diberikan tidak terlalu jauh berbeda. Hal ini disebabkan kuatnya sambungan yang terjadi, sehingga berdampak pada benda uji atau kerapatan antara benda uji sangat berpengaruh untuk menghasilkan besarnya gumpalan (*nugget*).

Lisa dkk (2011), melakukan penelitian eksperimental tentang pengaruh kuat arus dan waktu pengelasan pada proses las titik (*spot welding*) terhadap kekuatan tarik dan mikrostruktur hasil las dari baja fasa ganda (*ferrite-martensite*). Bahan yang digunakan adalah lembaran plat AISI 1005 dengan tebal 1 mm yang telah di *treatment* menjadi baja fasa ganda. Variabel bebas yang digunakan adalah besar arus yaitu 900 A, 1600 A, 1850 A serta waktu penekanan pengelasan yaitu 0,25 detik, 0,5 detik, 0,75 detik dan 1 detik. Variabel terikat adalah kekuatan sambungan dan bentuk mikrostruktur yang dihasilkan dari pengelasan RSW (*Resistance Spot Welding*) pada baja fasa ganda. Variabel terkontrol adalah gaya tekan elektroda pada benda kerja saat pengelasan. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan tarik sambungan las atau kekuatan gesernya memiliki nilai rata-rata yang meningkat yang berarti semakin besar *heat input* (akibat perubahan kuat arus dan waktu pengelasan) maka menghasilkan diameter *nugget* semakin meningkat hal ini yang kemungkinan menyebabkan *tensile shear forcenya* meningkat dan kekuatan maksimum ditunjukkan pada waktu pengelasan 1 detik yaitu sebesar 237,0724 N/mm².

Mustakim dkk (2017), melakukan penelitian tentang pengaruh arus dan waktu *spot welding* terhadap sifat mekanik sambungan *dissimilar* AISI 1003 dengan AISI 1025. Penelitian ini mengkombinasikan waktu dengan variasi 14, 17, 20, 23, dan 26 *cycle* dan variasi arus listrik yang digunakan adalah 49, 52, 55, 58, dan 61 A. Hasil pengujian tarik nilai kekuatan tarik tertinggi terdapat pada variasi 26 *cycle* dan 58 A dengan nilai kekuatan tarik sebesar 27,03 kg/mm². Hal ini disebabkan karena menyatunya semua mur pada plat hingga menyebabkan alir rusak. Sedangkan nilai kekerasan tertinggi terdapat pada variasi waktu 23 *cycle* dan arus 52 A. Pada hasil uji struktur mikro daerah HAZ terbentuk struktur *ferrite* namun terlihat lebih halus

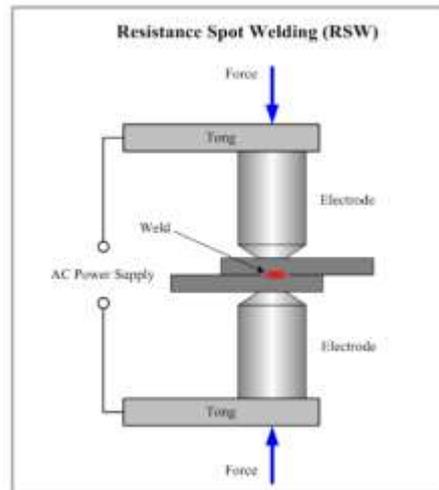
dibandingkan logam induk, sementara itu pada *weld zone* terdapat struktur *acicular ferrite*, *widmenstatten ferrite*, dan *grain boundary ferrite*. Semakin tinggi waktu dan arus pengelasan struktur *grain boundary* semakin mendominasi dan spesimen cenderung terlihat feritik.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan dengan memvariasikan parameter pengelasan seperti, waktu, arus listrik, dan tegangan listrik dapat mempengaruhi sifat mekanis material. Diameter *nugget* lasan dan nilai beban tarik yang didapat akan semakin besar seiring dengan meningkatnya variasi parameter pengelasan yang ditentukan. Metode *resistance spot welding* ini masih perlu dilakukan pengembangan penelitian lebih lanjut khususnya pada variasi material dan dimensi elektroda supaya didapatkan hasil yang optimal dan bisa diterapkan pada dunia industri.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Las Titik

Las titik (*Resistance Spot Welding*) adalah salah satu metode pengelasan yang prinsip kerjanya menggunakan arus listrik untuk plat logam. Penyambungan dilakukan dengan menekan permukaan plat diantara elektroda dan arus listrik dialirkan pada saat yang bersamaan sehingga permukaan logam menjadi panas dan mencair karena adanya proses resistansi listrik. Pengelasan titik dibandingkan dengan pengelasan lainnya memiliki keunggulan yaitu prosesnya cepat, sehingga cocok untuk produksi massal, suplai panas yang diberikan cukup akurat dan reguler, sifat mekanik hasil las kompetitif dengan logam induk dan tidak memerlukan kawat las.



Gambar 2.1 *Resistance Spot Welding (RSW)*

Sumber : <https://mechanicalstudents.com/resistance-spot-welding-concept-advantages-limitations-and-applications/>

Gambar 2.1 Menunjukkan skema pengelasan *spot welding* dengan menunjukkan posisi spesimen las berada di tengah elektroda. *Weld metal* akan terbentuk setelah spesimen diberikan penekanan dari kedua ujung elektroda serta dialiri arus pengelasan.

2.2.2 Parameter Las Titik

Parameter las titik dapat diartikan sebagai variabel-variabel yang berpengaruh terhadap kondisi dan hasil kerja dari las titik. Dalam pengerjaan aktual terdapat begitu banyak parameter dari las titik dan bahkan beberapa ilmuwan menemukan lebih dari 100 poin parameter yang mempengaruhi las titik. Beberapa parameter yang paling berpengaruh untuk mendapatkan pemahaman yang sistematis sebagai berikut :

a) Arus Pengelasan (*Weld Current*)

Weld current adalah parameter paling penting dalam las titik. Ukuran *weld nugget* bertambah dengan cepat seiring bertambahnya *weld current*, tetapi arus yang terlalu tinggi akan mengakibatkan kerusakan dan keausan elektroda. Harga *weld current* harus sesuai dengan sifat dari material yang akan di las. Dalam menentukan

besar *weld current*, arus dinaikan secara perlahan sampai adanya serpihan las (*weld spatter*) yang tercipta diantara lempengan metal tersebut. Ini menandakan bahwa arus yang tepat sudah terpenuhi.

b) Waktu Las (*Welding Time*)

Waktu las yaitu waktu ketika logam dijepit dan dialiri arus listrik agar temperatur logam naik dan menjadi satu. Panas yang dihasilkan elektroda berbanding lurus dengan waktu las. Untuk *spot welding* lamanya berkisar antara 3-50 Hz. Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam menentukan *weld time*:

- 1) *Weld time* harus sekecil mungkin. *Weld time* yang terlalu lama akan merusak material dan elektroda.
- 2) *Weld time* harus memastikan diameter *weld nugget* cukup besar dalam pengelasan pelat yang tebal.
- 3) *Weld time* harus seminimal mungkin menghindari adanya indentasi pada material akibat penekanan oleh elektroda.

c) Waktu Tenggang (*Hold Time*)

Hold time atau disebut juga *cooling time* adalah waktu dimana arus telah dihentikan tetapi penekanan masih dipertahankan. *Hold time* berfungsi agar *weld nugget* dapat mengeras. *Hold time* yang terlalu lama akan menyebabkan panas dari lasan menjalar ke elektroda yang menyebabkan elektroda rentan terhadap aus. *Hold time* yang terlalu lama dapat juga menyebabkan material berkarbon tinggi (lebih dari 0.1%) menjadi terlalu getas.

d) Resistansi Kontak

Resistansi kontak pada muka las adalah parameter yang berhubungan dengan material benda kerja walaupun untuk proses pengaruhnya sangat dinamis. Resistansi kontak yang tinggi dipengaruhi oleh berbagai pengotor pada permukaan benda kerja seperti oksidan, uap air, lemak, minyak, debu dan lainnya. Pada saat benda dipanaskan, pengotor ini akan menjadi yang pertama

untuk terbakar, sehingga seiring naiknya temperatur, semakin kecil pula resistansi kontak suatu logam.

2.2.3 Heat Input

Panas yang terjadi selama proses pengelasan sangat berpengaruh terhadap distribusi suhu, tegangan sisa dan distorsi. Panas juga dapat mempengaruhi transformasi fasa sehingga dapat berpengaruh pada sifat fisik dan mekanik las. Adapun masukan panas (*heat input*) yang masuk pada material selama proses pengelasan (*resistance spot welding*) dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$H = I^2 \cdot R \cdot t \dots\dots\dots (2.1)$$

$$R = \frac{V}{I}$$

Dengan : H = Total *Heat Input* (Joule)

R = Resistansi (Ohm)

t = Waktu (s)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

2.3 Pengelasan Material Tidak Jenis (*Dissimilar Metal Welding*)

Salah satu teknik pengelasan yang dikembangkan saat ini adalah teknik penyambungan dua jenis logam tidak sejenis atau *dissimilar metal*. Sambungan logam tidak sejenis merupakan penyambungan dua jenis logam yang berbeda sifatnya dengan cara dilas. Penyambungan logam tidak sejenis ini bertujuan meringankan bobot misalnya pada kendaraan sehingga dapat mengefisienkan pemakaian bahan bakar. Pengelasan logam tidak sejenis dapat lebih rumit dari pengelasan logam sejenis karena siklus termal yang berbeda dialami masing-masing logam (Fachruddin dkk, 2016). Pengelasan material tidak sejenis ini masih sering menemui kendala yaitu spesimen yang dilas seringkali tidak menempel dengan kuat. Kendala yang terjadi disebabkan oleh variasi kuat arus dan waktu penekanan belum mendapatkan pengaturan yang sesuai, mungkin karena variasi kuat arus dan waktu penekanan yang

dipilih terlalu kecil atau terlalu besar (Mustakim, 2017). Pada penelitian ini material yang akan disambung menggunakan *resistance spot welding* adalah *stainless steel 304* dengan baja karbon rendah SPHC JIS G3131.

2.3.1 Baja Tahan Karat Tipe 304 (*Stainless Steel 304*)

Baja paduan *Stainless Steel 304* merupakan jenis baja tahan karat yang serba guna dan paling banyak digunakan. Komposisi kimia, kemampuan las, ketahanan korosi, dan kekuatan mekaniknya sangat baik dengan harga yang relatif terjangkau. *Stainless steel 304* banyak digunakan dalam dunia industri maupun skala kecil seperti peralatan rumah tangga, instrumen bedah, peralatan industri, pabrik makanan, toko perhiasan dan konstruksi gedung-gedung. Baja paduan *stainless steel 304* memiliki komposisi 0.0425% C, 0.034% P, 1.19% Mn, 0.006% S, 0.049% Si, 8.15% Ni, 18.24% Cr, dan sisanya Fe. Adapun sifat mekanik dari *stainless steel 304* dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Sifat mekanik *stainless steel 304*
Sumber : <https://www.lenntech.com/stainless-steel-304.htm>

<i>Mechanical properties</i>	<i>Value</i>
<i>Hardness, Rockwell Ball</i>	82 HRB
<i>Tensile Strength, Ultimate</i>	621 MPa
<i>Tensile Strength, Yield</i>	290 MPa
<i>Elongation at Brake</i>	55 %
<i>Modulus of elasticity</i>	193 GPa

2.3.2 Baja Karbon Rendah SPHC JIS G3131

Baja karbon rendah adalah material yang dalam penggunaannya kebanyakan sebagai bahan dari konstruksi umum. Pada umumnya baja ini dipakai sebagai bahan untuk membuat balok, plat untuk gedung-gedung, neraca timbangan, jembatan dan kapal. Kandungan karbon pada baja karbon rendah ini antara 0,05 sampai 0.25 % C sehingga baja

karbon rendah ini mempunyai keuletan dan ketangguhan lebih kuat, namun kekerasannya rendah/lunak, tidak tahan aus, dan kemampuan regangnya kurang. Dengan kandungan karbon yang rendah ini menyebabkan struktur yang dimiliki oleh baja karbon rendah didominasi struktur *ferrite* dan *pearlite*.

Baja SPHC merupakan baja yang dihasilkan lewat proses *hot rolled* dengan kualitas komersil. Baja SPHC sering digunakan dalam industri terutama pembuatan pipa dan tabung. Selain itu juga digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi termasuk pelat kapal dan pelat kontainer. Pada beberapa industri otomotif juga menggunakan baja ini seperti pembuatan suku cadang. Adapun sifat mekanik baja karbon rendah SPHC JIS G3131 dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2 Sifat mekanik baja karbon rendah SPHC JIS G3131

Sumber : <https://www.materialgrades.com/jis-g-3131-commercial-hot-rolled-sphc-steels-24.html>

<i>Mechanical properties</i>	<i>Value</i>
<i>Tensile strength</i>	270 N/mm ²
<i>Elongation</i>	27 %

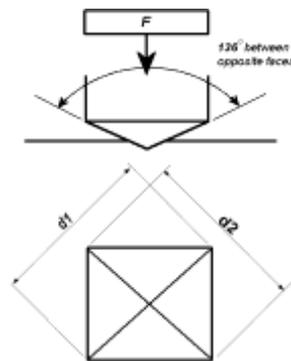
2.4 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk melihat kumpulan fasa-fasa dari sebuah material logam dan paduannya melalui teknik metalografi sehingga dapat diketahui sifat dan karakteristik dari material tersebut. Pengujian dilakukan dengan menggunakan mikroskop dan spesimen diamati dengan perbesaran sekitar 20 hingga 3000 kali atau lebih. Pengujian mikro memberikan informasi tentang bentuk struktur, ukuran butir, dan banyaknya bagian struktur yang berbeda. Langkah-langkah yang dilakukan sebelum pengujian mikro adalah pemotongan spesimen, selanjutnya spesimen diletakan pada cetakan resin dan dilakukan pengamplasan agar spesimen dapat dengan mudah diamati saat uji struktur mikro. Pengamplasan dilakukan secara perlahan dari yang kasar hingga paling halus, dan pada sisi permukaan dipoles autosol agar spesimen mengkilat. Langkah terakhir adalah pemberian

cairan etsa pada permukaan material agar struktur material logam terlihat dengan jelas.

2.5 Pengujian Kekerasan *Vickers*

Pengujian kekerasan *vickers* adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu material atau sebagai kemampuan suatu material untuk menerima beban identasi atau penetrasi (penekanan). Dalam pengujian ini digunakan indenter berlian piramida dengan sudut 136° , hasil indentasi yang dihasilkan dari indenter *vickers* sangat jelas, sehingga memiliki akurasi yang sangat baik. Metode ini diaplikasikan pada logam yang memiliki nilai *vickers* rendah 5 HV pada logam lunak hingga logam dengan nilai *vickers* tinggi sekitar 1500 HV pada material logam yang sangat keras. Beban yang diberikan antara 15 hingga 1000 gram dan waktu yang digunakan dalam pembebanan identasi biasanya 30 detik. Angka kekerasan *vickers* (HV) dapat didefinisikan sebagai hasil bagi (koefisien) dari beban uji (P) dengan luas permukaan bekas luka tekan (injakan) dari indenter (diagonalnya) yang dikalikan dengan $\sin(136^\circ/2)$.



Gambar 2.2 Pengujian kekerasan *vickers* dan bentuk indenter
 Sumber : <https://www.mealabs-alatukur.com/2016/12/metode-pengujian-vickers.html>

Persamaan 2.2 dalam menentukan nilai kekerasan dengan metode *Vickers* ini dapat dituliskan, sebagai berikut:

$$HV = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan: HV = Angka kekerasan *Vickers*

P = Beban (Kg)

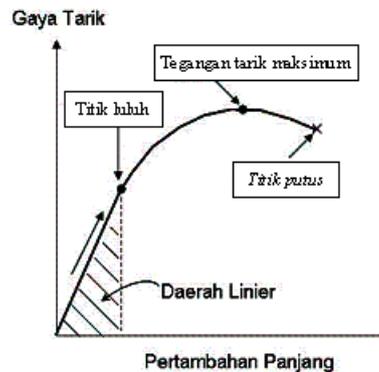
d = Diagonal, rata-rata ukuran dari bekas injakan d_1 dan d_2 (mm)

θ = Sudut antara permukaan intan yang berhadapan 136°

2.6 Pengujian Tarik

Pengujian tarik ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekuatan suatu bahan material/bahan dengan cara memberikan beban gaya. Pengujian ini mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara perlahan. Dalam rekayasa teknik desain produk hasil pengujian ini sangat penting karena menghasilkan data kekuatan material. Bentuk spesimen dalam pengujian tarik ini adalah plat, pejal dan pipa silinder yang biasanya dibuat sesuai dengan standar ASTM, AWS, DIN, dan JIM. Pengujian tarik ini juga digunakan untuk mengetahui sifat mekanik dan kekuatan sambungan las dalam menahan beban yang diberikan (Hendrawan & Rusmawan, 2014). Beban yang diberikan pada pengujian ini berupa gaya tarik sumbu yang bertambah besar secara kontinyu, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan terhadap perpanjangan yang dialami benda uji dan menghasilkan kurva gaya perpanjangan (*extension*) yang dapat dilihat pada gambar 2.3.

Membuat grafik kurva tegangan-regangan atau gaya perpanjangan diperlukan beberapa parameter yaitu kekuatan tarik, kekuatan luluh, perpanjangan dan pengurangan luas. Bentuk kurva yang diperoleh juga dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya komposisi material, perlakuan panas, deformasi plastis, dan temperatur.



Gambar 2.3 Grafik hasil pengujian tarik berupa kurva gaya-perpanjangan

Sumber : <http://www.infometrik.com/2009/09/mengenal-uji-tarik-dan-sifat-sifat-mekanik-logam/>

Dari gambar 2.3 ada tiga parameter yang dapat dilihat yaitu titik luluh, tegangan maksimum dan titik putus. Titik luluh merupakan titik dimana material mengalami perubahan fase dari perilaku elastis ke awal perilaku plastis. Tegangan maksimum merupakan tegangan batas tegangan atau kekuatan material yang mampu ditahan sebelum mengalami patah. Titik putus merupakan titik dimana material uji mengalami perpatahan atau putus. Adapun untuk tegangan geser sendiri dapat dihitung dengan membagi nilai beban yang didapat dengan luas penampang, dimana pada penelitian ini luas penampangnya berupa lingkaran (*nugget*) yang terbentuk dari pengelasan. Untuk mencari nilai tegangan geser dapat dihitung menggunakan persamaan 2.2 sebagai berikut :

$$\tau = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan : τ = Tegangan geser (N/mm²)

P = Kapasitas beban tarik (N)

A = Luas penampang (mm²)