

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Megantoro (2011) yang melakukan penelitian tentang pengaruh perbedaan *tool shoulder* terhadap sifat mekanis dan biaya pengelasan pada Aluminium 5083 dengan metode *friction stir welding*, dari penelitian yang dilakukan dengan variasi diameter *shoulder* 16, 18, dan 20 mm hasil yang dicapai dari penelitian tersebut adalah sebagai berikut :

1. Pada diameter *shoulder* 16 mm diperoleh kekuatan tariknya sebesar 168,5 MPa dan sudut tekuk 47°.
2. Pada diameter *shoulder* 18 mm diperoleh kekuatan tariknya sebesar 226,07 MPa dan sudut tekuk 80°.
3. Pada diameter *shoulder* 20 mm diperoleh kekuatan tariknya sebesar 128,44 MPa dan sudut tekuk 67,5°.

Dari penelitian yang dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa *probe* dengan diameter *shoulder* 18 mm menghasilkan lasan dengan kualitas paling baik yaitu dengan kuat tarik 226 MPa sudut tekuk sampai 80° dan kekerasan sebesar 133 pada daerah HAZ. Dan untuk biaya pengelasan metode FSW jauh lebih murah dibandingkan dengan GTAW dan GMAW.

Sudrajat (2013) Pada penelitiannya tentang pengaruh diameter Shoulder dan Welding Speed terhadap kekuatan tarik sambungan las Alumunium dengan metode FSW didapati bahwa Penambahan dimensi *shoulder* berpengaruh pada kekuatan tarik hasil lasan, terbukti pada perubahan diameter *shoulder* dari 8 mm ke 10 mm kekuatan tarik hasil lasan meningkat kemudian turun pada diameter 12 mm, dan Nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada variasi diameter *shoulder* 10 mm dengan kecepatan pengelasan 74 mm/menit sebesar 114,22 MPa atau sebesar 77,17 % dari logam induk dan terendah didapat pada variasi diameter *shoulder* 8 mm dengan kecepatan pengelasan 42 mm/menit yaitu sebesar 86,22 MPa atau sebesar 58,25 % dari logam induk.

Kusuma (2011), meneliti tentang pengaruh diameter *shoulder* terhadap metalurgi aluminium 5083 pada proses *friction stir welding* (FSW). Hasil dari pengujian foto makro menunjukkan bahwa terdapat cacat *wormholes* berupa *incomplete penetration* dan luas penampang cacatnya yaitu 0,1974 mm² untuk

diameter *shoulder* 16 mm; 0,1307 mm² untuk diameter *shoulder* 18 mm; dan 0,3303 mm² untuk diameter *shoulder* 20 mm.

2.2 Aluminium

Aluminium terbagi dalam dua jenis yaitu aluminium cetak atau cor (*cast product*) dan aluminium tempa (*wrought product*). Aluminium tuang memiliki biaya total yang rendah bila dibandingkan dengan aluminium tempa karena aluminium jenis ini memiliki titik lebur yang rendah, sehingga energi yang dibutuhkan lebih rendah. Namun aluminium tuang memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan dengan aluminium tempa. Material ini banyak digunakan pada struktur atau part-part yang menginginkan beban yang ringan dan tahan karat, karena material ini memiliki berat jenis rendah dan ketahanan karat yang baik. Pada dasarnya Aluminium memiliki beberapa sifat utama yaitu:

1. Ringan berat jenis rendah (2,7 gr/cm³), hanya 1/3 baja
2. *Strength to weight ratio* (kekuatan/berat) : sangat baik
3. Temperatur lebur rendah (660°C), sehingga peralatan peleburan lebih sederhana
4. Sifat mampu cor sangat baik
5. Sifat mampu mesin baik
6. Sifat permukaan baik
7. Ketahanan korosi baik
8. Konduktor panas dan listrik yang baik
9. Mudah dipadu dengan unsur lain untuk menghasilkan sifat yang diinginkan

2.2.1 Klasifikasi Paduan Aluminium

Menurut Tata Surdia (1984:135), paduan aluminium diklasifikasikan dalam berbagai standar oleh berbagai negara di dunia. Saat ini klasifikasi yang sangat terkenal adalah standar *Aluminium Association* di Amerika (AA) yang didasarkan atas standar terdahulu dari Alcoa (*Aluminium Company of America*). Paduan tempaan dinyatakan dengan satu angka atau dua angka "S", sedangkan paduan coran dinyatakan dengan tiga angka "S". Standard AA menggunakan penandaan dengan empat angka sebagai berikut:

1. Angka pertama menyatakan sistem paduan dengan unsur-unsur yang dipadukan atau ditambahkan (1:Al murni; 2:Al-Cu; 3:Al-Mn; 4:Al-Si; 5:Al-Mg; 6:Al-Mg-Si dan 7:Al-Zn).
2. Angka kedua menyatakan kemurnian dalam paduan yang dimodifikasi dan aluminium murni.
3. Angka ketiga dan keempat dimaksudkan untuk tanda Alcoa terdahulu kecuali huruf S. Sebagai contoh 3S sebagai 3003 serta 61 S sebagai 6061.

Berdasarkan klasifikasi di atas, aluminium dapat dikelompokkan menurut jenis paduannya. Sifat aluminium dari berbagai paduan meliputi:

1. Al-Murni

Aluminium murni merupakan aluminium dengan komposisi kadar kemurnian mencapai 99.85 % dan ada juga yang mencapai 99,999 %. Hal ini menunjukkan sifat-sifat fisik Al dan sifat-sifat mekaniknya. Sifat ketahanan korosi dapat berubah menurut kemurnian aluminium. Untuk kemurnian 99,0 % atau di atasnya dapat bertahan bertahun-tahun, sedangkan untuk hantaran listrik aluminiumnya kira-kira 65 % dari hantaran listrik tembaga.

2. Al-Cu

Tembaga adalah salah satu unsur paduan penting yang digunakan pada Al karena dengan paduan ini akan membentuk *solid-solution strengthening* dan dengan *heat treatment* yang sesuai dapat meningkatkan kekuatannya dengan membentuk *precipitate*. Kelarutan maksimal Cu di dalam Al adalah pada kandungan 5,65 % Cu dengan temperatur berkisar 550 °C. Kelarutan Cu akan turun sesuai dengan penurunan temperatur. Pada temperatur ruang batas kelarutan Cu di dalam Al adalah kurang dari 0,1 %.

3. Al-Mn

Mangan merupakan unsur yang memperkuat aluminium tanpa mengurangi ketahanan korosinya dan dipakai untuk membuat paduan yang tahan korosi. Sebenarnya paduan Al-1,2%Mn dan Al-1,2%Mn-1,0%Mg dinamakan paduan 3003 dan 3004 yang dipergunakan sebagai paduan tahan korosi tanpa perlakuan panas. (Surdia Tata, 1984 :136-137).

4. Al-Si

Kandungan Si pada aluminium memberikan beberapa keuntungan seperti hasil permukaan yang baik. Paduan Al-Si sangat baik kecairannya dan sangat baik untuk paduan coran (*cast*). Sebagai bahan tambahan, Si mempunyai ketahanan korosi yang baik, ringan, koefisien muai yang kecil dan sebagai penghantar listrik yang baik juga panas koefisien pemuaiannya termalnya sangat rendah. Oleh karena itu paduan ini mempunyai koefisien yang rendah apabila ditambah Si lebih banyak.

5. Al-Mg

Pengaruh Mg di dalam paduan Al-Mg mempunyai pengaruh yang hampir sama dengan pengaruh Cu di dalam paduan aluminium. Magnesium memberikan pengaruh baik yaitu mempermudah proses penuangan, meningkatkan kemampuan pengerjaan mesin, meningkatkan daya tahan terhadap korosi, meningkatkan kekuatan mekanis, menghaluskan butiran kristal secara efektif dan meningkatkan ketahanan beban kejut atau impact. Magnesium juga memberikan pengaruh buruk yaitu meningkatkan kemungkinan timbulnya cacat pada hasil pengecoran.

6. Paduan Al-Mg-Si

Paduan Al, Si dan Mg membentuk senyawa Magnesium Silikat ($MgSi$) yang akan membentuk eutektik pada sistem paduan $AlMg_2Si$. Paduan dalam sistem ini mempunyai kekuatan yang kurang sebagai bahan tempaan dibandingkan dengan paduan-paduan lainnya tetapi sangat liat, sangat baik untuk ekstrusi, sangat baik untuk mampu bentuk yang tinggi pada temperatur biasa, tahan korosi dan sebagai tambahan dapat diperkuat dengan perlakuan panas setelah pengerjaan (Surdia Tata, 1984 :140).

7. Paduan AL-Zn

Paduan ini lebih banyak mengandung aluminium dan merupakan memiliki ketahanan korosi yang baik. Dalam penggunaannya biasa diaplikasikan untuk konstruksi tempat duduk pesawat terbang, perkantoran dan konstruksi lainnya yang membutuhkan perbandingan antara ketahanan korosi dan berat yang tidak terlalu besar.

2.3 Pengertian pengelasan.

Berdasarkan pengertian dari *Deutche Industrie Normen* (DIN), las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam

keadaan cair. Penggolongan jenis las menurut cara kerjanya dibagi dalam:

1. Pengelasan cair.

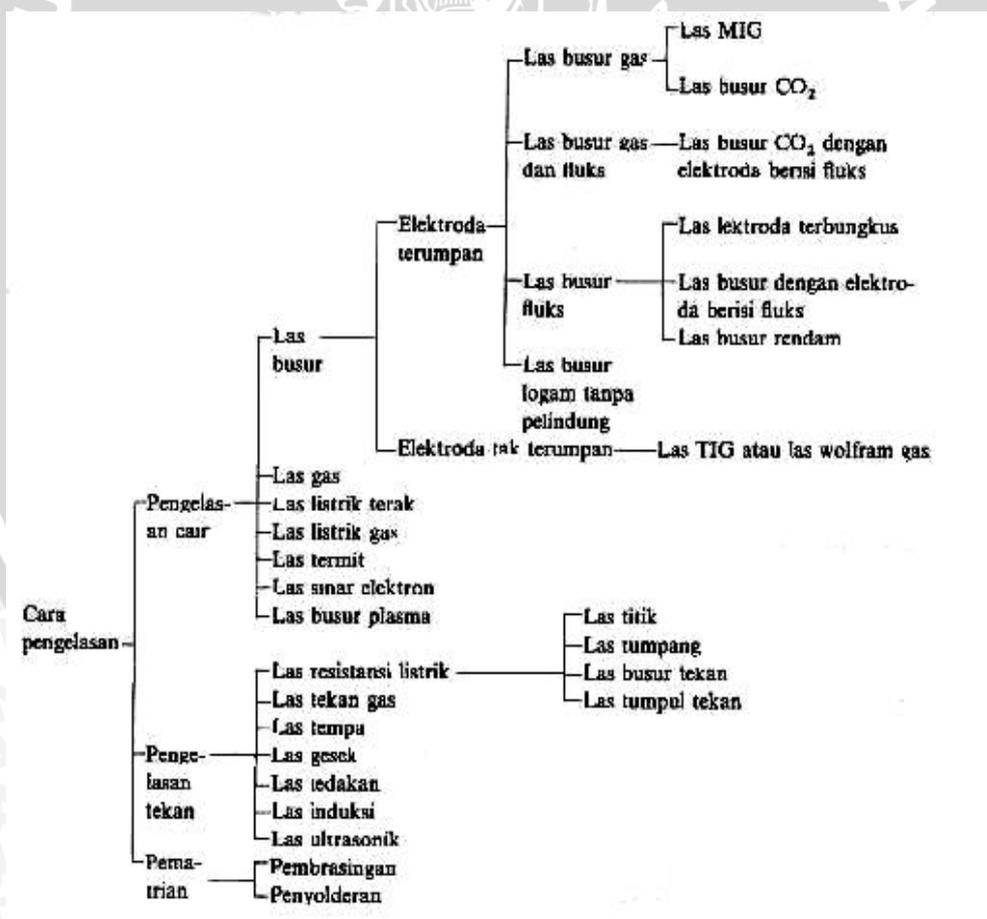
Cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar.

2. Pengelasan tekan.

Pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga menjadi satu.

3. Pematrian.

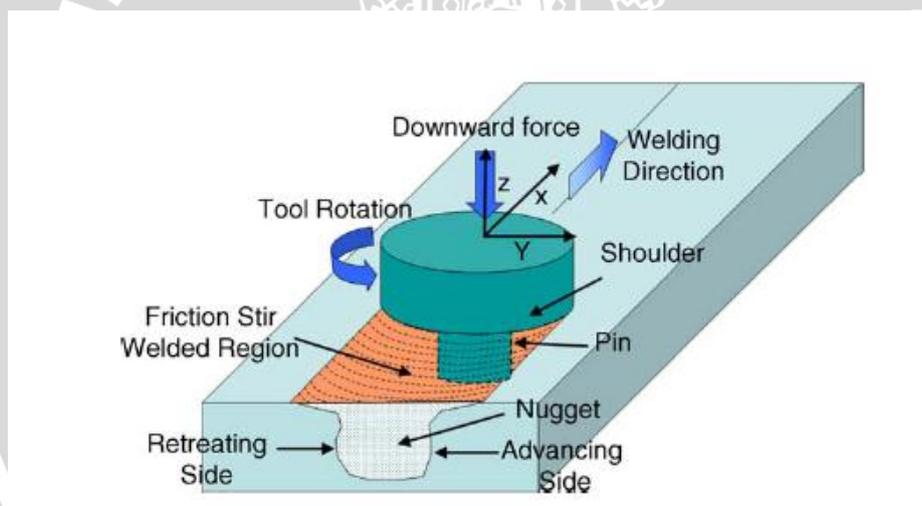
Pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah.



Gambar 2.1 Klasifikasi Pengelasan
Sumber: Wiryosumarto, 1994

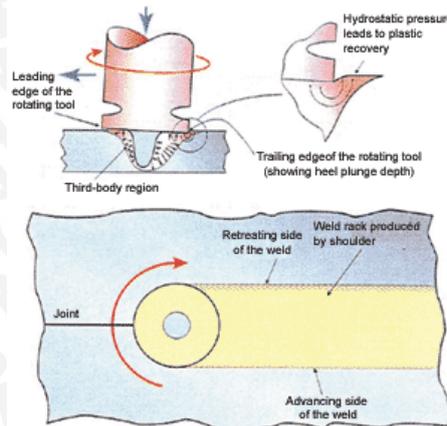
2.4 Las FSW (*Friction Stir Welding*)

Friction stir welding (FSW) merupakan salah satu teknik pengelasan baru yang diciptakan oleh *The Welding Institute* (TWI), Cambridge, Inggris. FSW termasuk *unconsumable solid-state joining process* yang berarti pengelasan tanpa bahan tambah dan suhu kerjanya tidak melewati titik lebur benda kerja dan digunakan untuk aplikasi dimana kebutuhan akan perubahan karakteristik dasar dari benda kerja bisa diminimalisir sekecil mungkin. Gesekan dua benda yang terus-menerus akan menghasilkan panas, ini menjadi suatu prinsip dasar terciptanya suatu proses pengelasan gesek. Pada proses *Friction Stir Welding*, sebuah *tool* yang berputar ditekan pada material yang akan disatukan. Gesekan *tool* yang berbentuk silindris (*cylindrical-shoulder*) yang dilengkapi dengan sebuah *pin/probe* dengan material mengakibatkan pemanasan setempat yang mampu melunakkan bagian tersebut.

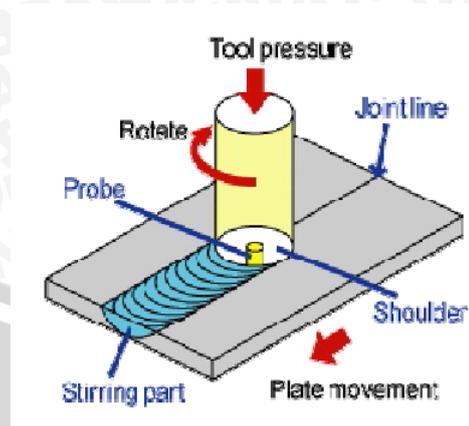


Gambar 2.2 Prinsip dasar proses *friction stir welding*
Sumber : Wijayanto , 2012

Desain *shoulder* dan *probe* sangat penting untuk kualitas las, yang mana *probe* dari *tool* menghasilkan panas dan menggerakkan material yang sedang dilas, *shoulder* juga berperan pada bagian penting yaitu menyediakan *friction treatment* tambahan seperti halnya mencegah material *plasticised* lepas dari daerah las. Selain itu keduanya juga bergerak pada kecepatan tetap dan bergerak melintang pada kedua sambungan dari material yang akan disatukan. Rancangan *tool* adalah faktor yang sangat mempengaruhi kualitas hasil lasan, karena rancangan *tool* yang tepat dapat meningkatkan kualitas las dan kecepatan las semaksimal mungkin



Gambar 2.3. Proses FSW
Sumber : Wijayanto , 2012



Gambar 2.4. Skema FSW
Sumber : Wijayanto , 2012

Panas yang dihasilkan dari gesekan *tool* dan material yang akan dilas sekitar 80% dari temperatur titik lebur material yang akan dilas. Material *tool* harus memiliki titik cair yang lebih tinggi dari material las, agar ketika proses pengelasan berlangsung material *tool* tidak ikut tercampur dengan lasan. Material *tool* harus mempunyai kekuatan yang cukup pada temperatur ini karena jika tidak maka *tool* dapat terpuntir dan retak. Oleh sebab itu diharapkan material *tool* cukup kuat, keras dan liat pada suhu pengelasan.

Keuntungan-keuntungan dari FSW :

- Tidak terjadi pelelehan selama pengelasan.
- Bisa mengelas semua jenis aluminium.
- Kekuatan las lebih baik.
- Tidak memerlukan bahan pengisi.
- Tidak memerlukan gas pelindung.
- *Tool welding* dapat digunakan berulang-ulang.
- Ramah lingkungan (*low flame*).
- Energi yang dibutuhkan untuk pengelasan lebih rendah dari *fusion welding*.

FSW bisa digunakan untuk mengelas material aluminium (*casting* maupun *alloy*) baik satu atau berbeda series, baja, titanium, tembaga, magnesium *alloy*, logam paduan dan komposit. FSW dapat digunakan untuk menghasilkan sambungan *butt*, sudut, bertumpuk, (lap), T, *spot*, dan *fillet* serta dapat digunakan pula untuk menyambung benda berongga, seperti tanki, tabung dan pipa dengan kontur 3 dimensi. Selain untuk membuat sambungan, FSW juga cocok digunakan untuk memperbaiki sambungan yang ada.

2.5 Energy Input

Dalam proses pengelasan merupakan satu hal yang sangat penting untuk memperkirakan jumlah kalor yang dihasilkan, pada pengelasan *friction stir welding* panas yang dihasilkan berasal dari tool pengelasan yang bergesekan dengan benda kerja. Meskipun masih memiliki kelemahan dari beberapa faktor yang tidak diperhitungkan diantaranya *welding speed* dan *heat losses*, persamaan *heat input* akibat gesekan antara tool pengelasan dan benda kerja adalah sebagai berikut:

$$Q = T \cdot \omega \quad \text{Lohwasser, Hal 280} \quad (2.1)$$

Kalor yang dihasilkan *shoulder*

$$= \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{Contact}} \cdot (R_{\text{Shoulder}}^3 - R_{\text{Probe}}^3) \quad \text{Lohwasser, Hal 281} \quad (2.2)$$

Kalor yang dihasilkan sisi *pin* :

$$2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{Contact}} (1 + \tan \alpha) + R_p^2 \cdot H_p \quad \text{Lohwasser, Hal 281} \quad (2.3)$$

Kalor yang dihasilkan ujung *pin* :

$$= \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{Contact}} \cdot R_{\text{Probe}}^3 \quad \text{Lohwasser, Hal 281} \quad (2.4)$$

Sehingga panas total yang dihasilkan adalah penjumlahan dari ketiganya

$$Q_{\text{total}} = \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{Contact}} \cdot ((R_{\text{Sh}}^3 - R_p^3)(1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3R_p^2 H_p) \quad \text{Lohwasser, Hal 281} \quad (2.5)$$

Dimana : Q = Energy input (Joule/second)

T =Torsi (Nm)

τ_{Contact} =Tegangan geser Aluminium (Pa)

ω =Kecepatan Sudut (rad/second)

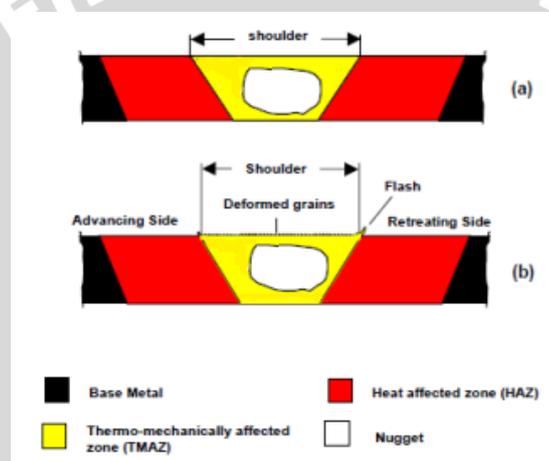
R_{Sh} =Jari – Jari *Shoulder* (mm)

R_p =Jari – jari *pin* (mm)

H_p =Tinggi *Pin* (mm)

2.6 Zona Pengelasan

Berdasarkan TWI (TWI website www.twi.co.uk) profil umum dari sambungan butt berupa 4 zona trapezoid. Zona pertama adalah *unaffected base metal*, di mana pada zona tersebut tidak terjadi perubahan struktur mikro atau sifat dari material. Zona yang kedua adalah *Heat Affected Zone (HAZ)*, di mana material terkena pengaruh panas tetapi tidak sampai mengalami deformasi plastis, walaupun terjadi perubahan mikrostruktur. Zona yang ketiga adalah *Thermodynamically Affected Zone (TMAZ)*, dimana pada zona ini terjadi deformasi material dan mikrostruktur akibat pengaruh panas. Zona yang terakhir adalah *nugget* yang merupakan area rekristalisasi dari TMAZ. Beberapa orang menyebut *nugget* sebagai *stir zone (SZ)*. (Khaled, Terry, 2005: 12)



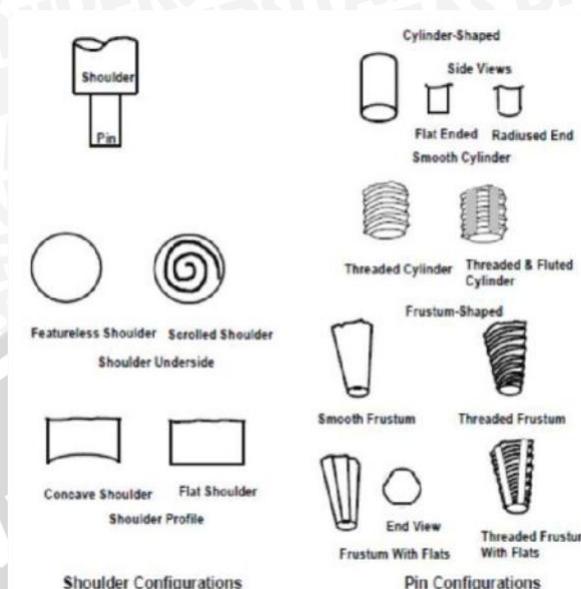
Gambar 2.5 Zona Pengelasan Pada *Friction Stir Welding*

Sumber: Khaled, Terry, 2005: 12

2.7 Perancangan Tool (*Tool Design*)

Pada awal penemuan FSW, *tool* yang digunakan masih berupa satu silinder utuh dengan bentuk *probe* silinder sederhana. Bentuk *probe* yang sederhana hanya bisa menghasilkan *flow material* dan pencampuran yang terbatas, akibatnya kecepatan pengelasan yang dihasilkan juga rendah. Salah satu lembaga yang terus mengembangkan rancangan *tool* adalah TWI. *Probe* berulir diciptakan untuk membantu memastikan deformasi *plastis* yang terjadi pada benda kerja tersebar secara sempurna di seputar *probe*, dan dari *part* yang atas menuju *part* yang bawah. Hal ini memungkinkan percampuran material dilakukan pada putaran yang lebih tinggi dan menghasilkan kualitas yang lebih baik karena bisa mereduksi kekosongan sambungan. *Threaded pin*, *Fluted pin* dan *frustum pin* dengan bagian bawah rata ditemukan untuk tujuan mempercepat *travel speed*, menyempurnakan *mixing* material, dan memperbaiki kualitas pengelasan. *Scroll*

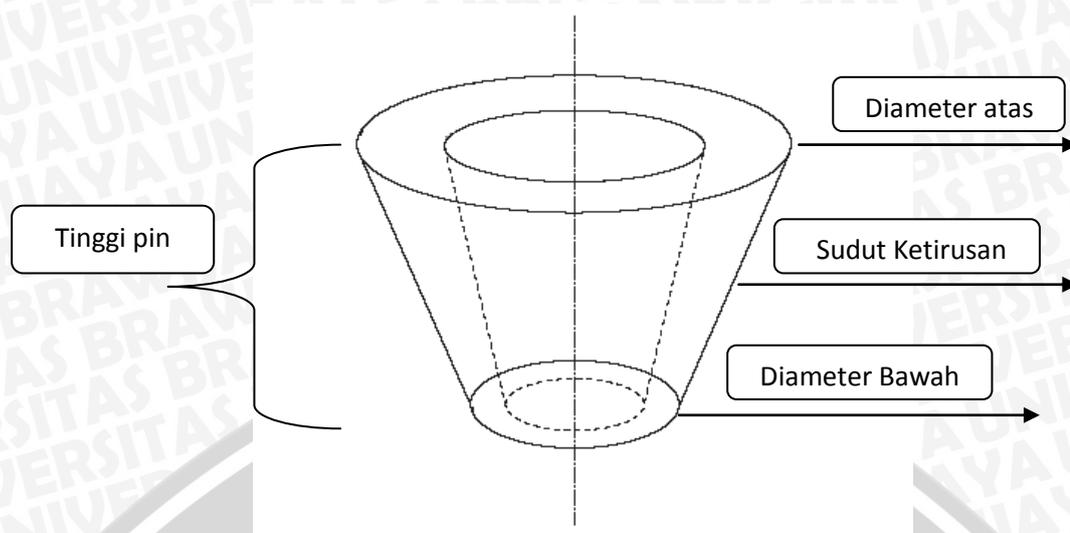
shoulder dan *concave shoulder* diciptakan untuk mengurangi efek *undercutting* dan *flash* pada sambungan yang ditimbulkan oleh bagian bawah *tool shoulder*.



Gambar 2.6 Konfigurasi *shoulder* dan *pin*
Sumber: Khaled, terry, 2005 : 115

Perkembangan perancangan *tool* dari sederhana menjadi kompleks, diiringi dengan berkembangnya material dari *tool* itu sendiri. Material *tool* dari FSW harus mempunyai temperatur lebur (*melting point*) yang tinggi, *physical* dan *chemical wear resist*, dan efektif melepaskan panas pada saat proses las berlangsung. Beberapa *tool* yang sukses digunakan untuk FSW adalah *polycrystalline cubic boron nitride* (PCBN), AISI 316 dan AISI 310 *stainless steel* dan *alloy 600* berbasis *nickel alloy* (Khaled, Terry, 2005: 13).

Rancangan *tool* adalah faktor yang sangat mempengaruhi kualitas hasil lasan, karena rancangan *tool* yang tepat dapat meningkatkan kualitas las dan kecepatan las semaksimal mungkin.



Gambar 2.7 bentuk pin

Panas yang dihasilkan dari gesekan *tool* dan material yang akan dilas sekitar 70 – 80% dari temperatur titik lebur material yang akan dilas tersebut. Material *tool* harus memiliki titik cair yang lebih tinggi dari material las, agar ketika proses pengelasan berlangsung material *tool* ikut tercampur dengan lasan. Material *tool* harus mempunyai kekuatan yang cukup pada temperatur ini karena jika tidak maka *tool* dapat terpuntir dan retak. Oleh sebab itu diharapkan material *tool* cukup kuat, keras dan liat, pada suhu pengelasan. Sebaiknya material yang digunakan juga mempunyai ketahanan oksida yang baik dan penghantar panas rendah untuk mengurangi kerugian panas dan kerusakan termal pada mesin. Desain *tool* terdiri dari *shoulder* dan *pin*. *Pin* berfungsi untuk menghasilkan panas dan menggerakkan material yang sedang dilas. *Shoulder* memiliki beberapa fungsi antara lain:

1. Sebagai pelindung dari kemungkinan masuknya suatu material berbeda.
2. *Shoulder* yang berdiameter lebih besar, berperan untuk mempertahankan dan menjaga agar material *plasticised* tidak keluar dari daerah las.
3. *Shoulder* memberi tekanan kebawah yang memberi efek tempa pada lasan.
4. *Shoulder* juga menyediakan *input* panas tambahan, karena luas permukaan yang bergesekan dengan material las lebih besar maka panas yang dihasilkan juga lebih besar.

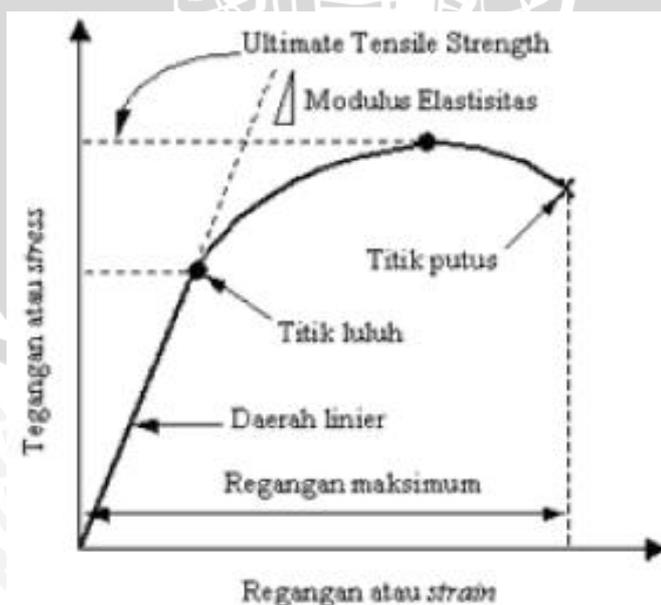
Perancangan *tool* merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi struktur mikro, *profil* dan sifat mekanik sambungan. Material *tool* merupakan faktor

yang menentukan akan kehandalan *tool*, koefisien gesek, dan pembangkitan *heat*. Oleh karena itu perancangan *tool* merupakan hal yang sangat penting dari FSW.

2.8 Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik berfungsi untuk mengetahui kekuatan tarik benda uji. Pengujian kekuatan tarik daerah las dimaksudkan untuk mengetahui apakah kekuatan las mempunyai nilai yang sama, lebih rendah atau lebih tinggi dari kelompok *raw material*. Pengujian tarik untuk kualitas kekuatan tarik dimaksudkan untuk mengetahui berapa nilai kekuatannya dan di mana letak putusnya suatu sambungan las.

Pengujian tarik adalah pengujian yang diberikan kepada benda uji dengan memberikan gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujung benda uji. Gaya tersebut mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) pada benda uji tersebut. Proses terjadinya deformasi pada benda uji adalah proses pergeseran butiran kristal logam yang mengakibatkan melemahnya gaya elektromagnetik setiap atom logam hingga lepas ikatan tersebut oleh penarikan gaya maksimum. Pada pengujian tarik beban diberikan secara *continue* dan pelan-pelan bertambah besar. Bersamaan dengan itu, dilakukan pengamatan mengenai perpanjangan yang dialami benda uji dan dihasilkan kurva tegangan regangan.



Gambar 2.8 Kurva Tegangan-Regangan
Sumber: Wiryosumarto, 2000: 181

Dalam pengujian tarik benda uji mengalami perlakuan tertentu yang berkaitan dengan tegangan. Secara matematik tegangan tarik dapat ditulis sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad \text{(Wiryosumarto, 2000: 181)} \quad (2.2)$$

Keterangan :

σ = Tegangan (kg/mm²)

P = Beban tarik (kg)

A₀ = Luas penampang spesimen mula (mm²)

Regangan yang didapatkan adalah regangan linear rata-rata, yang diperoleh dengan cara membagi perpanjangan benda uji dengan panjang awal. Sedangkan regangan (persentase pertambahan panjang) pada saat itu dapat dirumuskan sebagai berikut:

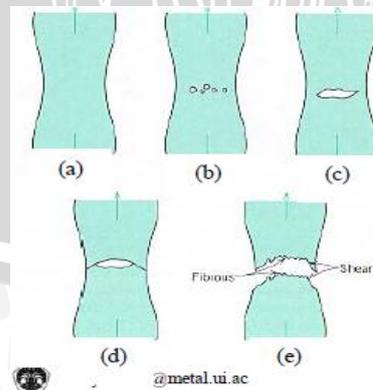
$$\varepsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100\% \quad \text{(Wiryosumarto, 2000: 181)} \quad (2.3)$$

Keterangan :

ε = Regangan (%)

L₀ = Panjang batang uji mula (mm)

L = Panjang batang uji akhir (mm)



Gambar 2.9 Tahapan Terjadinya Perpatahan Ulet Pada Sampel Uji Tarik
 (a) Penyempitan awal; (b) pembentukan rongga-rongga kecil (cavity); (c) Penyatuan rongga-rongga membentuk suatu retakan; (d) Perambatan retak; (e) Perpatahan geser akhir pada sudut 45°

Sumber: www.msm.cam.ac.uk

Pembebanan tarik dilakukan terus menerus dengan menambahkan beban sehingga akan mengakibatkan perubahan bentuk pada benda berupa pertambahan panjang dan pengecilan luas permukaan dan akan mengakibatkan kepatahan pada beban. Persentase pengecilan yang terjadi dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$q = \frac{(A_0 - A_{11})}{A_0} \times 100\% \quad (\text{Wiryosumarto, 2000: 181}) \quad (2.4)$$

Keterangan :

q = Reduksi Penampang (%)

A₀ = Luas penampang mula (mm²)

A₁ = Luas penampang akhir (mm²)

2.9 Anova Dua Jalur (*Two Ways – Anova*)

Anava atau anova adalah anonim dari analisis varian terjemahan dari *analysis of variance*, sehingga banyak orang yang menyebutnya dengan anova. Anova merupakan bagian dari metode analisis statistika yang tergolong analisis komparatif (perbandingan) lebih dari dua rata-rata (Riduwan, 2003:217).

Anova dua jalur digunakan untuk menguji hipotesis perbandingan lebih dari dua sampel dan setiap sampel terdiri atas dua jenis atau lebih secara bersama-sama. Langkah-langkah uji anova dua jalur adalah:

1. Sebelum anova dihitung, asumsikan bahwa data dipilih secara random, berdistribusi normal dan variannya homogen.
2. Buatlah hipotesis (H_a dan H₀) dalam bentuk kalimat.
3. Buatlah hipotesis (H_a dan H₀) dalam bentuk statistika.
4. Buatlah daftar statistika induk seperti pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Daftar Statistika Induk

Variabel		Pengulangan	Diameter Pin (mm)				Total Baris
			6	7	8	9	
Welding speed (rpm)	42	1	X ₁₁₁	X ₁₂₁	X ₁₃₁	X ₁₄₁	
		2	X ₁₁₂	X ₁₂₂	X ₁₃₂	X ₁₄₂	
		3	X ₁₁₃	X ₁₂₃	X ₁₃₃	X ₁₄₃	
	Jumlah						
	74	1	X ₂₁₁	X ₂₂₁	X ₂₃₁	X ₂₄₁	
		2	X ₂₁₂	X ₂₂₂	X ₂₃₂	X ₂₄₂	
		3	X ₂₁₃	X ₂₂₃	X ₂₃₃	X ₂₄₃	
	Jumlah						
	98	1	X ₃₁₁	X ₃₂₁	X ₃₃₁	X ₃₄₁	
		2	X ₃₁₂	X ₃₂₂	X ₃₃₂	X ₃₄₂	
		3	X ₃₁₃	X ₃₂₃	X ₃₃₃	X ₃₄₃	
	Jumlah						
Jumlah Total							

5. Hitunglah jumlah kuadrat total (JKT)

$$JKT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^n x_{ijk}^2 - \frac{T^2 \dots}{rcn} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 410}) \quad (2.5)$$

6. Hitunglah jumlah kuadrat antar baris (JKB)

$$JKB = \frac{\sum_{i=1}^r T^2 \dots}{cn} - \frac{T^2 \dots}{rcn} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 410}) \quad (2.6)$$

7. Hitunglah jumlah kuadrat antar kolom (JKK)

$$JKK = \frac{\sum_{j=1}^c T^2 \dots}{rn} - \frac{T^2 \dots}{rcn} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 410}) \quad (2.7)$$

8. Hitunglah jumlah kuadrat bagi interaksi JK(BK)

$$JK(BK) = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c T^2 ij}{n} - \frac{\sum_{i=1}^r T^2 i \dots}{cn} - \frac{\sum_{j=1}^c T^2 \dots j}{rn} + \frac{T^2 \dots}{rcn} \quad (2.8)$$

(Ronald E. Wapole, Hal: 410)

9. Hitunglah jumlah kuadrat galat (JKG)

$$JKG = JKT - JKB - JKK - JK(BK) \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 410}) \quad (2.9)$$

10. Mencari derajat bebas (dbr; dbc_B; dbr_c; dbd; dbt)

$$dbr_{(\text{BARIS})} = r-1 \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.10)$$

$$dbc_{(\text{KOLOM})} = c-1 \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.11)$$

$$dbr_{c(\text{INTERAKSI})} = (dbr) \cdot (dbc) \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.12)$$

$$dbd_{(\text{RESIDU})} = rcn - (r \cdot c) \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.13)$$

$$dbt_{(\text{TOTAL})} = rcn-1 \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.14)$$

11. Menghitung Kuadrat Tengah ($S_1^2, S_2^2, S_3^2, S_4^2$)

$$S_1^2 = \frac{JKB}{r-1} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.15)$$

$$S_2^2 = \frac{JKK}{c-1} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.16)$$

$$S_3^2 = \frac{JK(BK)}{(c-1) \cdot (r-1)} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.17)$$

$$S_4^2 = \frac{JKG}{rcn - (r \cdot c)} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.18)$$

12. Carilah F_{hitung} ($F_1; F_2; F_3$) masing-masing group.

$$F_1 = \frac{S_1^2}{S_4^2} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.19)$$

$$F_2 = \frac{S_2^2}{S_4^2} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.20)$$

$$F_3 = \frac{S_3^2}{S_4^2} \quad (\text{Ronald E. Wapole, Hal: 409}) \quad (2.21)$$

13. Tentukan taraf signifikannya, misalnya $\alpha = 0,05$ atau $\alpha = 0,01$

14. Cari F_{tabel} ($F_1; F_2; F_3$) masing-masing group.

$$F_{1(\text{tabel})} = F_{1(\alpha)} (\text{dbr;dbd})$$

$$F_{2(\text{tabel})} = F_{2(\alpha)} (\text{dbc;dbd})$$

$$F_{3(\text{tabel})} = F_{3(\alpha)} (\text{dbr_c;dbd})$$

15. Buatlah tabel ringkasan anova

Tabel 2.2 Analisa Varian Dua Arah

Sumber Keragaman	Jumlah Kuadrat (JK)	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	F_{hitung}	F_{tabel}
Nilai Tengah Baris					
Nilai Tengah Kolom					
Interaksi					
Galat					
Total					

16. Tentukanlah kriteria pengujian: Jika $F_{hitung} \geq F_{tabel}$ maka tolak H_0 berarti signifikan dan konsultasikan antara F_{hitung} dengan F_{tabel} kemudian bandingkan.

17. Buatlah kesimpulan.

2.10 Hipotesa

Besarnya diameter ketirusan pin dan *Feed Motion* mempengaruhi Heat input yang terjadi pada proses *FSW*. dimana hal ini akan mempengaruhi besar kecilnya kekuatan tarik material. Sehingga dapat di duga semakin tinggi *feed motion* dan semakin besar diameter ketirusan maka kekasaran permukaan benda kerja hasil proses *FSW* akan meningkat.