

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

**Thomas**, (1991) *Friction Stir Welding* (FSW) adalah proses *solid-state joining* dimana material yang dilas tidak benar-benar mencair pada saat proses berlangsung, dan proses ini diaplikasikan pada saat kita ingin mempertahankan karakter awal *base materialnya*. Proses ini pada umumnya digunakan pada material aluminium yang berukuran besar dimana pada kondisi ini material tersebut tidak mudah untuk di *Heat-Treatment* setelah proses las untuk mengembalikan karakter awalnya.

**ASM International**, (2007) pada proses FSW *tool* menggunakan *tool* silindris dengan *shoulder* dan memiliki *probe* yang berulir atau tidak berulir. *Tool* ini diputar dengan rpm yang tetap dan melaju dengan kecepatan translasi yang tetap pula sepanjang *joining line* diantara dua plat benda kerja yang dilas.

**Terry**, (2005) *Depth of Weld* dapat diartikan sebagai kedalaman suatu titik terendah *tool shoulder* yang menembus benda kerja. Sedangkan kemiringan *tool* adalah suatu besarnya sudut yang dibuat antara sumbu *tool* dengan permukaan benda kerja yang akan dilas, perlu diperhatikan kemiringan *tool* karena akan sangat mempengaruhi hasil dari FSW. Kemiringan yang dibuat antara 2-4° dimana bagian belakang *shoulder* lebih rendah dibandingkan dengan bagian yang berada didepannya.

**Sahu, et al** (2015) melakukan eksperimen pengaruh geometri pin terhadap hasil penyambungan plat paduan aluminium (AA4047) tebal 6 mm dan plat paduan tembaga (C89833) tebal 3 mm metode pengelasan FSW sambungan tumpang. Eksperimen ini menggunakan mesin pada putaran spindel 1100rpm dan kecepatan pengelasan 35 mm/min. Jenis *tool* yang dipakai adalah material *mild steel* dengan diameter *shoulder* 24 mm, diameter pin  $\frac{1}{3} - \frac{1}{4}$  kali dari diameter *shoulder*, dan panjang pin 6 mm. Memiliki 5 macam bentuk geometri *tool*, yakni : silinder, persegi, kerucut, silinder berulir, dan segi tiga. Dari penelitian ini didapatkan geometri *tool* terbaik berbentuk kerucut yang menghasilkan kekuatan tarik hasil pengelasan sebesar 121,19 MPa.

**Zhang, et al** (2014) melakukan sebuah penelitian tentang analisa *mechanical properties* dan mikrostruktur hasil penyambungan logam paduan aluminium (AA 1060) tebal 3 mm dan tembaga murni tebal 3 mm dengan menggunakan metode pengelasan FSW sambungan tumpul. Putaran mesin yang digunakan sebesar 1050 rpm dan kecepatan pengelasan sebesar 30 mm/menit. Tembaga yang digunakan melalui proses

annealing pada suhu 650 °C dengan *holding time* selama 1 jam. *Tool* berbentuk silinder yang terbuat dari H13 *steel* dengan diameter *shoulder* 12 mm, diameter pin 4,5 mm, dan panjang pin 2,8 mm. Sudut kemiringan *tool* sebesar 2,5° dari garis normal benda kerja dengan posisi kecenderungan pin pada bagian aluminium. Dalam penelitian ini diketahui bahwa kekuatan tarik hasil pengelasan sebesar 148 MPa.

## 2.2 Pengelasan

Berdasarkan dari *Deutche Industrie Normen* (DIN), las merupakan ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilakukan dalam keadaan cair atau lumer. Pengelasan sendiri memiliki arti lain yakni suatu proses untuk menyambungkan dua buah logam atau lebih dapat mempermudah dan mengurangi biaya produksi. Setelah energi listrik dipergunakan dengan mudah, teknologi pengelasan mengikuti dengan pesatnya sehingga menjadi suatu teknik penyambungan yang terbaru. Sehingga sekarang sebanyak 40 metode pengelasan

Pada benda-benda bersejarah diketahui ternyata teknik penyambungan logam seperti pembrasingan dan pematian sudah dipergunakan antara waktu 4000 sampai 3000 tahun sebelum masehi. Ketika itu sumber energi panas yang dipergunakan berasal dari pembakaran kayu dan arang, Kemudian tidak berkembang dikarenakan panas yang dihasilkan sangat rendah sehingga tidak mencapai panas yang diinginkan. Setelah energi listrik digunakan secara luas atau bebas, teknologi pengelasan kembali berkembang terutama pemakaian las busur yang paling banyak digunakan oleh Bernades pada tahun 1885 (Wiryosumarto, 1994).

Berdasarkan cara kerjanya pengelasan dapat dibagi dalam tiga kelas utama yaitu:

### 1. Pengelasan Cair

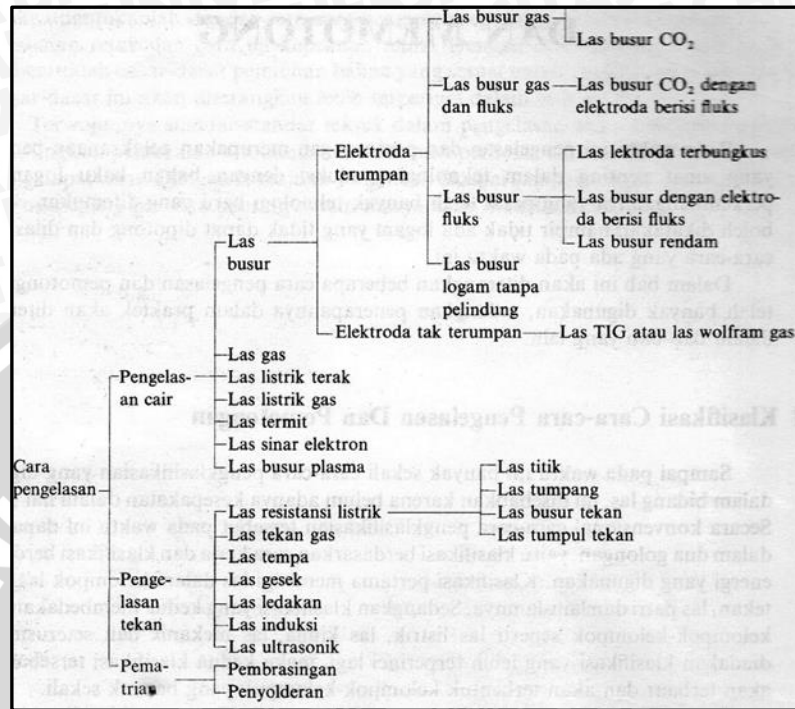
Pengelasan cair adalah sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar dan sebagian logam induk ikut mencair.

### 2. Pengelasan Tekan

Pengelasan tekan adalah dua buah material yang dipanaskan hingga suhu yang diinginkan dan kemudian ditekan sehingga panasyan di hasilan dapat menyatukan material tersebut

### 3. Pematrian

Pematrian adalah sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah, logam induk tidak ikut mencair.



Gambar 2.1 Klasifikasi Cara Pengelasan  
Sumber: Wiryosumarto (1994)

### 2.3 Aluminium

Aluminium ditemukan oleh Sir Humprey Davy dalam tahun 1809 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H.C Oersted pada tahun 1825. Selanjutnya aluminium dikembangkan dalam dunia industri oleh Paul Heroult di Perancis dan C.M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah. Mereka telah mendapatkan logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa dari garam yang terfusi. Sampai saat ini produksi aluminium masih menggunakan metode Heroult Hall. Penggunaan aluminium adalah tertinggi di dunia diantara logam non fero (Surdia, 1999).

Aluminium merupakan logam ringan yang tahan korosi dan memiliki nilai hantaran listrik yang baik. Pada dunia modern, aluminium diberi logam tambahan seperti Cu, Mg, Si, Mn, Zn, dan Ni untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan memberikan tambahan sifat baik lainnya. Saat ini material aluminium telah dikembangkan secara luas, bukan hanya untuk keperluan rumah tangga tapi juga keperluan industri seperti material mobil, kapal laut, pesawat, dsb. Adapun sifat fisik dan mekanik aluminium adalah sebagai berikut:

## 2.4 Tembaga

Tembaga dalam dunia industri pada umumnya digunakan sebagai bahan penghantar listrik dan penukar panas. Sejak tahun 1913 untuk satuan hantaran listrik tembaga dinyatakan dalam % (persen) mengacu pada *International Annealed Copper Standard* (IASC) yang mempunyai nilai rata-rata 100% untuk tembaga teknis. Dalam standard ini suatu tahanan dinyatakan 100% jika tahanan spesifik pada 20°C adalah 1,7241  $\mu\Omega\text{cm}$  atau 0,153280  $\Omega/\text{g.m}$  (pada masa jenis 8,89  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Seiring berkembangnya teknologi pemurnian tembaga, kemurnian tembaga telah mencapai level yang sangat baik. Saat ini tembaga yang paling murni mempunyai konduktivitas listrik 103%. Pada tahun 1950-an nilai hantaran panas tembaga pada 20°C sebesar 0,923  $\text{cal}/(\text{cm.derajat.detik})$  dan menjadi lebih baik pada tahun 1970-an menjadi 0,941  $\text{cal}/(\text{cm.derajat.detik})$  (Surdia, 1999).

Tembaga murni untuk keperluan industri dicairkan menggunakan proses elektrolisa, dan dikelompokkan menjadi tiga jenis menurut kadar oksigen dan cara deoksidasi yaitu tembaga ulet, tembaga deoksidasi, dan tembaga bebas oksigen. Jika oksigen terkandung dalam unsur-unsur pengotor tembaga akan menyebabkan pengendapan sebai oksida yang mengakibatkan berkurangnya kemampuan tembaga untuk menghantarkan listrik. Oksida yang banyak akan menyebabkan kegetasan hidrogen pada temperatur tinggi. Untuk mencegah hal ini dipergunakan tembaga deoksidasi atau tembaga bebas oksigen. Dalam tembaga murni untuk keperluan industri biasanya terdapat unsur-unsur gas yang memberikan pengaruh terhadap berbagai sifat. Oksigen adalah unsur penting yang berhubungan dengan kadar hidrogen dan belerang. Berikut adalah *mechanical properties* dan *thermal properties* pada tembaga murni:

Seiring dengan meningkatnya variabel akan kebutuhan tembaga, kondisi di lapangan tembaga juga digunakan dalam bentuk paduan. Secara umum ada dua jenis paduan tembaga, yaitu kuningan dan perunggu. Kuningan adalah paduan tembaga dimana sekitar 30% didalamnya terkandung unsur Zn. Sedangkan perunggu dalam arti sempit adalah paduan unsur Cu dengan Sn. Dalam arti lebih luas, perunggu juga disebut paduan logam Cu selain dengan Zn. Perunggu memiliki kelebihan dibandingkan tembaga murni dan kuningan, yaitu kekuatan yang lebih tinggi, lebih mudah di cor, memiliki ketahanan aus dan korosi yang baik. Berikut adalah jenis paduan tembaga secara umum dan penggunaannya:

Table 2.1 Paduan tembaga dan penggunaannya

Paduan	Komposisi kimia utama (%)	Sifat-sifat mekanik setelah penganilan			Penggunaan
		Kekuatan tarik (kgf/mm <sup>2</sup> )	Kekuatan mulur (kgf/mm <sup>2</sup> )	Perpanjangan (%)	
Kuningan 70-30	70Cu-30Zn	32,6	11,5	60	Emas tiruan, penarikan dalam Pemrosesan logam tipis Sekrup, baud
Kuningan 60-40	60Cu-40Zn	37,8	12,0	45	
Kuningan pematongan bebas.	61,5Cu-35,5Zn-3,0Pb	34,3	12,6	53	
Kuningan admiralty	71,0Cu-28,0Zn-1,0Sn	32,5	9,4	65	Kondensor, kuningan kapal dengan seng tinggi untuk komponen kapal.
Brons fosfor	94,8Cu-5,0Sn-0,25P	35,0	14,0	58	Roda gigi, pegas
Brons Mangan	58,5Cu-39,2Zn-1,0Sn-1,0Fe-0,3Mn	45,5	21,0	35	Poros baling-baling kapal
Brons Aluminium	95,0Cu-5,0Al	38,6	15,4	65	Untuk industri kimia, bahan tahan korosi.
Perak Jerman	65,0Cu-17,0Zn-18,0Ni	40,7	17,5	40	Untuk penarikan dalam, perhiasan, pengukur
Cupronickel	70,0Cu-30,0Ni	40,0	17,5	45	Tembaga putih, pipa tahan korosi
Brons Berilium	98,0Cu-2,0Be	48,5	24,6	35	Paduan penuaan, pegas

Sumber: Surdia (1999)

Table 2.2 *Mechanical Properties* dan *Thermal Properties* Tembaga Murni

<i>Mechanical Properties</i>	<i>Metric</i>
<i>Hardness, Vickers</i>	50
<i>Tensile Strength Ultimate</i>	210 MPa
<i>Tensile Strength Yield</i>	33.3 MPa
<i>Elongation at Break</i>	60%
<i>Modulus of Elasticity</i>	110 GPa
<i>Bulk Modulus</i>	140 GPa
<i>Poissons Ratio</i>	0.343
<i>Shear Modulus</i>	46.0 GPa
<i>Thermal Properties</i>	
<i>Heat of Fusion</i>	204.8 J/g
<i>Heat of Vaporization</i>	5234 J/g
<i>Spesific Heat Capacity</i>	0.385 J/g°C
<i>Thermal Conductivity</i>	385 W/m-K
<i>Melting Point</i>	1083,2 – 1083,6 °C
<i>Boiling Point</i>	2562 °C

Sumber : Ross (1992)

## 2.5 Pengujian Tarik

Uji tarik digunakan untuk memperoleh informasi dari kekuatan bahan dan sebagai uji spesifikasi bahan. Pada uji tarik spesimen dibebani gaya tarik searah sumbu secara kontinyu. Sedangkan kekuatan tarik merupakan kekuatan untuk menerima beban tanpa mengalami kerusakan dan dinyatakan sebagai tegangan maksimum bahan sebelum patah. Hubungan tegangan regangan dapat dijelaskan sebagai berikut :

Tegangan tarik merupakan distribusi gaya tarik persatuan luas bahan, dirumuskan:

$$\sigma T = F/A$$

Dimana :

$\sigma T$  = Tegangan tarik

F = Gaya tarik

A = Luas penampang

Regangan adalah perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang awal, dirumuskan:

$$E = \Delta l / l_0$$

Dimana :

E = Regangan (%)

$l_0$  = Panjang awal (mm)

$\Delta l$  = Pertambahan panjang (mm)

Untuk hampir semua bahan material tahap uji tarik hubungan antara beban atau gaya yang diberikan pada bahan percobaan berbanding lurus terhadap perubahan panjang bahan tersebut, ini disebut daerah linier. Di daerah ini kurva pertambahan panjang terhadap beban sebagai berikut:

“Rasio tegangan dan regangan adalah konstan”. Sehingga hubungan antara tegangan dan regangan di rumuskan :

$$E = \sigma / \epsilon$$

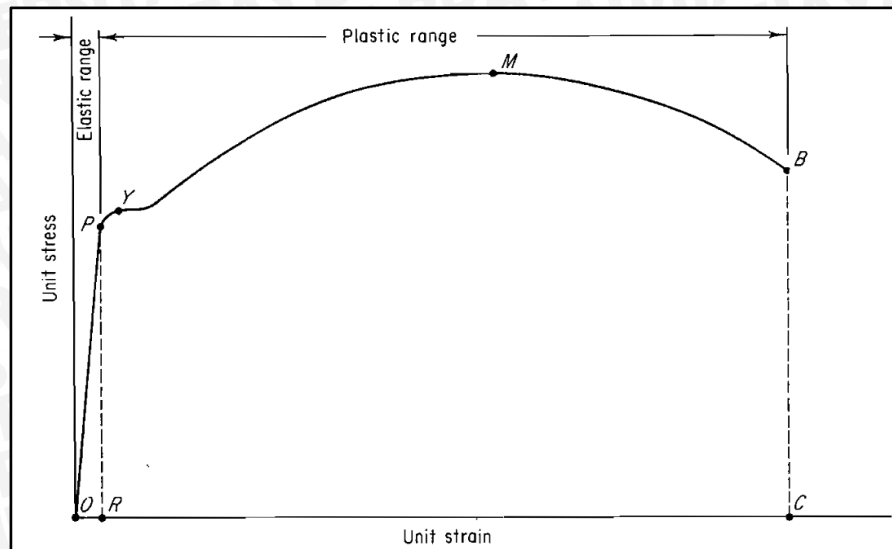
Dimana :

E = Modulus elastisitas

$\sigma$  = Tegangan

$\epsilon$  = Regangan

Hubungan antara regangan dan tegangan juga dapat diketahui dengan jelas dari grafik tegangan – regangan yang berdasarkan hasil uji tarik sebagai berikut :



Gambar 2.2 : Grafik tegangan –regangan  
 Sumber : Avner (1974:38)

Istilah mengenai sifat-sifat mekanik bahan dengan melihat hasil uji tarik diatas. Asumsikan bahwa kita melakukan uji tarik mulai titik 0 sampai D sesuai dengan arah panah dalam gambar.

- Daerah Elastis (*Elastic Range*)

Dalam gambar diatas dinyatakan dengan daerah pada titik 0 sampai dengan R. Daerah terjadinya deformasi elastis, yang dimana kenaikan tegangan dan regangan berbanding lurus sehingga membentuk kurva yang linier atau nilai perubahan tegangan dan regangan sama.

- Batas proporsional (*P*)

Titik sampai dimana penerapan hukum Hooke masih bisa ditolerir. Tidak ada standarisasi tentang nilai ini. Dalam praktek biasanya, batas proporsional sama dengan batas elastis, yang mana merupakan batas dari keseimbangan antara pertambahan tegangan dan regangan.

- Tegangan luluh (*Yield Stress*)

Tegangan maksimum sebelum bahan memasuki fase daerah landing, peralihan deformasi elastis ke plastis.

- Daerah plastis

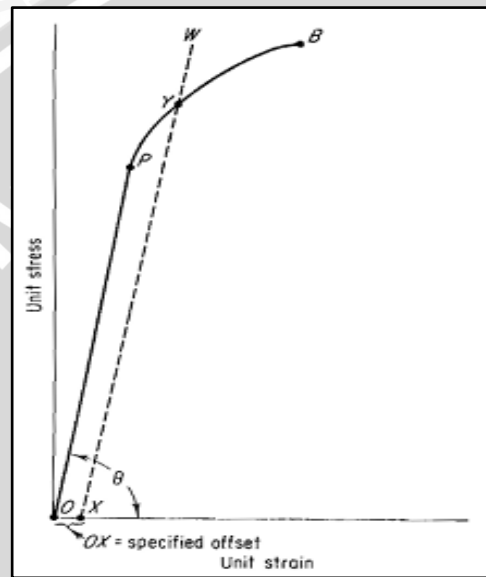
Daerah dimana terjadinya deformasi plastis yang terjadi setelah *yield strength* sampai *fracture*. Kenaikan tegangan regangan merupakan fungsi *polynomial* sampai titik *ultimate strength*, kemudian putus sampai *fracture*.

- *Ultimate Tensile Strength (M)*

Titik terjadinya tegangan regangan tertinggi yang dapat dicapai material atau spesimen. Pada saat titik *Ultimate (M)*, spesimen mengalami *necking* (pengecilan penampang) dengan diikuti penurunan tegangan, tapi panjangnya tetap bertambah sampai akhirnya putus.

- *Fracture (B)*

Titik dimana terjadinya patahan pada spesimen.



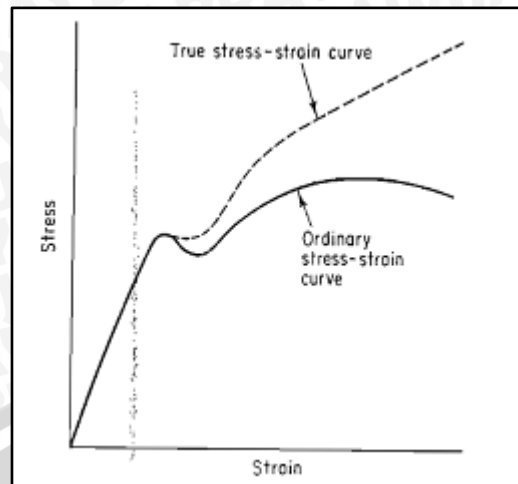
Gambar 2.3 : Grafik Metode *Offset*

Sumber : Avner (1974:39)

Pada gambar diatas, ditunjukkan dengan titik *B*, merupakan besar tegangan dimana bahan yang di uji putus atau patah.

Apabila suatu proses material dihasilkan dengan tegangan-regangan yang tidak memperlihatkan titik luluh / *yield*, maka mencarinya dengan metode *offset*, yaitu menarik garis lurus sejajar dengan diagram tegangan dimulai dari titik 0 regangan yang digunakan sebagai acuan dengan jarak 0,2% dari regangan maksimum. Perpotongan garis *offset* dengan kurva tegangan regangan itulah tegangan *yield* dari bahan tersebut.

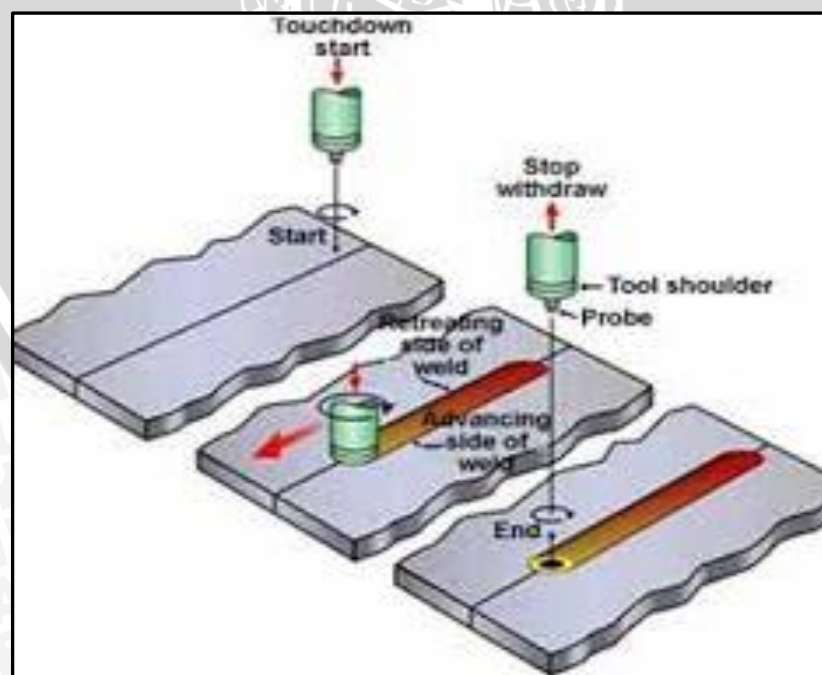




Gambar 2.4 Hubungan Tegangan Regangan Rekayasa dan Sejati  
Sumber: Avner (1974:42)

## 2.6 Friction Stir Welding

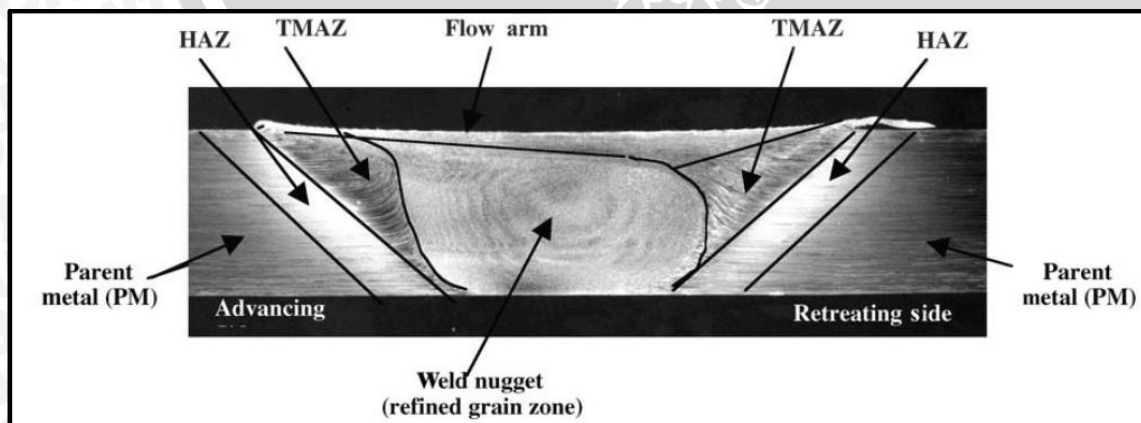
*Friction stir welding* merupakan salah satu teknik pengelasan baru yang diciptakan di *The Welding Institut (TWI)*, Cambridge, Inggris oleh Wayne Thomas pada tahun 1991. FSW adalah proses pengelasan baru yang di promosikan dengan sedikit biaya dan kualitas sambungan yang baik. Hal itu dikarenakan metode ini tidak membutuhkan logam pengisi dan bisa menghilangkan atau sedikit cacat retak dan porositas. Prinsip FSW menggunakan *tools* yang berotasi dan bergerak melintas sehingga material terjadi penempaan pada pusat lasan menjadi lebur.



Gambar 2.5 Skema *Friction Stir Welding*  
Sumber: Wijayanto (2010)

Prinsip Friction Stir Welding yang ditunjukkan pada Gambar dengan gesekan dua benda yang terus-menerus akan menghasilkan panas, ini merupakan suatu prinsip dasar terciptanya proses pengelasan gesek. Pada proses *friction stir welding*, sebuah *tool* yang berputar di tekankan pada material yang akan di satukan. Gesekan material yang akan disambung dengan *tool* yang berbentuk silindris (*cylindrical-shoulder*) yang dilengkapi *pin* atau *probe* dengan material, mengakibatkan pemanasan setempat yang mampu melunakan bagian tersebut. *Tool* bergerak pada kecepatan konstan dan bergerak pada jalur pengelasan (*joint line*) dari material yang akan di satukan dalam kondisi diam. Parameter pengelasan yang dilakukan harus disesuaikan sedemikian rupa, sehingga pengurangan volume dari pin ketika terjadi gesekan dengan material kerja bisa diperkecil. Hal ini bertujuan untuk menjaga masukan panas yang konstan sepanjang pengelasan. Benda kerja harus dicekam dengan kuat pada ragum untuk mempertahankan posisinya akibat gaya yang terjadi saat pengelasan. Agar mendapatkan hasil las yang optimal. Pada pengelasan FSW terdapat beberapa keuntungan, diantaranya:

1. Bisa mengelas semua jenis aluminium.
2. Tidak terjadi pelelehan selama pengelasan.
3. *Tool* pengelasan dapat digunakan berulang – ulang.
4. Tidak memerlukan bahan pengisi.
5. Tidak menimbulkan gas.
6. *Tool welding* dapat digunakan berulang-ulang.
7. Ramah lingkungan (*low flame*).
8. Kekuatan dan hasil las lebih baik dibandingkan dengan *fusion welding*.

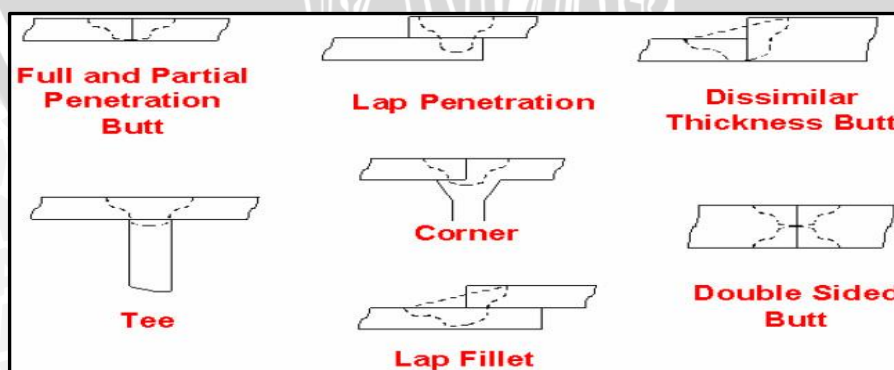


Gambar 2.6 Pembagian daerah pengelasan pada FSW  
Sumber: ASM International (2007)

Panas yang dihasilkan dari putaran *tool* dan gerakan translasi akan menyebabkan perbedaan struktur pada sambungan las. Adapun perbedaan daerah pengelasan dibagi menjadi 4 area yaitu :

1. *Weld Nugget* adalah area yang melunak dan membentuk ikatan metalurgi pengelasan akibat gesekan dan adukan *tool*.
2. *Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)* adalah area mengalami deformasi plastis akibat panas yang dihasilkan dari gesekan *tool*. Meskipun mengalami deformasi plastis, pada area ini tidak mengalami rekristalisasi seperti halnya *weld nugget*. Biasanya ada batas jelas yang membedakan daerah TMAZ dan *weld nugget*.
3. *Heat Affected Zone (HAZ)*, area ini merupakan area yang paling dekat dengan pusat dari lokasi pengelasan. Material pada area ini sudah mengalami siklus termal yang menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik dari base metal. Meskipun demikian, material pada area ini tidak mengalami deformasi plastis akibat panas pengelasan.
4. *Base Metal*, merupakan bagian utama dari material yang tidak terpengaruh apapun akibat panas yang dihasilkan pada proses pengelasan (ASM International, 2007).

Pengelasan FSW secara umum dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu sambungan temu (*Butt joint*) dan sambungan tumpang tindih (*Lap joint*). Namun seiring perkembangannya, pengelasan dengan metode ini dapat dilakukan dengan beberapa variasi diantaranya : sambungan temu dengan ketebalan benda (*Dissimilar Thickness Butt*), sambungan tegak lurus (*Tee*), sambungan sudut (*Corner*), sambungan pengisian tumpang tindih (*Lap Fillet*), dan sambungan temu ganda (*Double Sided Butt*).

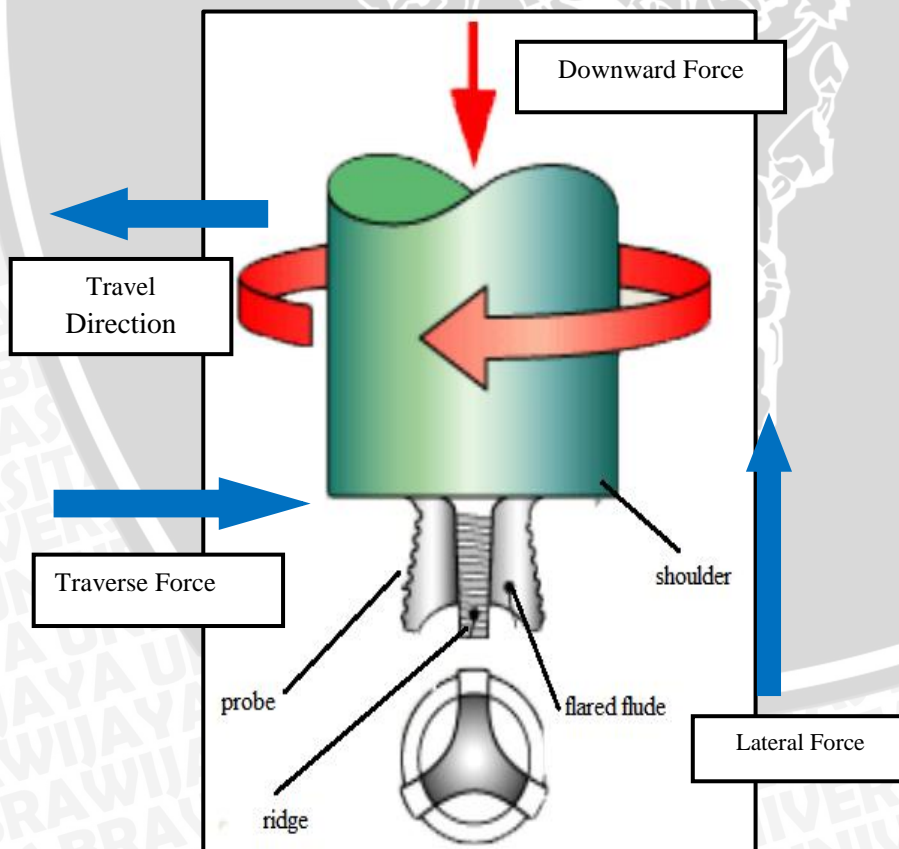


Gambar 2.7 Macam-Macam Sambungan pada FSW  
Sumber: ASM International (2007)

## 2.7 Gaya pada Friction Stir Welding

Ketika melakukan proses pengelasan dengan *friction stir welding* terdapat berbagai macam gaya yang bekerja pada *tool*, yaitu:

- *Downward force*, merupakan gaya yang memiliki fungsi utama menahan gaya reaksi dari benda kerja khususnya saat proses *plunge time* sehingga kontak antara *tool* dan benda kerja tetap terjaga konstan hingga pengelasan selesai dilakukan.
- *Traverse force*, adalah gaya reaksi benda kerja yang melawan gerakan translasi dari *tool*. Tingginya *traverse force* mengindikasikan besarnya resistansi material dalam menolak pergerakan *tool*. Gaya ini akan menurun seiring dengan meningkatnya temperatur pada material tersebut.
- *Lateral force*, adalah gaya reaksi dari benda kerja melawan *downward force* yang diakibatkan penetrasi *tool* terhadap material.
- *Torsi* adalah gaya yang timbul akibat putaran *tool* dan resistansi material terhadap putaran tersebut pada saat proses pengelasan berlangsung (ASM International, 2007).



Gambar 2.8 Gaya-gaya pada *Friction Stir Welding*  
Sumber: Suardi (2011: 9)

## 2.8 Parameter Pengelasan *Friction Stir Welding*

Parameter pengelasan dari FSW meliputi:

1. Kecepatan putar (*rotational speed*) dan kecepatan tempuh (*travel speed*). Dengan variasi *rotational speed* dan *travel speed* akan didapatkan *axis load*.
2. Bentuk *shoulder* dan pin .
3. Gaya normal (*normal force*), kemiringan *tool*, kedalaman *shoulder* (*shoulder plunge*).

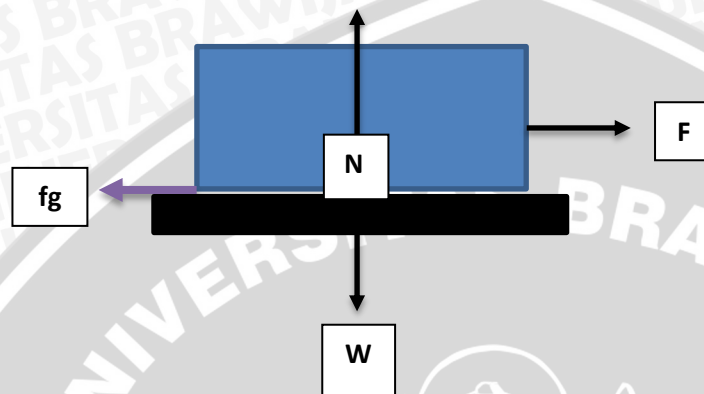
Tabel 2.3 Parameter Proses *Friction Stir Welding*

<i>Rotational Speed</i> (rpm)	<i>Travel Speed</i> (mm/s)	<i>Axis Load</i> (kN)
90	0.85	28.9
135	1.27	30
180	1.7	27.8
270	2.54	37.8
315	2.96	37.8
405	3.81	45.6
120	0.85	24.5
180	1.27	24.5
240	1.7	24.5
360	2.54	30
540	3.81	41
720	5.1	37.8
180	0.85	20
270	1.27	22
360	1.7	24
540	2.54	33.5
630	2.96	36
810	3.81	39
900	4.2	36.5

Sumber: Mishra (2005 )

## 2.9 Fenomena Gesekan

Fenomena ketika dua benda bertemu dan saling bersinggungan antara satu dengan yang lainnya biasa disebut dengan gesekan (*friction*) sedangkan gaya yang bekerja di dalamnya disebut gaya gesek (*friction force*). *Friction* adalah gesekan diantara dua permukaan yang saling kontak dan bergerak relatif. Koefisien gesek adalah area kontak antara dua permukaan, sifat dan kekuatan yang saling mempengaruhi.



Gambar 2.9 Fenomena Gesekan

Berdasarkan Hukum Kekekalan Energi, kalor merupakan energi yang dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Energi listrik dapat berubah menjadi energi kalor dan juga sebaliknya. Begitupula pada FSW, panas didapatkan dari gesekan *tool* dengan material. Besarnya energi listrik yang diubah atau diserap sama dengan besar kalor yang dihasilkan. Sehingga secara matematis dapat dirumuskan:

Ketika  $\Delta E=0$ , maka  $Q=W$  (Cengel, 2006:74)(2-10)

Untuk menghitung energi listrik digunakan persamaan sebagai berikut :

$$W = F \cdot s \quad (\text{Cengel, 2006:66})(2-11)$$

dengan :

$Q$  = Kalori (cal)

$W$  = Usaha (J)

$F_g$  = Gaya Gesek (*Newton*)

$s$  = Jarak (m)

Jadi, pada saat daya yang diterima saat pengelasan sama dengan lamanya waktu saat pengelasan sangat berpengaruh terhadap kalor yang dihasilkan, begitu pula dengan sebaliknya.

## 2.10 Heat Input

Menurut Mishra (2005), eksperimen terbaru menunjukkan bahwa panas terbesar dihasilkan oleh gesekan permukaan shoulder dan benda kerja. Sedangkan gesekan antara pin dan benda kerja tidak signifikan dalam kontribusi penghasilan panas. Persamaan *heat input* akibat gesekan antara *tool* pengelasan dan benda kerja adalah sebagai berikut:

$$Q_{\text{shoulder}} = \int_{R_{\text{probe}}}^{R_{\text{shoulder}}} 2\pi \tau_{\text{contact}} \omega r^2 dr \quad (\text{Lohwasser, 2009: 281})(2-1)$$

$$= \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{\text{contact}} (R_{\text{shoulder}}^3 - R_{\text{probe}}^3)$$

$$Q_{\text{probe side}} = \int_0^{H_{\text{probe}}} \int_0^\pi \tau_{\text{contact}} \omega r r d\theta dz \quad (2-2)$$

$$= \int_0^{H_{\text{probe}}} 2\pi \tau_{\text{contact}} \omega r^2 dz$$

$$= 2\pi \omega \tau_{\text{contact}} R_{\text{probe}}^2 H_{\text{probe}}$$

$$Q_{\text{probe tip}} = \int_0^{R_{\text{probe}}} \int_0^{2\pi} \tau_{\text{contact}} \omega r r d\theta dr \quad (2-3)$$

$$= \int_0^{R_{\text{probe}}} 2\pi \tau_{\text{contact}} \omega r^2 dr$$

$$= \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{\text{contact}} R_{\text{probe}}^3$$

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{shoulder}} + Q_{\text{probe side}} + Q_{\text{probe tip}} \quad (2-4)$$

Atau

$$Q = \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{\text{contact}} (R_{\text{shoulder}}^3 + 3R_{\text{probe}}^2 H_{\text{probe}})$$

$$Q_{\text{tot}} = Q.t$$

$$\tau_{\text{contact}} = u.p$$

$$p = \frac{F_z}{A_{\text{tool}}}$$

dengan:

$Q$  = Panas total yang di hasilkan (J/s).

$\omega$  = Kecepatan putar (rpm).

$R_{\text{shoulder}}$  = Jari-jari *shoulder* (m).

$R_{\text{probe}}$  = Jari-jari *probe* (m).

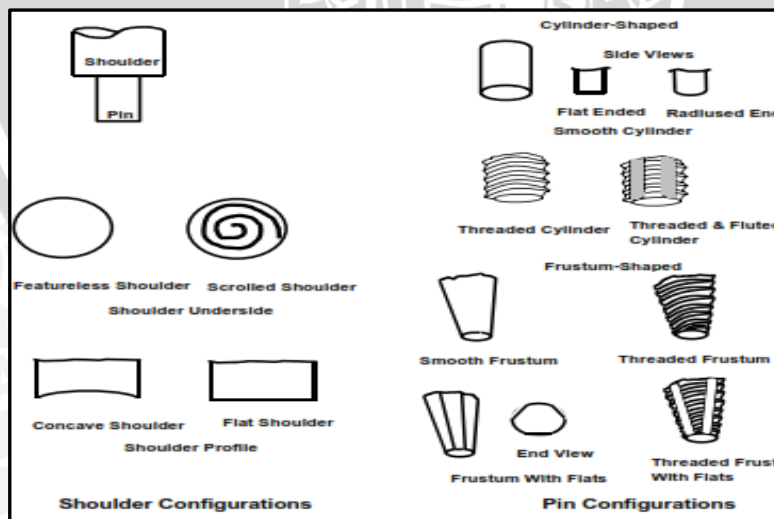
$H_{\text{probe}}$  = Tinggi *probe* (m).

$\tau_{\text{contact}} = \tau_{\text{contact}}$  untuk aluminium = 20 Mpa.

## 2.11 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 (Terry, 2005: 13). Panas yang dihasilkan dari gesekan *tool* dan benda kerja saat dilas sekitar 70 – 80% dari temperatur titik lebur benda kerja yang akan dilas. Material *tool* harus memiliki titik cair yang lebih tinggi dari benda kerja agar ketika proses pengelasan berlangsung material *tool* tidak ikut tercampur dengan lasan. Perancangan *tool* merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi sifat mekanik sambungan. Material *tool* merupakan faktor yang menentukan akan koefisien gesek, dan pembangkitan panas. Oleh karena itu perancangan *tool* merupakan hal yang sangat penting dari FSW.

Seiring berkembangnya waktu dan teknologi, bentuk – bentuk *tool* semakin banyak dengan segala fungsinya. Berkembangnya *tool* memiliki perbedaan satu dengan yang lain, contohnya pada bentuk pin yang dimiliki. Contoh : *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* (Terry, 2005). Contoh *shoulder* dan pin dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.10 Konfigurasi *Shoulder* dan Pin  
Sumber: Terry (2005 )



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. (Terry, 2005).

## 2.12 Ketetapan dan Terminologi FSW.

Berdasarkan ketetapan yang dikemukakan oleh Colligan, benda kerja FSW dibagi menjadi 2 bagian, yaitu sisi *advancing* dan sisi *retreating*. Sisi dari *welding tool* yang searah dengan arah pengelasan disebut sisi *advancing*. Dan sisi lawannya dimana permukaan bergerak berlawanan dengan arah pengelasan disebut sisi *retreating*. Seperti kita ketahui sebelumnya, posisi benda kerja dan FSW *tool* mempunyai kemiringan sebesar  $\Theta^\circ$ . Colligan dan Hirano mengindikasikan bahwa kemiringan sudut berpengaruh pada menjauhnya permukaan sambungan (*face and toe*) dari permukaan benda kerja.

Kemiringanpun menambah kedalaman dari (P) *shoulder plunge*, dimana :

$$P = 0.5 D \sin \Theta$$

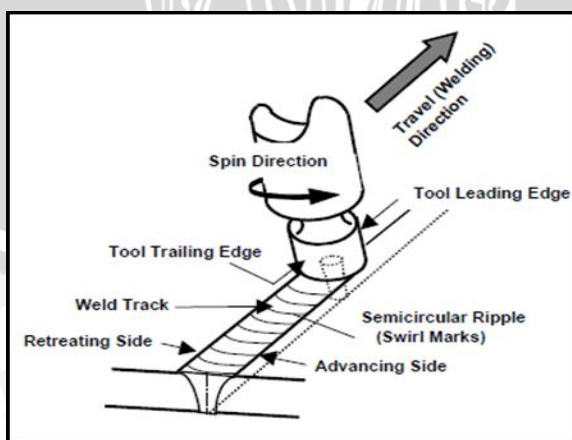
Dimana :

P = Kedalaman *tool* ( *shoulder plunge* )

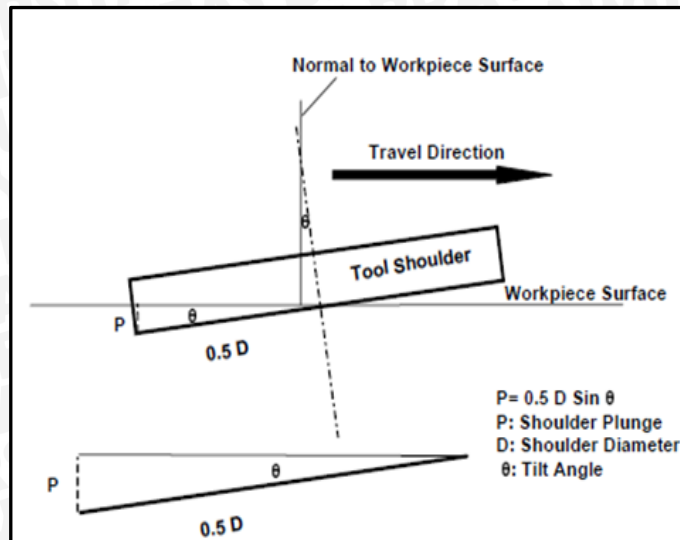
D = Diameter *shoulder*

$\Theta$  = Kemiringan *tool*

*Shoulder plunge* didefinisikan sebagai jarak *shoulder* terendah *tool* diukur dari permukaan benda kerja.

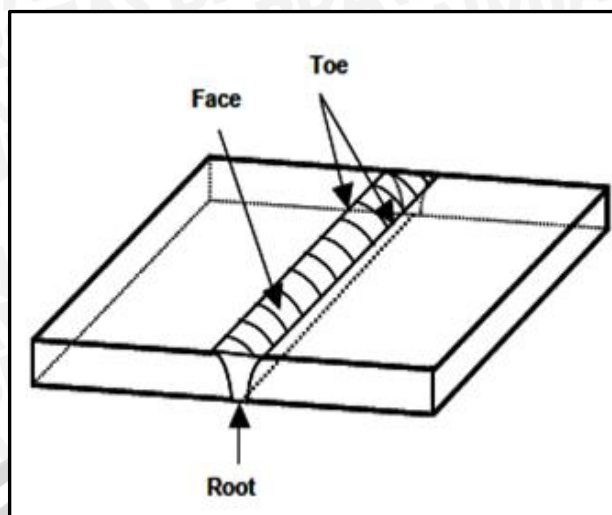


Gambar 2.11 Terminologi FSW  
Sumber: Terry (2005)



Gambar 2.12 Kedalaman *Shoulder* (*shoulder plunge*)  
 Sumber: Terry (2005)

*Face*, *root* dan *toe* merupakan istilah yang biasa digunakan pada sambungan *butt*. Istilah *undermatching* dan *overmatching*, masing-masing mengindikasikan jika kekuatan sambungan FSW lebih rendah dibanding material induk (*base material*) dan jika kekuatan sambungan FSW lebih tinggi dibandingkan dengan *base material*. Istilah lainnya adalah *joint efficiency*, yang didefinisikan sebagai *ratio* dari ( $F_{tu}$ ) *joint* atau ( $F_{tu}$ ) *base metal*, dan biasa dituliskan dalam persentase. Nilai kekuatan maksimal dari *base metal* berdasarkan pada pengujian sambungan pada arah yang sama. Lebih jauh lagi, jika sambungan diuji pada arah longitudinal dari produk, maka nilai itulah yang menjadi nilai kekuatan maksimum dari *base metal* pada arah longitudinal. Begitu juga dengan nilai kekuatan maksimum transversal dari *base metal* harus digunakan jika sambungan diuji dengan arah transversal dari produk.

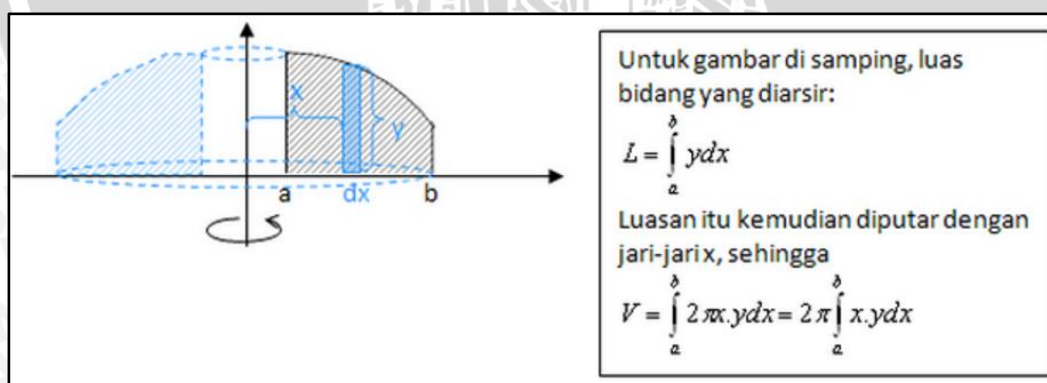


Gambar 2.13 *Face, toe* dan *root* pada FSW  
 Sumber: Terry (2005)

Dimana dapat dicari volume *shoulder* dengan rumus volume benda putar volume benda putar menggunakan integral yaitu :

Metode Cincin Silinder

Menurut pengertian bahwa jika suatu luasan diputar terhadap sumbu tertentu, akan terbentuk suatu benda putar dengan volume sebesar luasan tersebut dikalikan dengan keliling putaran. Dikarenakan keliling lingkaran =  $2\pi r$ , jika luas bidang yang diputar =  $A$ . maka volume =  $2\pi r \times A$  digunakan jika batang potongan sejajar dengan sumbu putar. Agar dapat lebih memahami perhatikan contoh berikut:



Gambar 2.14 Metode Cincin Silinder  
 Sumber: Purcell (1984)

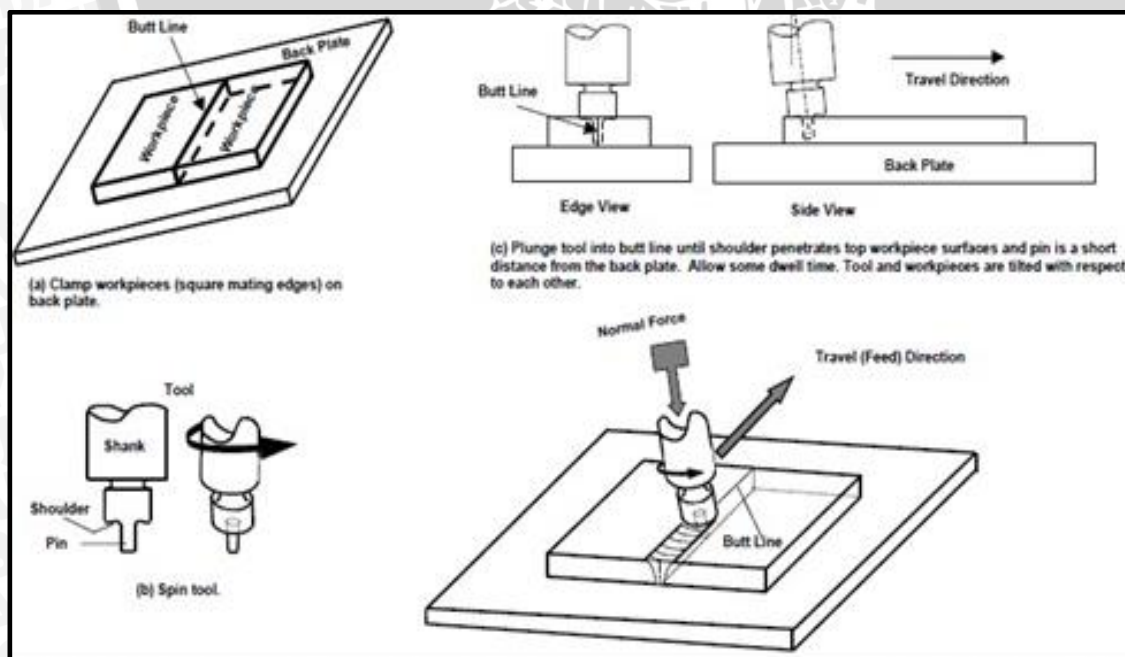
### 2.13 Dissimilar Metal Welding

*Dissimilar Metal Welding* (DMW) adalah pengelasan dengan dua logam dasar yang berbeda. DMW sering digunakan untuk menyambung material baja tahan karat dengan material yang lain. Hal tersebut juga sering digunakan karena perubahan sifat

mekanik atau performa yang dibutuhkan. Sebagai contoh pada pipa baja tahan karat jenis *austenit* yang sering digunakan dalam temperatur tinggi atau untuk generator *power plant*. Diantara temperatur dan tekanan tertentu baja karbon atau baja paduan rendah sudah cukup untuk digunakan, dan tujuan penyambungan baja tahan karat dengan material lain adalah tentang ekonomi (baja karbon atau baja paduan rendah lebih murah dibanding dengan baja tahan karat) .

#### 2.14 Sambungan Butt ( *Butt Joint* )

Dua benda material yang dilas pada posisi pertemuan ruas antara bidang yang bersentuhan, di cekam rigid pada ragum. Ragum mencegah benda kerja berputar dan atau terangkat ketika proses las berlangsung . *Tool* perlahan turun dan masuk ke dalam ruas pertemuan benda kerja sampai *shoulder* dari *tool* menyentuh permukaan material dan ujung pin sedekat mungkin dengan *backplate*. *Dwell time* yang singkat dapat membangkitkan panas untuk *preheating* dan pelunakan material sepanjang garis sambungan pengelasan. Sampai akhir pengelasan *tool* diangkat ketika *tool* pada saat kondisi berputar. Seperti pin yang diangkat, *tool* akan meninggalkan lubang (*keyhole*) pada ujung sambungan. Serta *tool shoulder* yang bersentuhan dengan benda kerja akan meninggalkan bekas *semi circular ripple* di jalur sambungan seperti pada ilustrasi di bawah.

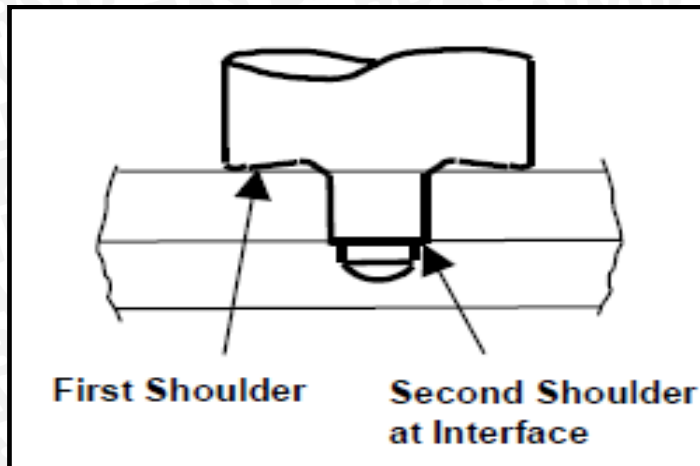


Gambar 2.15 Deskripsi proses FSW pada sambungan *butt*  
Sumber: Terry (2005: 14)

Material dipindahkan dari permukaan depan *tool* ke belakang *probe tool* saat ketika material sedang diaduk serta permukaan *shoulder* yang bersentuhan dengan bidang benda kerja. Gerakan berputar *stirring* bisa memecah oksigen pada permukaan *faying*, akan mengakibatkan ikatan antar sambungan menghasilkan permukaan yang bersih. Yang perlu diperhatikan pada sambungan yang penuh *closure of root* maka pin harus sedekat mungkin dengan *backplate* dan *shoulder* sehingga menyentuh permukaan benda kerja. Pada gambar terlihat bahwa sumbu dari *spindle* berada tidak tegak lurus  $90^\circ$ , ada kemiringan sekitar  $2-4^\circ$ , kemiringan ini bisa didapat dengan cara memiringkan *spindle* mesin atau memiringkan benda kerja. Kemiringan bisa membantu pemadatan material pada bagian belakang *tool* serta mendapatkan panas yang tinggi, tetapi juga mempunyai kelemahan yaitu berkurangnya kemampuan (*ability*) untuk eksekusi proses pengelasan *non-linear* dan juga bisa mengurangi kecepatan pengelasan (*travel speed weld*). Terry (2005)

### 2.15 Sambungan Tumpuk (*Lap Joint*)

Prinsip operasional dari sambungan tumpuk tidak berbeda jauh dengan sambungan *butt* kecuali tidak adanya *butt line*, dimana *tool* berada diantara benda kerja sehingga *tool* harus menembus benda kerja teratas. Hal ini merupakan perbedaan yang mendasar antara *butt joint* dengan *lap joint*. Pada *butt joint*, putaran utama terjadi di permukaan antar sambungan, berbeda dengan *lap joint* yang sambungannya tidak berada di permukaan sambungan, tetapi berada diantara permukaan tumpukan sambungan. Dari desain *tool* pun berbeda, jika di *butt joint tool* FSW hanya memiliki satu *shoulder*, maka di *lap joint tool* FSW memiliki dua *shoulder* yang lokasinya berada di permukaan benda kerja bawah. Brooker (2000)



Gambar 2.16 *Tool* untuk sambungan tumpul  
Sumber: Terry (2005 )

Pada sambungan tumpul, ujung *probe* dari *tool* FSW harus menembus benda kerja bagian atas, dan harus menembus sebagian pada benda kerja di bawahnya. Oleh karena itu, ujung pin tidak perlu sampai mendekati permukaan bawah benda kerja bagian bawah, karena berbeda dengan *butt joint*, pada *lap joint* sambungan las tidak terfokus pada pembentukan penutupan akar *root closure*. Namun demikian, kita tetap harus memperhitungkan efek dari faktor kedalaman penetrasi terhadap sifat mekanis sambungan. Takikan pada kedua sisi dari sambungan merupakan daerah potensial terjadinya retakan dan berpengaruh besar terhadap sifat mekanik. Secara umum, biasanya sambungan tumpul tidak sekuat sambungan *butt* yang kekuatannya bisa menggantikan fungsi dari *fasteners*. Terry ( 2005 )

## 2.16 Hipotesis

Besarnya variasi sudut pengelasan akan mempengaruhi kekuatan mekanik pada sambungan tumpul antara aluminium dan tembaga murni dengan metode *friction stir welding*. Serta semakin besar sudut pengelasan akan mengakibatkan semakin baiknya adukan pada daerah pengelasan dalam *fasa solid solution* sehingga kekuatan tariknya akan semakin meningkat. Kualitas adukan akan mencapai titik tertentu, ketika sudut pengelasan semakin meningkat tetapi tidak meningkatnya kekuatan tarik. Hal ini diakibatkan gaya tekan yang diterima material berlebihan sehingga terbentuk *flash* yang besar sehingga menurunnya kualitas ikatan metalurgi dalam *fasa solid solution*.