

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Kuswandi (2010), “Pengaruh *friction time* terhadap kekuatan impak sambungan las gesek pada paduan Al-Mg-Si”. Dari hasil penelitiannya menunjukkan bahwa *friction time* berpengaruh terhadap kekuatan impak sambungan las gesek. Kekuatan impak rata – rata tertinggi pada sambungan las gesek dengan *friction time* 60 detik sebesar 177,41 N.mm/mm², dan kekuatan impak rata – rata terendah pada sambungan las gesek dengan *friction time* 180 detik sebesar 102,51 N.mm/mm². Dari hasil foto makrostruktur, kekuatan impak sambungan dipengaruhi oleh sempit luasnya daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) yang terbentuk, sedikit tidaknya porositas, dan besarnya luas daerah *fully plasticized*.

Ardhiyanto (2010), “Pengaruh *friction time cycle* terhadap kekuatan tarik sambungan las gesek untuk paduan Al – Mg – Si”. Pada penelitiannya penggunaan *friction time* dapat mempengaruhi kekuatan tarik sambungan las gesek, dimana kekuatan tarik rata – rata tertinggi pada *friction time* 60 detik dengan nilai kekuatan tarik 136,92 N/mm² dan kekuatan tarik terendah pada *friction time* 180 detik sebesar 74,74 N/mm². Dari hasil foto makrostruktur, kekuatan tarik sambungan dipengaruhi oleh sempit luasnya HAZ (*Heat Affected Zone*) yang dihasilkan, sedikit tidaknya porositas, besarnya luasan daerah *fully plasticized*.

Irawan dkk (2012), “*Tensile strength of weld joint produced by spinning friction welding of round aluminium A6061 with various chamfer angles*”. Dari hasil penelitiannya didapatkan bahwa kekuatan tarik aluminium paduan Al-Mg-Si dengan variasi sudut 15°,30°,45°,60°,dan 75° dan penekanan 123 kgf dan gaya tekan akhir 157 kgf dengan waktu penekanan 2 menit didapat nilai kekuatan tarik terbesar pada sudut 30° dan hasil mikrostruktur kekuatan tertinggi pada spesimen ini disebabkan oleh luas maksimum zona plastis, porositas minimum dan luas minimum zona yang terkena dampak panas.

2.2 Aluminium

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik dan sifat – sifat baik lainnya sebagai sifat logam (Surdia, 1999 : 129). Aluminium merupakan logam yang paling banyak digunakan

setelah baja. Karakteristik utamanya adalah ringan (berat jenis = $2,7 \text{ gr/cm}^3$) dibandingkan dengan baja (berat jenis = $7,8 \text{ gr/cm}^3$), memiliki konduktifitas yang tinggi ketahanan korosi yang baik, serta memiliki keuletan yang cukup tinggi. Berdasarkan sifat mekanik yang dimilikinya material ini banyak digunakan dalam bidang yang luas bukan saja peralatan rumah tangga, tapi juga dipakai untuk keperluan material kelling, pesawat terbang, mobil, kapal laut, dan konstruksi.

Tabel 2. 1 Sifat Fisik Aluminium

| Sifat – sifat | Kemurnian Al (%) | |
|--------------------------------------|-------------------|------------------|
| | 99,996 | <99,0 |
| Massa jenis | 2,6989 | 2,71 |
| Titik cair | 660,2 | 653 - 657 |
| Panas jenis | 0,2226 | 0,2297 |
| Hantaran listrik | 64,94 | 59 (dianil) |
| Tahanan listrik koefisien temperatur | 0,00429 | 0,0115 |
| Koefisien pemuaian | $23,86 \times 10$ | $23,5 \times 10$ |

Sumber : Surdia Tata, 1999 : 134

Tabel 2. 2 Sifat Mekanik Aluminium

| Sifat - sifat | Kemurnian Al (%) | | | |
|--|------------------|------------------|--------|------|
| | 99,996 | | < 99,0 | |
| | Dianil | 75% dirol dingin | Dianil | H18 |
| Kekuatan tarik (kg/mm^2) | 4,9 | 11,6 | 9,3 | 16,9 |
| Kekuatan mulur (0,2%) (kg/mm^2) | 1,3 | 11,0 | 3,5 | 14,8 |
| Perpanjangan (%) | 48,8 | 5,5 | 35 | 5 |
| Kekerasan brinell | 17 | 27 | 23 | 44 |

Sumber : Surdia Tata, 1999 : 134

2.2.1 Aluminium Dan Paduan

Paduan aluminium secara umum diklasifikasikan menjadi dua kategori yaitu :

1. Berdasarkan dapat atau tidak dapat diperlakukan – panaskan dikategorikan menjadi dua yaitu :
 - a. Paduan yang dapat diperlakukan – panaskan (*Heat Treatable Alloys*) artinya paduan jenis ini merupakan paduan yang kekuatannya dapat ditingkatkan dengan cara perlakuan panas.

- b. Paduan yang tidak dapat diperlaku – panaskan (*Non-heat Treatable Alloys*) artinya paduan jenis ini merupakan paduan yang kekuatannya dapat ditingkatkan dengan pengerjaan dingin.
2. Berdasarkan cara pengolahan produk yang dihasilkan dikategorikan menjadi dua kategataui yaitu :
 - a. Paduan hasil pengerjaan logam (*Wrought Alloys*) artinya paduan ini dihasilkan dengan proses *forming* untuk menghasilkan bentuk yang diinginkan seperti pelat, lembaran, atau kawat.
 - b. Paduan aluminium cor (*Casting Alloys*) artinya paduan dikerjakan dengan pengecoran (paduan tuang) yang kemudian dituang pada cetakan dengan bentuk benda yang diinginkan untuk kemudian di *finishing*.

2.2.2 Sifat Umum Dari Beberapa Paduan

1. Aluminium murni (seri 2000)

Aluminium jenis ini merupakan aluminium dengan kemurnian antara 99,0% dan 99,9%. Aluminium seri ini memiliki sifat yang baik dalam ketahanan korosi, konduksi panas dan konduksi listrik, dan mempunyai sifat mampu las dan mampu potong jika dibandingkan dengan aluminium lainnya. Kekurangan dari aluminium seri ini adalah kekuatannya yang rendah.

2. Jenis paduan Al – Cu (seri 2000)

Jenis Al – Cu merupakan jenis yang dapat diperlaku – panaskan. Dengan melalui pengerasan endap atau penyepuhan sifat mekanik paduan ini dapat menyamai baja lunak, tetapi daya tahan korosinya rendah dibanding dengan jenis paduan lainnya serta sifat mampu lasnya kurang baik. Karena sifatnya, paduan jenis ini biasanya digunakan pada konstruksi kelling dan banyak sekali digunakan dalam konstruksi pesawat terbang seperti duralumin (2017) dan super duralumin (2024).

3. Jenis paduan Al – Mn (seri 3000)

Jenis paduan ini merupakan jenis yang tidak dapat diperlaku – panaskan sehingga kenaikan kekuatannya hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin dalam proses pembuatannya. Jika dibandingkan dengan Al – murni paduan ini mempunyai sifat yang sama dalam hal daya tahan korosi, mampu potong dan sifat mampu lasnya. Dalam hal kekuatannya jenis paduan ini lebih unggul dari pada jenis Al – murni.

4. Paduan jenis Al-Si (seri 4000)

Paduan jenis Al-Si termasuk jenis yang tidak dapat diperlaku – panaskan. Jenis ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik dan dalam proses pembekuannya hampir tidak terjadi retak. Paduan jenis Al-Si banyak digunakan sebagai bahan atau logam las dalam pengelasan paduan aluminium paduan cetau maupun paduan tempa.

5. Paduan jenis Al-Mg (seri 5000)

Paduan jenis ini termasuk paduan yang tidak dapat diperlaku – panaskan, tetapi mempunyai sifat yang baik dalam daya tahan korosi, terutama korosi oleh air laut, dan dalam sifat mampu – lasnya. Paduan jenis ini banyak digunakan dalam konstruksi, tangki penyimpanan gas alam cair dan oksigen cair.

6. Paduan jenis Al-Mg-Si (seri 6000)

Paduan ini termasuk dalam jenis yang dapat diperlaku – panaskan dan mempunyai sifat mampu potong, mampu las dan daya tahan korosi yang cukup. Sifat yang kurang baik dari paduan ini adalah terjadinya pelunakan pada daerah las sebagai akibat dari panas pengelasan yang timbul.

7. Paduan jenis Al-Zn (seri 7000)

Paduan ini termasuk jenis yang dapat diperlaku – panaskan. Biasanya ke dalam paduan pokok Al-Zn ditambahkan Mg, Cu, dan Cr. Kekuatan tarik yang dapat dicapai lebih dari 50 kg/mm^2 , sehingga paduan ini dinamakan juga ultar duralumin. Berlawanan dengan kekuatannya, sifat mampu-las dan daya tahannya terhadap korosi kurang menguntungkan. Dalam waktu akhir – akhir ini paduan Al-Zn-Mg mulai banyak digunakan dalam konstruksi las, karena jenis ini mempunyai sifat mampu las dan daya tahan korosi yang lebih baik dari pada paduan dasar Al-Zn.

(Wiryosumarto, 2000)

2.2.3 Paduan Al – Mg – Si

Paduan Aluminium – Magnesium – Silicon merupakan paduan yang dapat diperlakupanaskan dan mempunyai sifat mampu - potong, mampu las, dan daya tahan korosi yang cukup (Wiryosumarto, 2000). Dalam aplikasinya paduan Al – Mg – Si banyak digunakan untuk bahan kelling dan komponen mobil.

Tabel 2. 3 Komposisi Kimia Al – Mg - Si

| Paduan | Al (%) | Mg (%) | Si (%) | Fe (%) | Mn (%) | Zn (%) | Cu (%) | Cr (%) | Ti (%) | Kandungan lainnya (%) |
|--------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|------------|----------|-----------------------|
| 6061 | 95,8-98,6 | 0,80-1,2 | 0,40-0,80 | Max 0,70 | Max 0,15 | Max 0,25 | 0,15-0,40 | 0,040-0,35 | Max 0,15 | Max 0,15 |

Sumber : ASM Aero Space Metal Inc.

Tabel 2. 4 Sifat Mekanik Paduan Al – Mg - Si

| Paduan | Keadaan | Kekuatan tarik (kgf/mm ²) | Kekuatan mulur (kgf/mm ²) | Perpanjangan (%) | Kekuatan geser (kgf/mm ²) | Kekerasan brinell | Batas lelah (kgf/mm ²) |
|--------|---------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| 6061 | 0 | 12,6 | 5,6 | 30 | 8,4 | 30 | 6,3 |
| | T4 | 24,31 | 14,8 | 28 | 16,9 | 65 | 9,5 |
| | T6 | 31,6 | 28,0 | 15 | 21,0 | 95 | 9,5 |

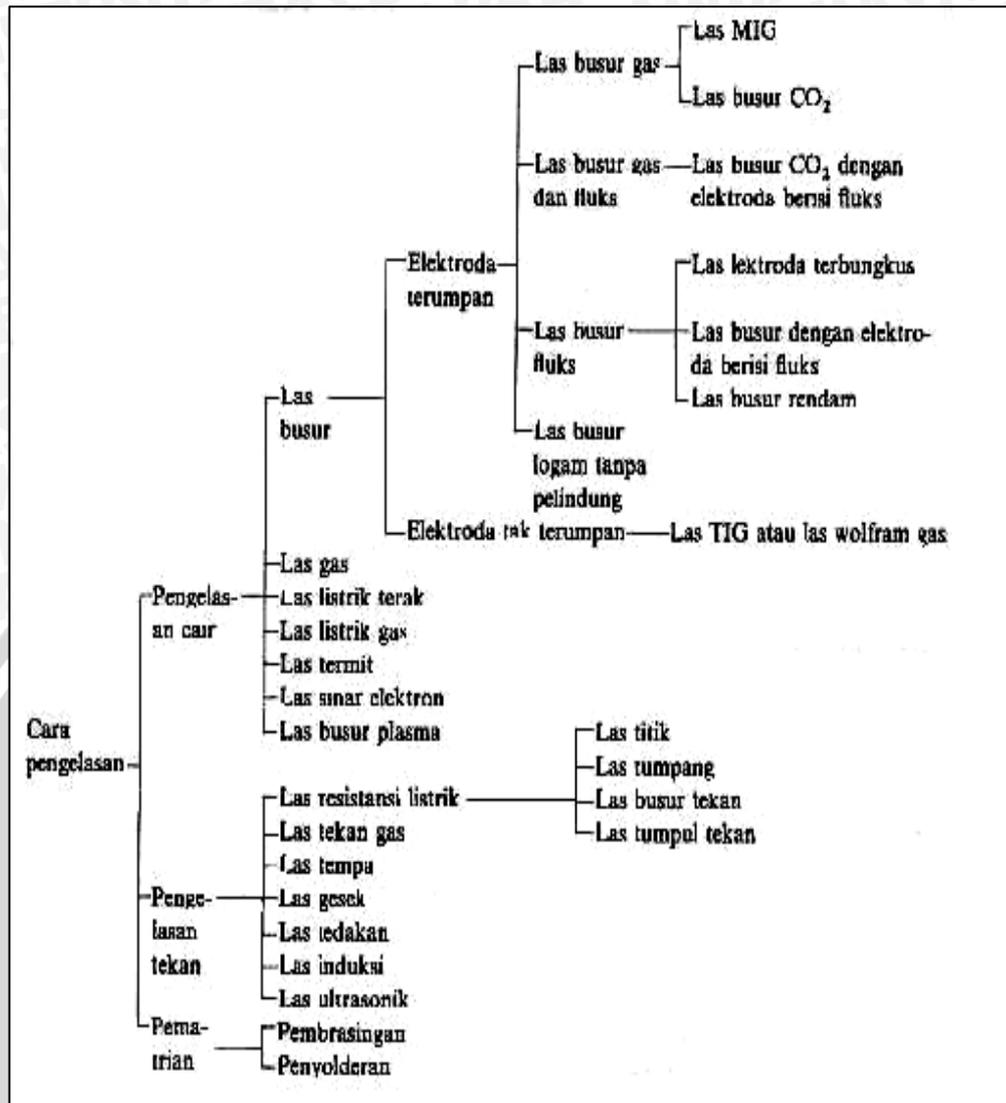
Sumber : Surdia, 1999: 140

2.3 Pengelasan

Las (*welding*) adalah suatu cara untuk menyambungkan benda padat dengan jalan mencairkannya melalui pemanasan (Sriwidarto, hal 1). Berdasarkan cara kerjanya pengelasan dibagi dalam tiga kelas utama, yaitu :

1. Pengelasan cair adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar.
2. Pengelasan tekan adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga menjadi satu.
3. Pematrian adalah cara pengelasan di mana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah.

Bersarkan cara pengelasannya klasifikasi pengelasan dapat dijelaskan pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Klasifikasi pengelasan
 Sumber : Wiryosumarto, 2000, 8

2.4 Las Gesek (*Friction Welding*)

Las gesek merupakan salah satu metode pengelasan tekan dimana sumber panas yang dihasilkan berasal dari gesekan benda itu sendiri. Secara garis besar pengelasan gesek dibagi menjadi dua yaitu :

1. *Linear Friction Welding*

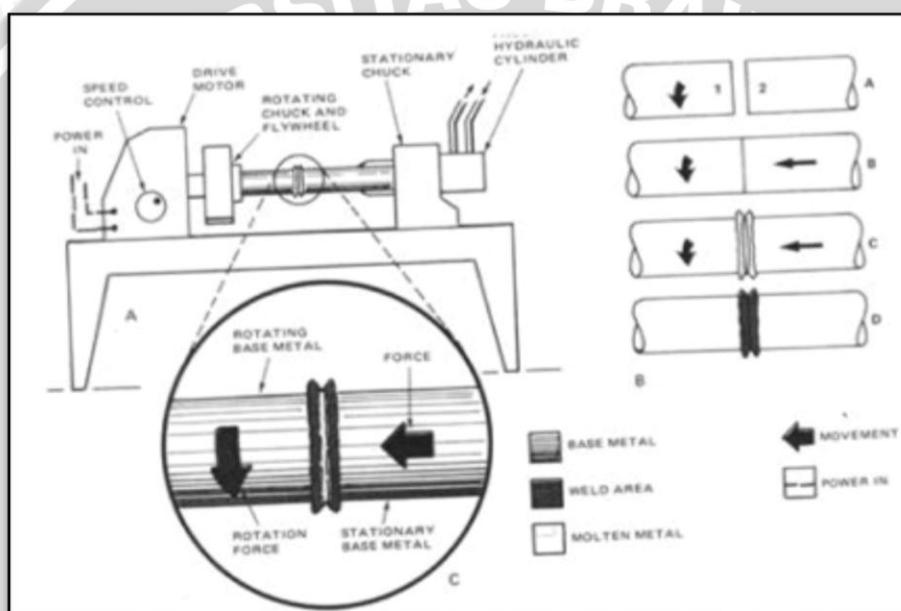
Las gesek dengan sumber panas berasal dari gesekan kedua permukaan benda kerja itu sendiri.

2. *Friction Stir Welding*

Las gesek dengan sumber panas berasal dari gesekan antara benda kerja dan pahat (*Tool*).

2.4.1 Linear Friction Welding

Linear friction welding adalah metode pengelasan gesek yang sumber panasnya berasal dari gesekan kedua permukaan benda itu sendiri. Mekanisme pengelasan ini, dimana salah satu logam berputar relatif terhadap logam satunya dengan kecepatan tertentu dimana logam satunya tidak ikut berputar tetapi memberikan tekanan terhadap logam yang berputar. Adanya gesekan pada ujung permukaan logam tersebut maka timbul panas pada kedua ujungnya, sehingga melelehkan kedua permukaan yang bersentuhan hingga akhirnya kedua logam tersebut menjadi satu. Selanjutnya dilakukan penekanan akhir untuk lebih menyatukan sambungan tersebut skema *linear friction welding* dapat di lihat pada gambar 2.2.

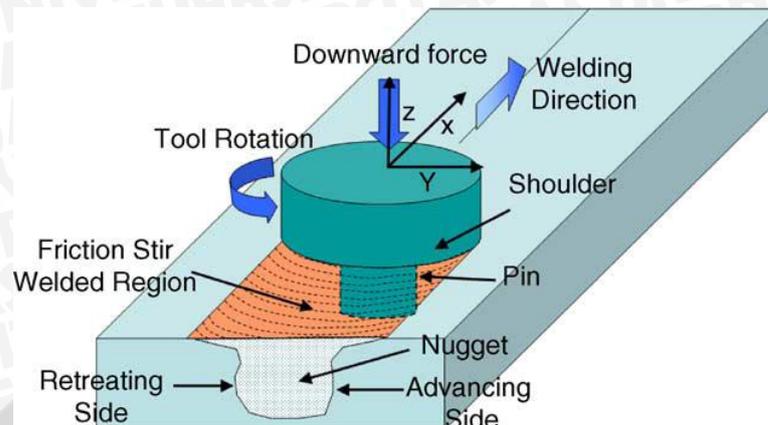


Gambar 2. 2 Skema *friction welding*
 Sumber : *Modern welding*, 1980 : 37

2.4.2 Friction Stir Welding

Friction stir welding (FSW) merupakan salah satu teknik pengelasan baru yang diciptakan oleh The Welding Institut (TWI), Cambridge, Inggris. *Friction stir welding* adalah metode pengelasan gesek yang sumber panasnya berasal dari gesekan antara *tools* dan benda kerja. Mekanisme pengelasan ini, berasal dari gesekan antara *tool* yang berputar dan bergerak dengan kecepatan konstan sepanjang alur sambungan antara dua material yang akan disambungkan. Adanya gesekan antara *tool* dan benda kerja menimbulkan panas sehingga melelehkan permukaan benda yang disambungkan hingga akhirnya terjadi sambungan. Benda kerja di cekam dengan kuat pada ragum untuk

mempertahankan posisinya akibat gaya yang terjadi pada waktu pengelasan. Skema *friction stir welding* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Skema pengelasan *Friction stir welding*
Sumber : Mishra, 2005 : 2

2.4.3 Kelebihan Las Gesek

Beberapa kelebihan dari las gesek antara lain :

1. Prosesnya meminimalisasi energi yang dibutuhkan.
2. Tidak menghasilkan asap, gas, dan berkas sampah.
3. Dapat dilakukan dengan logam yang berbeda jenis.
4. Pengelasan pada temperatur yang rendah, mempertahankan mikrostruktur dan sifat material.

2.4.4 Aplikasi Las Gesek

Penyambungan dengan menggunakan metode ini telah banyak digunakan dalam industri otomotif, industri perkapalan. Contoh penyambungan dengan menggunakan metode ini ditunjukkan pada gambar 2.4 berikut :

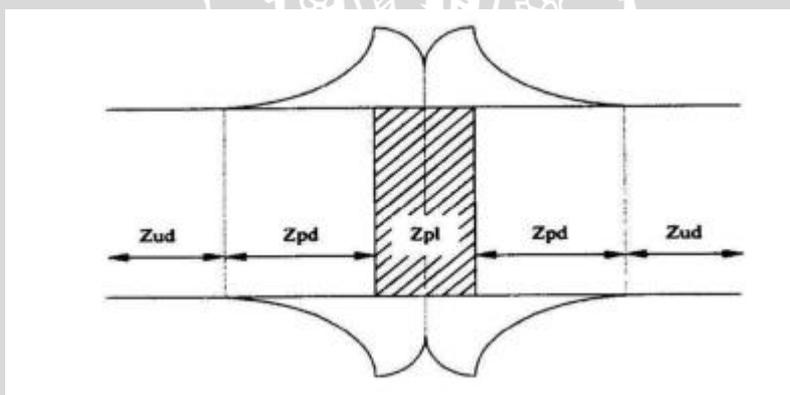


Gambar 2. 4 Aplikasi Las Gesek
Sumber : *Manufacturing Tecnology INC*

2.5 Daerah Lasan

Daerah lasan terdiri dari 3 bagian yaitu logam lasan, daerah pengaruh panas dalam bahasa inggrisnya adalah “*Heat Affected Zone*”, dan logam induk yang tidak terpengaruh panas. Logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Daerah *heat affected zone* (HAZ) adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal. Logam induk adalah bagian logam dasar di mana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan perubahan – perubahan struktur dan sifat.

Pada pengelasan gesek ada beberapa bagian dan bagian tersebut dibagi menjadi tiga yakni *fully plasticized region* (zpl) atau daerah sambungan yang menyatu dengan sempurna, *partly deformed region* (zpd) ini merupakan daerah *heat affected zone* (HAZ) karena pada daerah ini mengalami panas sebagian yang diakibatkan proses pengelasan dan *undeformed region* (zud) atau daerah yang tidak terpengaruh panas sama sekali ketika proses pengelasan. Untuk mengetahui daerah-daerah tersebut maka dapat dilihat dari foto makrostruktur pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 *fully plasticized region* (zpl) *partly deformed region* (zpd) dan *undeformed region* (zud)

Sumber : Lin dkk (1999)

2.6 Pengujian Tarik

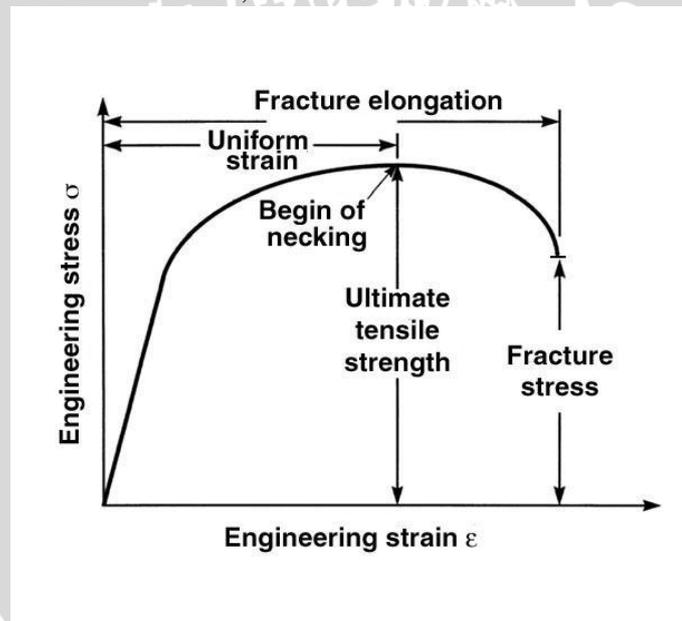
Pengujian tarik merupakan cara umum untuk mengetahui sifat mekanik dari material ketika mendapatkan tegangan tarik. Pengujian tarik pada hasil sambungan las perlu dilakukan untuk mengetahui apakah kekuatan tarik sambungan las mempunyai nilai yang sama, lebih rendah atau lebih tinggi dibandingkan dengan kekuatan tarik dari material itu sendiri. Pembebanan tarik adalah pembebanan yang diberikan kepada benda uji dengan memberikan gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujungnya.

Pada pengujian tarik diberikan beban statik yang meningkat secara perlahan sampai spesimen akhirnya patah. Selama pembebanan dilakukan mesin merekam

pertambahan beban dan perpanjangan spesimen dalam bentuk grafik seperti pada gambar 2.6. Grafik ini kemudian dikonversi ke dalam grafik tegangan dan regangan seperti pada gambar 2.7 dengan menggunakan persamaan 2-1 dan 2-2. Dari gambar grafik 2.7 kita dapat menganalisis sifat mekanik (tarik) material, yang dapat dibagi dalam 1) daerah deformasi elastis, dan 2) deformasi plastis (Bondan, hal 28).



Gambar 2. 6 Grafik pembebanan dan pertambahan panjang yang direkam mesin
Sumber : Pengantar teknik material, 2010 : 29



Gambar 2. 7 Grafik hubungan tegangan – regangan aluminium
Sumber : Aluminium Automotive Manual, 2002 : 3

Tegangan tarik pada material dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ (Kg/mm}^2\text{)} \quad (2-1)$$

keterangan :

$$\sigma = \text{Tegangan (kg/mm}^2\text{)}$$

F = Beban tarik (kg)

A_0 = Luas penampang spesimen mula (mm^2)

Sedangkan regangan (prosentase pertambahan panjang) pada saat itu dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{(L-L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

Keterangan :

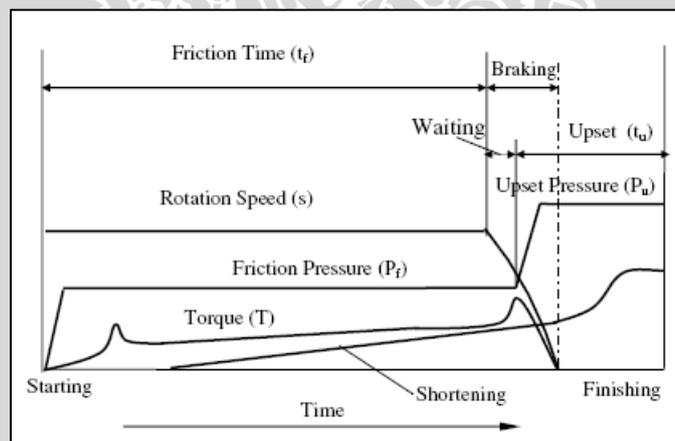
ε = Regangan (%)

L_0 = Panjang batang uji mula (mm)

L = Panjang batang uji akhir (mm)

2.7 Friction Time

Friction time merupakan salah satu parameter dari pengelasan gesek. *Friction time* adalah waktu yang digunakan dalam proses pengelasan gesek. *Friction time* akan mempengaruhi besarnya *heat input* saat pengelasan berlangsung. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.8.

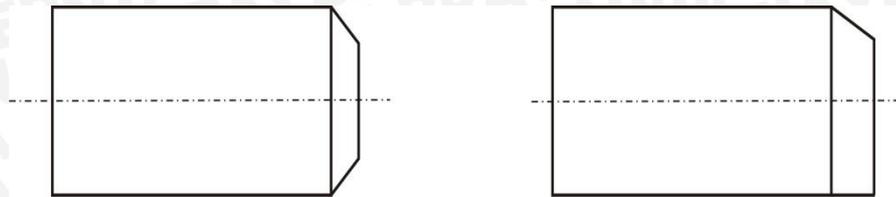


Gambar 2.8 Parameter *friction welding*

Sumber : sahin, 2006

2.8 Sudut Chamfer

Sudut *Chamfer* adalah suatu bentuk geometri benda kerja yang dibuat dengan memotong tepi secara simetris terhadap benda kerja dengan sudut tertentu sampai dengan 90^0 . Tujuan dibuatnya sudut *chamfer* untuk memperkecil luas permukaan benda kerja yang diharapkan dapat meningkatkan kekuatan sambungan las. Geometri sudut *chamfer* dapat dilihat pada gambar 2.9.



Datar / Kerucut

Permukaan datar

Gambar 2. 9 Geometri *chamfer*

Sumber : Kurniawan, 2011 : 14

2.9 Heat Input

Panas total yang dihasilkan dari gesekan kedua permukaan berguna untuk mencairkan kedua benda tersebut. Harga *heat input* merupakan fungsi dari putaran (rpm), tekanan dan koefisien gesek. Untuk mengukur besarnya panas yang dihasilkan dalam pengelasan gesek dapat dihitung melalui persamaan di bawah ini :

$$dQ = \omega \cdot dM \quad (W) \quad (2-3)$$

dengan :

ω = kecepatan sudut

dM = deferensial dari momen torsi.

dM dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$dM = r \cdot dF_{fric} \quad (Nm) \quad (2-4)$$

dengan

dF_{fric} = gaya gesekan

r = jari – jari lingkaran.

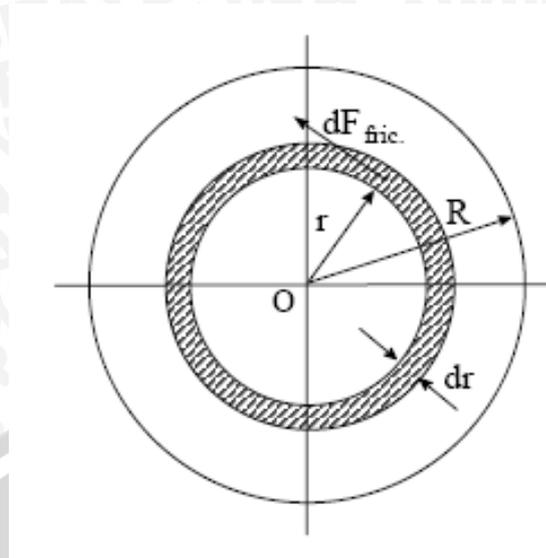
$$dF_{fric} = r \cdot (\mu \cdot P \cdot 2\pi r \cdot dr) \quad (2-5)$$

Dari persamaan 2-4 dan 2-5 diperoleh rumusan berikut :

$$dQ = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \quad (W) \quad (2-6)$$

Hal ini dapat didefinisikan bahwa energi yang terjadi pada permukaan-gesekan adalah panas yang terjadi selama gesekan dengan jarak r dan dr dapat dilihat pada gambar 2.10.





Gambar 2.10 *friction surface dan friction ring (dr)*
 Sumber : Can dkk (2010)

Dengan mengintegrasikan dengan r dari persamaan 2-6 panas yang dihasilkan dirumuskan sebagai berikut :

$$\int_0^R dQ = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot P \cdot \omega \cdot r^2 \cdot dr \quad (2-7)$$

$$\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot P \cdot \omega \cdot \frac{r^3}{3} \Big|_0^R \quad (2-8)$$

$$\dot{Q} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot P \cdot \omega \cdot R^3 \quad (w) \quad (2-9)$$

Torsi total dapat dihitung dengan mengintegrasikan dengan R dari persamaan 2-5 sebagai berikut :

$$M = \int_0^R 2\pi \cdot \mu \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \quad (2-10)$$

$$M = 2\pi \cdot \mu \cdot P \cdot \frac{R^3}{3} \Big|_0^R \quad (2-11)$$

$$M = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot P \cdot R^3 \quad (Nm) \quad (2-12)$$

Jika dibanding dengan persamaan 2-9, panas terjadi pada unit waktu dipermukaan las dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$\dot{Q} = \omega \cdot M \quad (2-13)$$

Panas yang terjadi pada setiap titik pada jarak r dari sumbu rotasi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\dot{Q} = \frac{d\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr} \quad (W/m^2) \quad (2-14)$$

Sehingga panas yang terjadi selama pengelasan pada setiap titik pada jarak r dari sumbu rotasi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\dot{Q} = \pi \cdot \omega \cdot P \cdot r \quad (\text{W/m}^2) \quad (2-15)$$

2.10 Cacat Las

Cacat las adalah suatu keadaan dimana terjadi penurunan kualitas dari hasil lasan. Kualitas yang dimaksudkan adalah penurunan kekuatan dibandingkan kekuatan bahan dasar, dan tidak baiknya perfauma/tampilan dari suatu hasil las. Cacat las akan mengakibatkan banyak hal yang tidak diinginkan dan mengarah pada turunnya tingkat keselamatan kerja. Macam – macam cacat las yang dapat terjadi antara lain sebagai berikut:

1. Cacat porositas

Porositas adalah cacat las akibat terjebaknya gas hydrogen dalam logam las. *Hydrogen* akan terdapat banyak mudah menyusup saat logam dalam fase cair. Saat logam mulai membeku dalam waktu yang relative cepat maka gas *hydrogen* akan terjebak dan membentuk pataui.

2. *Lock of fusion*

Lock of fusion adalah cacat yang disebabkan akibat panas masuk tidak terdistribusi sempurna, akibatnya terdapat sebagian logam yang tidak melebur dan berakibat pada adanya luasan yang tidak tersambung.

3. *Inclusions*

Inclusion adalah cacat las yang terjadi akibat adanya slug yang terjebak dalam hasil lasan. Cacat ini biasa terjadi pada *TIG-welding* dengan menggunakan elektroda tungsten.

4. *Cracking*

Cracking adalah cacat las yang terjadi akibat dari banyak faktor diantaranya akibat kecepatan pendinginan, jenis logam yang disambungkan dan lain – lain.

5. *Undercut*

Undercut adalah cacat las yang disebabkan karena pemakanan salah satu dari kedua sisi lasan. Cacat ini dapat disebabkan karena kurangnya peleburan pada sisi las.

2.11 Anova dua jalur (*Two ways – Anova*)

Anova merupakan analisis yang dilakukan untuk menguji perbandingan rata – rata antara beberapa kelompok data. Analisa ragam dua arah (*Two way analysis of variance*) digunakan untuk membandingkan purata (*mean*) lebih dari dua sampel yang diklasifikasikan menjadi dua faktor atau dua klasifikasi.

Langkah-langkah uji anova dua jalur adalah:

- Sebelum anova dihitung, asumsikan bahwa data dipilih secara random, berdistribusi normal dan variannya homogen.
- Buatlah hipotesis (H_a dan H_o) dalam bentuk kalimat.
- Buatlah hipotesis (H_a dan H_o) dalam bentuk statistika.
- Buatlah daftar statistika induk seperti pada tabel 2.5

Tabel 2. 5 Daftar Statistika Induk

| Variabel | | pengulangan | Kolom (sudut <i>chamfer</i>) | | | | total baris |
|-----------------------------------|----------|-------------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| | | | 11 | 15 | 30 | 45 | |
| Baris (<i>Friction Time</i>) | 90 | 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_{144} | |
| | Σ | | | | | | |
| | 120 | 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} | |
| | Σ | | | | | | |
| | 150 | 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} | |
| | Σ | | | | | | |
| | 180 | 1 | X_{411} | X_{421} | X_{431} | X_{441} | |
| | | 2 | X_{412} | X_{422} | X_{432} | X_{442} | |
| | | 3 | X_{413} | X_{423} | X_{433} | X_{443} | |
| | Σ | | | | | | |
| Σ total | | | | | | | |

- Hitunglah jumlah kuadrat total (JKT)

$$JKT = \sum_{i=1}^r \cdot \sum_{j=1}^c \cdot \sum_{k=1}^n x_{ijk}^2 - \frac{T^2}{rcn} \quad (2 - 16)$$

- Hitunglah jumlah kuadrat antar baris (JKB)

$$JKB = \frac{\sum_{i=1}^r T^2 \dots}{cn} - \frac{T^2 \dots}{rcn} \quad (2-17)$$

- Hitunglah jumlah kuadrat antar kolom (JKK)

$$JKK = \frac{\sum_{j=1}^c T^2 \cdot j}{rn} - \frac{T^2 \dots}{rcn} \quad (2-18)$$

- Hitunglah jumlah kuadrat bagi interaksi JK(BK)

$$JK(BK) = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c T^2_{ij}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^r T^2_{i..}}{cn} - \frac{\sum_{j=1}^c T^2_{.j}}{rn} + \frac{T^2 \dots}{rcn} \quad (2-19)$$

- Hitunglah jumlah kuadrat galat (JKG)

$$JKG = JKT - JKB - JKK - JK(BK) \quad (2-20)$$

- Mencari derajat bebas (dbr; dbc_B; dbr_c; dbd; dbt)

$$dbr_{(BARIS)} = r - 1 \quad (2-21)$$

$$dbc_{(KOLOM)} = c - 1 \quad (2-22)$$

$$dbr_{c (INTERAKSI)} = (dbr) \cdot (dbc) \quad (2-23)$$

$$dbd_{(RESIDU)} = rcn - (r \cdot c) \quad (2-24)$$

$$dbt_{(TOTAL)} = rcn - 1 \quad (2-25)$$

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

$$S_1^2 = \frac{JKB}{r - 1} \quad (2-26)$$

$$S_2^2 = \frac{JKK}{c - 1} \quad (2-27)$$

$$S_3^2 = \frac{JK(BK)}{(c-1) \cdot (r-1)} \quad (2-28)$$

$$S_4^2 = \frac{JKG}{rcn - (r \cdot c)} \quad (2-29)$$

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

$$F_1 = \frac{S_1^2}{S_4^2} \quad (2-30)$$

$$F_2 = \frac{S_2^2}{S_4^2} \quad (2-31)$$

$$F_3 = \frac{S_3^2}{S_4^2} \quad (2-32)$$

- Tentukan taraf signifikannya, misalnya $\alpha = 0,05$ atau $\alpha = 0,01$
- Cari Ftabel (F_1 ; F_2 ; F_3) masing-masing group.

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

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

$$F_{3(\text{tabel})} = F_{3(\alpha)} (\text{dbr:dbd})$$

- Buatlah tabel ringkasan anova

Tabel 2. 6 Ringkasan 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 | | | | | |

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

2.12 Hipotesa

Berdasarkan teori dan beberapa penelitian yang sudah pernah dilakukan dapat ditarik hipotesa bahwa penggunaan sudut *chamfer* pada salah satu sisi dan *friction time* akan mempengaruhi kekuatan tarik sambungan las gesek pada Al – Mg – Si. Dengan adanya variasi ini pada las gesek akan mempengaruhi masukan panas (*Heat Input*), yang akan mempengaruhi luas daerah HAZ. Semakin besar sudut *chamfer* yang digunakan dan *friction time* semakin lama maka *heat inputnya* semakin besar sehingga daerah HAZ yang terjadi semakin luas sehingga mempengaruhi kekuatan tarik dari sambungan las.