

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Irawan *et.al.* (2012), meneliti tentang pengaruh sudut *chamfer* terhadap *tensile strength* sambungan *friction welding* paduan AA 6061. Didapatkan hasilnya yaitu *tensile strength* paduan AA 6061 dengan sudut yang bervariasi $15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$, dan 75° dengan penekanan awal 123 kgf dan penekanan akhir 157 kgf dengan waktu penekanan 2 menit. Didapat nilai kekuatan tarik maksimum pada sudut 30° sehingga didapat hasil mikrostrukturnya pada kekuatan tertinggi spesimen ini disebabkan oleh zona deformasi luasan yang maksimum, porositas minimum, dan luas minimum HAZ.

Santoso *et.al.* (2012), meneliti tentang pengelasan gesek aluminium Al-Mg-Si. Pada penelitiannya variasi sudut *chamfer* yang digunakan adalah $15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}$, dan 75° . Besar gaya tekan awal 123 kgf dan besar gaya tekan akhir bervariasi yaitu 157 kgf, 185 kgf, dan 213 kgf. Hasilnya spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi pada sudut *chamfer* 15° dan dengan gaya penekanan akhirnya 213 kgf memiliki nilai kekuatan tarik sebesar 140,45 Mpa dan spesimen dengan sudut *chamfer* 75° dengan gaya tekan akhir 213 kgf memiliki porositas terendah yaitu 0,21%.

Imawan *et.al.* (2014), meneliti tentang pengaruh sudut *chamfer* dan variasi kekasaran terhadap *tensile strength* sambungan *friction welding* Al-Mg-Si. Variasi sudut *chamfer* yang digunakan yaitu $0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}$, dan 45° dan variasi kekasaran permukaan kontak $1,06 \mu\text{m}$, $0,9 \mu\text{m}$, dan $0,69 \mu\text{m}$. Didapat kekuatan tarik tertinggi sebesar $173,49 \text{ N/mm}^2$ pada variasi sudut *chamfer* 15° dengan kekasaran $0,69 \mu\text{m}$ dan nilai kekuatan tarik terendah sebesar $83,46 \text{ N/mm}^2$ pada variasi sudut *chamfer* 0° dengan kekasaran $1,06 \mu\text{m}$.

2.2 Macam - Macam Aluminium

Macam-macam aluminium menurut jenis paduannya yaitu sebagai berikut:

1. Aluminium murni (seri 1xxx)

Aluminium ini memiliki kemurnian mencapai 99%. Aluminium ini bersifat ketahanan korosi yang baik, konduktor panas dan penghantar listrik yang baik, dan sifat mampu las dan mampu bentuk dan potong yang baik. Kelemahan dari aluminium ini yaitu kekuatannya yang rendah. (Wiryo Sumarto, 2000)

2. Paduan Al – Cu (seri 2xxx)

Paduan Al – Cu yaitu aluminium yang dapat di *heat treatment*. Dengan melalui pengerasan endap sifat mekanik paduan ini dapat setara dengan baja lunak, tetapi daya tahan korosi menjadi lebih rendah dan juga sifat pengelasannya kurang baik. (Wiriosumarto, 2000)

3. Paduan Al – Mn (seri 3xxx)

Paduan ini tidak dapat *heat treatment* sehingga kenaikan kekuatannya hanya dapat melalui pengerjaan dingin. Paduan ini mempunyai sifat yang sama dengan Aluminium seri 1xxx dalam hal daya ketahanan korosi, kemampuan potongnya dan kemampuan lasnya. Tetapi nilai kekuatan paduan ini lebih tinggi dibandingkan dengan jenis Al – murni. (Wiriosumarto, 2000)

4. Paduan jenis Al-Si (seri 4xxx)

Paduan jenis ini ini tidak dapat *heat treatment*. Paduan seri 4xxx ini sering dipakai sebagai bahan dalam pengelasan terutama pada paduan aluminium ,paduan cor, dan maupun paduan tempa. (Wiriosumarto, 2000)

5. Paduan jenis Al-Mg (seri 5xxx)

Aluminium seri ini tidak dapat *heat treatment*, tetapi memiliki ketahanan korosif yang cukup baik, contohnya korosif oleh asam, dan sifat mampu – lasnya tergolong cukup baik. Paduan ini sering dipakai dalam konstruksi tangki gas alam dan *pressure tank*. (Wiriosumarto, 2000)

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

Paduan ini dapat di *heat treatment* dan mempunyai kemampuan potong, kemampuan pengelasan dan ketahanan korosi yang cukup baik. kelemahan dari paduan seri 6xxx ini adalah terjadinya pelunakan di daerah logam lasnya karena akibat dari panas pengelasan. (Wiriosumarto, 2000)

7. Paduan jenis Al-Zn (seri 7xxx)

Paduan jenis 7xxx ini termasuk yang dapat di *heat treatment*. Kekuatan tarik pada jenis paduan ini dapat dicapai lebih dari 50 N/mm², Paduan Al-Zn sering dijumpai dalam konstruksi las, karena paduan seri 7xxx mempunyai kemampuan pengelasan dan ketahanan korosi yang terbaik. (Wiriosumarto, 2000)

2.3 Paduan AA 6061

Paduan AA (*Aluminium Alloy*) 6061 (Aluminium – Magnesium – Silicon) yaitu jenis aluminium yang dapat di *heat treatment* dan mempunyai sifat mampu- potong yang baik, kemampuan pengelasan yang baik, dan ketahanan korosi yang baik (Wirjosumarto,2000). Dalam aplikasinya Aluminium AA 6061 banyak digunakan untuk bahan keling, komponen bodi pesawat dan beberapa *spare part* kendaraan.

Tabel 2. 1 Komposisi Kimia AA 6061

Paduan	Al (%)	Mg (%)	Si (%)	Fe (%)	Mn (%)	Zn (%)	Cu (%)	Cr (%)	Ti (%)
6061	94- 97,4	0,780- 1,12	0,39- 0,79	0,67	0,18	0,35	0,13- 0,37	0,037- 0,33	0,143

Sumber : ASM Aero Space Metal Inc.

Tabel 2. 2 Sifat Mekanik Paduan AA 6061

Paduan	Kondisi	Sifat Tarik (kgf/mm ²)	Sifat Mulur (kgf/mm ²)	<i>Shear strength</i> (kgf/mm ²)	Brinell hardness
AA 6061	0	12,67	5,67	8,46	32
	T4	24,31	14,83	16,97	68
	T6	31,65	28,02	21,05	98

Sumber : Surdia, 1999

Tabel 2.3 Sifat AA 6061

Sifat <i>Aluminium Alloy</i> 6061	Nilai
<i>Density</i>	2.71 g/cm ³
<i>Melting Point</i>	600 ^o C
<i>Electrical Resistivity</i>	0.035x10 ⁻⁶ Ω.m
<i>Modulus of Elasticity</i>	67 Gpa
<i>Thermal Conductivity</i>	180 W/m.K
<i>Coefficient of Friction</i>	0.36

Sumber: Alcoa, 2007

2.4 Unsur Paduan Aluminium

Pengaruh utama pada penambahan unsur paduan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Tembaga

Pengaruh tembaga dalam paduan ini dapat menambah kekuatan aluminium pada temperatur tinggi dan juga memiliki sifat permesinan yang baik.

2. Magnesium

Magnesium digunakan untuk menambah ketahanan karatnya, mampu meningkatkan sifat permesinannya dan sifat bentuknya. Pemberian unsur magnesium tidak menyebabkan berkurangnya sifat *ductile* pada aluminium.

3. Nikel

Pemberian unsur Nikel akan meningkatkan sistem pengerasan pengendapan Ni dengan Mn yang dapat memperbaiki sifat keuletan aluminium.

4. Chromium

Paduan Cr akan menambah sifat ketahanan korosi, sifat mampu las, tahan panas, dan tahan terhadap oksidasi jika diberi kadar yang sedikit. Namun kadar Cr yang berlebihan akan menurunkan sifat mampu bentuk dan permesinannya rendah.

5. Silikon

Penambahan unsur Si dapat memperbaiki sifat coranya dan meningkatkan ketahanan korosinya. Pengaruh buruk akibat penambahan unsur Si dengan kadar berlebih dapat menurunkan kemampuan mesinnya atau menambah kekakuannya.

2.5 Sifat Mampu Las Paduan Aluminium

Berdasarkan sifat mampu las paduan aluminium dibagi dalam lima kategori kelompok yaitu:

1. Jenis aluminium murni teknik dan jenis paduan Al-Mn.
2. Jenis paduan Al-Mg.
3. Jenis paduan Al-Zn-Mg.
4. Jenis paduan Al-Mg-Si.
5. Jenis paduan Al-Cu dan paduan Al-Zn.

Logam dalam kelompok pertama kedua mempunyai sifat mampu las yang baik, kelompok ketiga dan keempat dapat dilas dengan baik jika dilakukan proses *heat treatment*, dan kelompok kelima kemampuan mampu lasnya paling rendah atau tidak dapat dilas sama sekali. (Wiriyosumarto, 2000)

2.6 Las Gesek (*Friction Welding*)

Friction welding merupakan metode pengelasan dengan pemberian gaya tekan dimana terjadinya panas yang dihasilkan berasal dari gesekan benda itu sendiri. Secara garis besar pengelasan gesek dibagi menjadi dua yaitu :

1. *Linier Friction Welding*

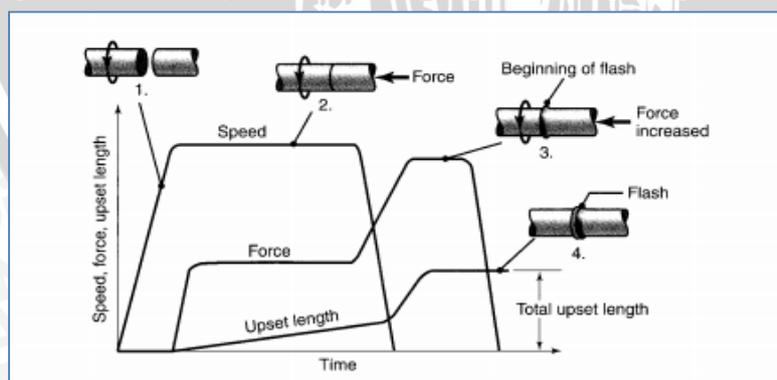
Linier Friction Welding yang timbulnya panasnya berasal pada gesekan antar kedua kontak permukaan benda kerja yang disertai dengan pemberian gaya tekan.

2. *Friction Stir Welding*

Las gesek dengan timbul terjadinya panas yang berasal pada gesekan spesimen dan pahat (*Tools*).

2.6.1 *Linier Friction Welding*

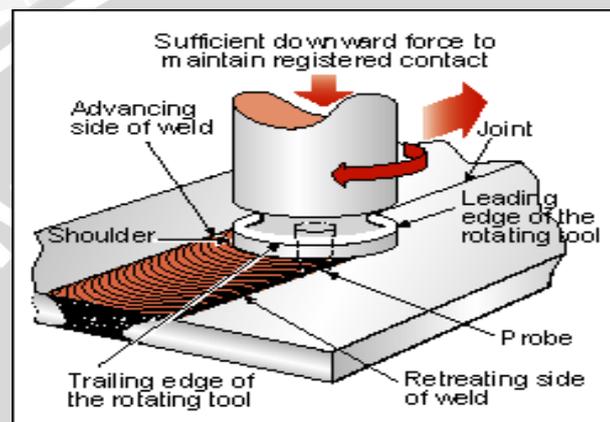
Linear friction welding adalah metode pengelasan gesek yang terjadi panasnya berasal dari gesekan kedua permukaan benda itu sendiri yang adanya pemberian gaya tekan di salah satu material tersebut. Mekanisme pengelasan ini, dimana salah satu logam berputar terhadap logam satunya dengan kecepatan tertentu dimana logam satunya diam tetapi memberikan gaya tekan pada logam yang lainnya. Gesekan yang terjadi pada ujung permukaan logam tersebut maka timbul panas pada kedua ujungnya, sehingga kedua permukaan yang bersentuhan terdeformasi dan suhu mencapai suhu rekristalisasi hingga akhirnya kedua logam tersebut menjadi satu. Selanjutnya dilakukan penekanan akhir agar mempercepat difusi pada sambungan las sehingga dapat tersambung. Skema *linear friction welding* dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Skema *friction welding*
Sumber : *Modern welding*, 1986 : 36

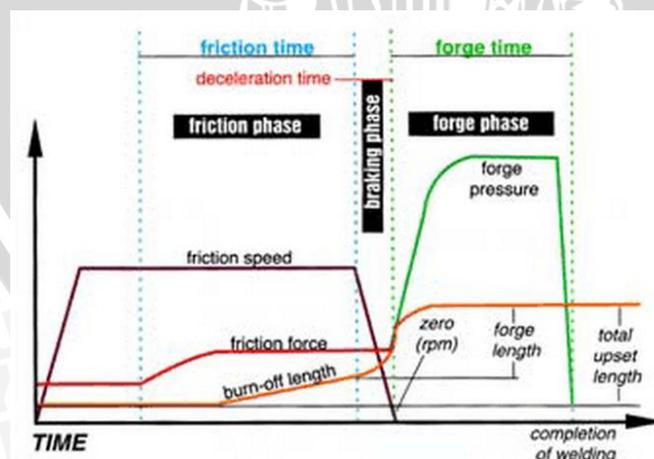
2.6.2 Friction Stir Welding

Friction Stir Welding adalah metode pengelasan gesek yang gesekannya yang terjadi antara benda kerja dengan pahat. Benda kerja yang akan disambung menjadi satu dicekam berhimpitan di bawah pahat yang telah dipasang pada mesin frais atau mesin bor. Pahat yang berputar menekan benda kerja sehingga akan timbul panas akibat gesekan benda kerja tersebut dengan pahat yang berputar. Panas tersebut akan melelehkan benda kerja sehingga terjadi penyambungan, simulasi proses pengelasan dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2.2 Skema proses *friction stir welding*
Sumber : *Modern welding*, 1980 : 39

Pada pengelasan gesek (*friction welding*) terjadi fenomena mekanik ke termal, seperti perubahan panas akibat gesekan, deformasi plastis, solidifikasi, perubahan struktur dan sebagainya. Adapun parameter penting dalam proses pengelasan gesek dilihat pada gambar 2.4



Gambar 2.3 Parameter *friction welding*
Sumber : Sahin, 2007

Berdasarkan diagram parameter pada *friction welding* pada gambar 2.4 diatas dapat di bagi menjadi tiga tahap fase yaitu:

- Fase *Friction*

Dimana fase ini terjadi gesekan untuk meningkatkan temperatur. Peningkatan temperatur ini terjadi karena adanya timbul panas yaitu gesekan dua buah logam dan disertai dengan pemberian gaya yang dijaga konstan.

- Fase *Braking*

Dalam fase ini kondisi *friction speed* mengalami penurunan kecepatan dan kondisi benda telah mengalami penyambungan sementara, karena ini diharapkan durasi waktu secepat mungkin agar panas yang terjadi tidak hilang.

- Fase *Forge*

Dalam fase ini kondisi dimana tidak ada *friction speed* namun terjadi peningkatan tekanan akhir yang bertujuan mempercepat difusi penyambungan material sehingga terdeformasi plastis yang kemudian muncul *upset / flash* hasil pemberian tekanan akhir pada daerah lasan.

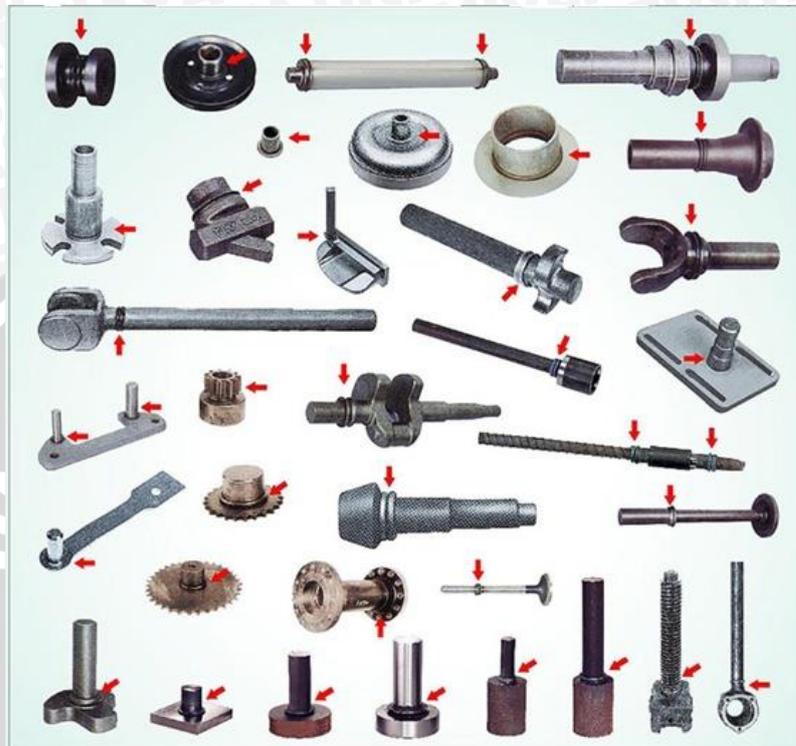
2.6.3 Kelebihan *Linear Friction Welding*

Beberapa kelebihan dari *Linear friction welding* antara lain :

1. Tidak menimbulkan asap, gas, dan ramah lingkungan.
2. Dapat dilakukan dengan logam yang berbeda jenis.
3. Kekuatan sambungan sama atau lebih kuat dari logam induknya.
4. Pengelasan pada temperatur yang rendah tidak mencapai titik lebur, mempertahankan mikrostruktur dan sifat material.
5. Sifat mekanik hasil sambungan las baik.
6. Distorsi atau penyusutan setelah las relatif kecil.
7. Hasil sambungan las lebih bersih dan rapi tidak ada bekas hasil pengelasan.
8. Berbagai macam bentuk dapat menggunakan metode pengelasan gesek.
9. Tidak memerlukan logam pengisi pada saat proses pengelasan.
10. Terjadinya *defect* pada hasil proses pengelasan relatif kecil.

2.6.4 Aplikasi Friction Welding

Penyambungan dengan menggunakan metode ini sering sekali dijumpai dalam industri otomotif, industri perkapalan. Contoh penyambungan dengan menggunakan metode ini ditunjukkan pada gambar 2.3 berikut :



Gambar 2.4 Aplikasi Las Gesek
Sumber : Da Jie Manufacturing

2.7 Energi Pengelasan

2.7.1 Energi mekanik pada proses *friction welding*

Energi mekanik ini merupakan energi panas yang diakibatkan gesekan antara dua kontak permukaan logam aluminium tersebut. Hal ini diasumsikan bahwa tekanan gesek yang sama menyebar pada bagian-bagian benda yang berputar dan benda yang tidak berputar. Energi panas yang dihasilkan dapat dinyatakan dengan rumus:

$$dQ = \omega \cdot dMt \quad (W) \quad (2-1)$$

Dimana :

Q = Jumlah energi mekanik per satuan waktu di permukaan las gesek (W)

ω = Kecepatan Sudut (rad/s)

M_t = Momen Torsi (Nm)

Dimana ω adalah kecepatan putaran dan dM_t ialah perbedaan nilai momen torsi pada dr .

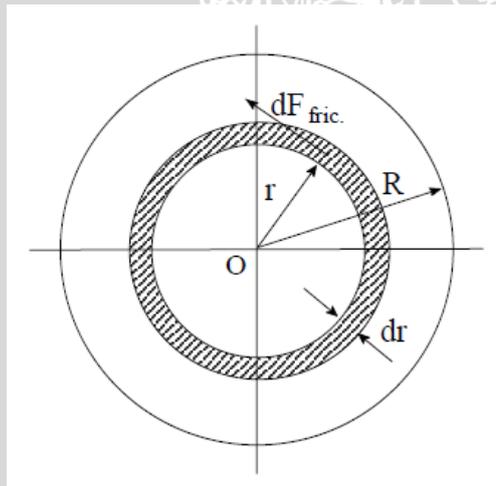
Kemudian nilai torsi dapat dihitung dengan rumus :

$$dM_t = r \cdot dF_{\text{friction}} \quad (\text{Nm}) \quad (2-2)$$

dimana :

r = Radius (mm)

Dimana nilai dF_{friction} yaitu gaya gesek pada lingkaran dengan lebar dr dan r adalah jari – jari lingkaran. Kemudian, hal tersebut dapat dijelaskan bahwa gaya gesek dF_{friction} setara dengan koefisien gesek dikali dengan gaya aksial pada tekanan P pada lingkaran dengan jari-jari dr . Skema terdapat di gambar 2.6.



Gambar 2.5 Daerah Terkena Gesekan
Sumber: Sahin, (2010 : 32)

$$dF_{\text{friction}} = r (\mu \cdot P \cdot 2\pi r \cdot dr) \quad (2-3)$$

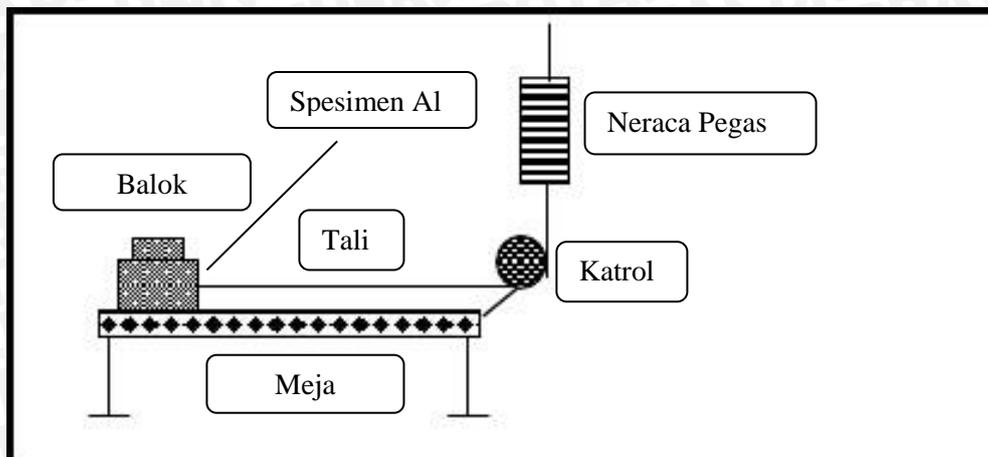
nilai μ dapat diperoleh dari rumus:

$$\mu = \frac{F_s}{N}$$

Dimana :

- μ = Koefisien Gesek
- F_s = Gaya Gesek (N)
- N = Gaya Normal (N)

Nilai μ dapat dicari dengan menggunakan eksperimen seperti pada gambar 2.7 di bawah



Gambar 2.6 Mengukur Koefisien Gesek Aluminium
Sumber : Sutarno, (2013)

Kemudian dengan menggabungkan persamaan (2 – 2) dan persamaan (2 – 3) pada persamaan (2 – 1) maka didapatkan :

$$dQ = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \quad (W) \quad (2-4)$$

Rumus (2 – 4) tersebut kemudian diintegalkan dengan nilai R pada (spesimen pejal) untuk menjelaskan jumlah kalor yang terjadi selama proses gesekan.

$$\int_0^R dQ = 2\pi \cdot \mu \cdot P \cdot \omega \cdot r^2 \cdot dr \quad (2-5)$$

$$Q = 2\pi \cdot \mu \cdot P \cdot \omega \cdot \frac{r^3}{3} \Big|_0^R \quad (2-6)$$

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot P \cdot \omega \cdot R^3 \quad (W) \quad (2-7)$$

Setelah itu didapatkan total torsi dengan mengintegrasikan R dari persamaan (2 – 3) adalah sebagai berikut :

$$M = \int_0^R 2\pi \cdot \mu \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \quad (2-8)$$

$$M = 2\pi \cdot \mu \cdot P \cdot \frac{R^3}{3} \Big|_0^R \quad (2-9)$$

$$M = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot P \cdot R^3 \quad (\text{Nm}) \quad (2-10)$$

Kemudian persamaan (2 – 7) dibandingkan dengan persamaan (2 – 10), panas yang didapat di seluruh permukaan las setara total torsi dikalikan dengan kecepatan sudut. Persamaannya yaitu :

$$Q = \omega \cdot M \quad (\text{W}) \quad (2-11)$$

2.8 Heat Affected-Zone (HAZ)

Panas pengelasan pada paduan aluminium akan menyebabkan terjadinya deformasi sebagian. Daerah pengaruh panas atau logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat. Yang mana nilai perubahan suhu tersebut akan mengakibatkan mikrostruktur dan sifat mekanisnya berbeda dengan logam induk, daerah atau zona ini dinamakan *heat affected zone (HAZ)*. (Wiryosumarto dan Okumura, 2004: 56)

Pada daerah *HAZ* dapat terjadi penurunan kekuatan dan ketahanan korosi bahkan dapat menjadikan daerah las menjadi getas. Kekuatan *HAZ* akan hilang karena dipengaruhi oleh *heat input*, kecepatan pengelasannya dan pendinginan pengelasan. Jika *heat input* yang semakin tinggi, maka *HAZ* yang terbentuk semakin lebar dan semakin banyak kekuatan yang hilang karena temperaturnya meningkat (Sindo Kou, 2002).

2.9 Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian Tarik merupakan cara mengetahui *mechanical properties* dari material ketika didapat tegangan tarik. Pengujian kekuatan tarik pada sambungan las sangat perlu dilakukan untuk dapat mengetahui nilai kekuatan tarik sambungan las mempunyai nilai yang sama atau lebih tinggi dibanding dengan kekuatan tarik material logam induk sendiri.

Kekuatan tarik merupakan kemampuan bahan untuk menerima beban tarik maksimum sampai bahan tersebut menalami regangan dan dinyatakan sebagai tegangan

maksimal sebelum putus.. Secara skematik tegangan tarik pada material dapat dituliskan:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2-12)$$

Dengan:

σ = Tegangan tarik maksimum (N/mm²)

F_{max} = Gaya tarik maksimum (N)

A = Luas Penampang (mm²)

Sedangkan regangan (persentase pertambahan panjang) dapat dirumuskan:

$$\varepsilon = \frac{(L-L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (2-13)$$

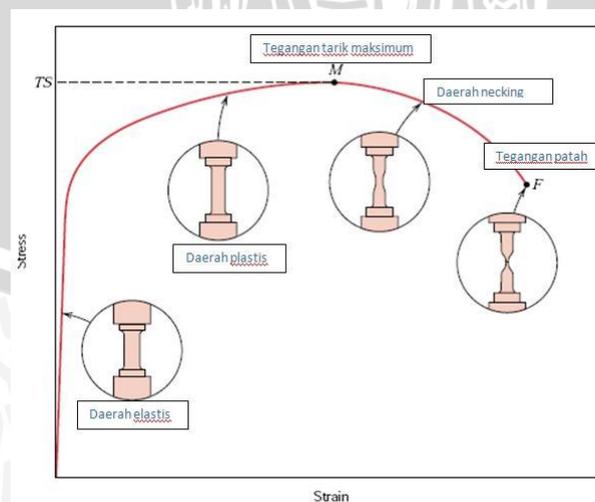
Dengan:

ε = Prosentase Regangan (%)

L_0 = Panjang mula (mm)

L = Panjang akhir (mm)

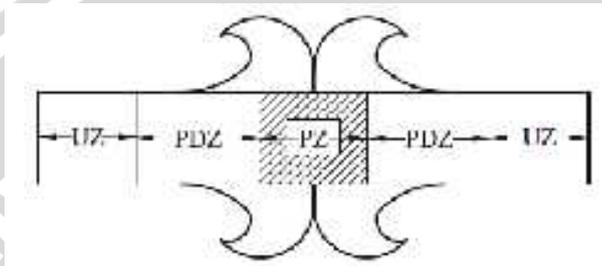
Pengujian tarik ini memberikan beban yang statik yang meningkat secara perlahan sampai spesimen akhirnya patah dan bentuk grafik perputahannya ada pada gambar 2.8



Gambar 2.7 Grafik Hubungan Tegangan Regangan
Sumber : Pengantar teknik material, (2010)

2.10 Pengujian Makrostruktur

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh *friction time* dengan panjang *chamfer* 3 mm terhadap kondisi makrostruktur pada tiap daerah logam las, HAZ, maupun logam induk. Pengujian ini biasanya menggunakan kamera lensa yang diperbesar sehingga terlihat daerah-daerah batas las, HAZ, maupun logam induk. Sebelum dilakukan foto makrostruktur, terlebih dahulu spesimen yang akan diuji dilakukan *etching* menggunakan cairan HF agar batas las, HAZ, dan logam induk dapat terlihat jelas. Contoh daerah yang akan diuji makrostruktur dilihat pada gambar 2.9



Gambar 2.8 Penampang melintang dari *friction welding*
Sumber : Eko Budi Santoso, (2012)

2.11 Pengujian Kekerasan

Uji kekerasan pada penelitian ini merupakan pengujian untuk mengukur ketahanan material terhadap deformasi plastis gores pada suatu permukaan. Pada metode ini, umumnya menggunakan indenter kecil (piramid) yang ditekan pada permukaan benda dengan besar bebannya dikontrol dan laju pembebanannya. Indentasi (besar jejak) kemudian diukur dan dihitung dengan mikroskop. Untuk penelitian ini, pengujian kekerasan hanya menggunakan pengujian kekerasan *vickers*.

Uji kekerasan *vickers* menggunakan penumbuk piramida intan yang berbentuk bujur sangkar. Besarnya sudut piramid yang saling berhadapan yaitu 136° . Beban tekan atau indentasi yang digunakan pada pengujian kekerasan *vickers* berkisar antara 1 – 120 kg. Kelebihan dari pengujian kekerasan *vickers* ini sering dilakukan pada penelitian karena metode ini memberikan hasil skala kekerasan yang berlanjut, kelebihan lain yaitu indenter yang sangat kecil sehingga dapat memungkinkan mengetahui dan mengukur kekerasan dengan jarak kurang dari 0,5 mm dan kekerasan *micro vickers* dilengkapi mikroskop yang dapat mengetahui batas-batas daerah yang akan diuji kekerasannya.. Kelemahan dari uji *vickers* ini yaitu jarang digunakan untuk pengujian rutin karena pengujian ini terbilang lambat, memerlukan persiapan spesimen yang hati-

hati, dan dapat juga pengaruh kesalahan manusia pada penentuan panjang diagonal yang terbentuk. Diagonal yang terbentuk dapat dihitung dengan rumus :

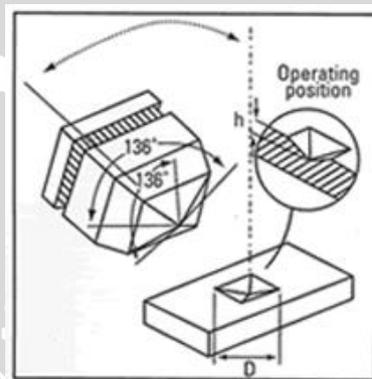
$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = \frac{1.854 P}{L^2} \quad (2-14)$$

Dengan :

P = Beban (kg)

L = Panjang diagonal rata-rata (mm)

θ = Sudut antara permukaan intan yang berlawanan (136°)



Gambar 2.9 Indentor piramid intan pada metode vickers
Sumber : Pengantar material teknik, 2010

2.12 Pengujian Mikrostruktur

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui jumlah butir atau ukuran butir dalam suatu daerah las, *HAZ*, maupun logam induk. Untuk mengetahui butiran – butiran di dalam suatu daerah tersebut, digunakan metode *planimetric (jeffries method)*. Dalam metode ini dilakukan untuk menghitung besar butir per satuan luas dengan diameter 80 mm (luas lingkaran 5000 mm^2). Metode ini dapat digunakan bila didalam lingkaran terdapat minimal 50 butir. Adapun rumus yang digunakan *jeffries method*:

$$N_A = f\left(N_{\text{Inside}} + \frac{N_{\text{Intercept}}}{2}\right) \quad (2-15)$$

Kemudian hasil N_A dihitung menggunakan rumus ASTM E-112 yaitu ASTM *Grain Size* di bawah ini :

$$G = (3.321928 \log_{10} N_A) - 2.954 \quad (2-16)$$

Dengan,

N_A = Banyaknya butir (pcs/mm²)

f = Bilangan Jeffris

G = Grain Size

Tabel 2.4 Hubungan ukuran butir dengan diameter butir (ASTM E- 112)

Grain Size No. G	N_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{D} Average Diameter		$\bar{\lambda}$ Mean Intercept		N_A No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm^2	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	262.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

2.13 Hipotesis

Dugaan sementara berdasarkan teori dan beberapa penelitian diduga penggunaan variasi *friction time* dengan panjang *chamfer* 3 mm diharapkan pada proses pengelasan akan mempengaruhi temperatur panas. Diduga bahwa semakin kecil *friction time* luasan daerah *Heat Affected Zone* yang timbul semakin kecil di daerah sambungan las AA 6061 dengan temperatur panas yang dihasilkan semakin rendah sehingga struktur butiran akan semakin kecil dan rapat sehingga nilai kekuatan tarik sambungan las semakin tinggi.