

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

- 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  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ , dan  $75^{\circ}$  dan penekanan 123 kgf dan gaya tekan akhir 157 kgf dengan waktu penekanan 2 menit didapat nilai kekuatan tarik terbesar pada sudut  $30^{\circ}$  dan hasil mikrostruktur kekuatan tinggi pada spesimen ini disebabkan oleh ukuran diameter butiran yang kecil dan rapat sehingga porositas minimum.

- Yova Andika Yeni Rochman, Dosen Pembimbing Yudy Surya Irawan dan Marsoedi Wirohardjo (2010)

Dalam proses penyambungan aluminium dengan cara pengelasan gesek telah banyak di kembangkan untuk mendapat distribusi kekerasan pada sambungan yang maksimum. Pemakaian sudut *chamfer* yang berbeda pada sisi benda kerja bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruhnya pada distribusi kekerasan sambungan pada pengelasan gesek.

Pada penelitian ini didapat kesimpulan bahwa yang mana luasan HAZ terbesar pada benda tanpa sudut *chamfer* yaitu  $74.53 \text{ mm}^2$ . Sedangkan untuk daerah las terbesar terdapat pada benda kerja yang menggunakan sudut *chamfer*  $30^{\circ}$  yaitu  $39.78 \text{ mm}^2$ .

- Ari Kuswandi, Dosen Pembimbing Yudy Surya Irawan (2010)

Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa *friction time* berpengaruh terhadap kekuatan *impact* sambungan las gesek. Kekuatan *impact* rata-rata tertinggi terjadi pada sambungan las gesek dengan *friction time* 60 detik sebesar  $177.41 \text{ N.mm/mm}^2$ , dan 180 detik sebesar  $102.51 \text{ N.mm/mm}^2$ . Penggunaan *friction time* akan menghasilkan sambungan yang berbeda ditinjau dari foto mikrostruktur, kekuatan *impact* sambungan dipengaruhi oleh sempit luasnya daerah HAZ yang terbentuk, sedikit tidaknya porositas dan besarnya luas daerah *fully plasticized*.

- Bilal Ardhiyanto Dosen Pembimbing Yudy Surya Irawan dan Winarno (2010)

Pada penelitian *friction welding* tanpa sudut *chamfer* yang dilakukan dengan variasi *friction time* yang digunakan didapat kesimpulan yaitu penggunaan *friction time* dapat mempengaruhi kekuatan tarik sambungan las gesek, dengan kekuatan tarik rata-

rata tertinggi tercapai pada *friction time* 60 detik dengan nilai kekuatan tarik  $136.92 \text{ N/mm}^2$  dan kekuatan tarik rata-rata terendah pada *friction time* 180 detik sebesar  $74.74 \text{ N/mm}^2$ .

## 2.2 Klasifikasi Paduan Aluminium

Paduan aluminium diklasifikasikan dalam berbagai standar oleh berbagai negara di dunia. Saat ini klasifikasi yang terkenal adalah standar *Aluminium Association* (AA) di Amerika yang didasarkan atas standar yang terdahulu dari *Aluminium Company of Amerika* (ALCOA). Paduan tempaan dinyatakan dengan satu huruf atau dua huruf "S", sedangkan paduan coran dinyatakan dengan 3 angka. Standar AA menggunakan penandaan dengan 4 angka sebagai berikut:

1. Angka pertama menyatakan sistem paduan dengan unsur-unsur yang ditambahkan, yaitu: 1: Al murni, 2: Al-Cu, 3: Al-Mn, 4: Al-Si, 5: Al-Mg, 6: Al-Mg-Si, 7: Al-Zn, sebagai contoh paduan Al-Cu dinyatakan dengan angka 2000.
2. Angka kedua menyatakan kemurnian dalam paduan yang dimodifikasi dan Al murni.
3. Angka ketiga dan keempat dimaksudkan untuk tanda ALCOA terdahulu kecuali S. sebagai contoh 3S sebagai 3003 serta 63S sebagai 6063.

Al dengan kemurnian 99.0% atau di atasnya dengan kemurnian terbatas (2S) dinyatakan sebagai 1100 (Tata Surdia, 2000: 135). Tabel 2.1 menunjukkan hal tersebut.

Tabel 2.1 Klasifikasi paduan aluminium tempaan

Standar AA	Standar ALCOA terdahulu	Keterangan
1001	1S	Al murni 99.5% atau di atasnya
1100	2S	Al murni 99.0% atau di atasnya
2010-2029	10S-29S	Cu merupakan unsur paduan utama
3003-3009	3S-9S	Mn merupakan unsur paduan utama
4030-4039	30S-39S	Si merupakan unsur paduan utama
5050-5086	50S-69S	Mg merupakan unsur paduan utama
6061-6069	50S-69S	$\text{Mg}_2\text{Si}$ merupakan unsur paduan utama
7070-7079	70S-79S	Zn merupakan unsur paduan utama

Sumber: Surdia, 1999: 135

Aluminium dapat diklasifikasikan menurut jenis paduannya, sebagai berikut:

1. Jenis Aluminium-murni (seri 1000)

Jenis ini adalah aluminium dengan kemurnian 99.0% dan 99.99%. Aluminium dalam seri ini disamping sifatnya yang baik dalam ketahanan karat, konduktor panas dan listrik, juga memiliki sifat yang sangat memuaskan dalam mampu las dan mampu mesin. Hal yang kurang menguntungkan adalah kekuatannya yang rendah.

2. Jenis Paduan Aluminium-Cu (seri 2000)

Jenis paduan Al-Cu adalah jenis yang dapat diperlakukan panas. Melalui pengerasan endap atau penyepuhan sifat mekanik paduan ini dapat menyamai sifat baja lunak, tetapi daya tahan korosinya rendah apabila dibandingkan dengan jenis paduan yang lainnya. Sifat mampu lasnya juga yang kurang baik. Jenis paduan ini sering digunakan pada konstruksi pesawat terbang.

3. Jenis Paduan Al-Mn (seri 3000)

Paduan ini adalah jenis yang tidak dapat diperlakukan panas sehingga untuk menaikkan kekuatannya hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin dalam proses pembuatannya. Bila dibandingkan dengan jenis Al murni paduan ini mempunyai sifat yang sama dalam hal ketahanan korosi, mampu potong dan sifat mampu lasnya. Dalam hal kekuatan jenis paduan ini lebih unggul dari pada jenis aluminium murni.

4. Jenis Al-Si (seri 4000)

Paduan Al-Si termasuk jenis yang tidak dapat diperlakukan panas. Jenis ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik dalam proses pembekuannya hampir tidak terjadi retak. Karena sifat yang dimilikinya, maka paduan jenis Al-Si banyak digunakan sebagai bahan atau logam las dalam pengelasan paduan aluminium baik paduan cor maupun paduan tempa.

5. Paduan Jenis Al-Mg (seri 5000)

Jenis paduan ini tidak dapat diperlakukan panas, tetapi mempunyai sifat yang baik dalam ketahanan korosi, terutama korosi air laut, dan baik sifat mampu lasnya. Paduan Al-Mg banyak digunakan dalam konstruksi umum dan juga tanki-tanki penyimpanan gas alam cair dan oksigen cair.

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

Paduan ini termasuk dalam jenis paduan Al yang dapat diperlakukan panas dan mempunyai sifat yang baik dalam mampu potong, mampu las dan ketahanan korosi.

Sifat yang kurang baik dalam paduan ini pada daerah las terjadi pelunakan yang terjadi akibat pengelasan yang timbul.

#### 7. Paduan Jenis Al-Zn (seri 7000)

Paduan jenis ini termasuk dalam kategori yang dapat diperlakukan panas. Biasanya dalam paduan pokok Al-Zn ditambahkan Mg, Cu dan Cr. Kekuatan tariknya yang dapat dicapai lebih dari  $5.10^{-4}$  N/mm<sup>2</sup>, sehingga paduan ini dinamakan juga ultra duralumin. Berlawanan dengan kekuatan tariknya, sifat mampu lasnya dan ketahanan terhadap korosi kurang baik. Saat ini paduan Al-Zn-Mg banyak digunakan dalam konstruksi las, karena jenis ini mempunyai sifat mampu las dan ketahanan korosi yang lebih baik dari pada paduan dasar Al-Zn. (Wirjosumarto, 2000)

### 2.3 Sifat – Sifat Aluminium

#### 1. Berat jenis

Berat jenis aluminium paduan lebih kecil dari pada keadaan normalnya. Umumnya untuk aluminium dengan kandungan 99.99 % adalah  $2.7 \times 10^{-4}$  N/mm<sup>3</sup>. (Wirjosumarto, 1994:157).

#### 2. Kekerasan

Aluminium murni mempunyai kandungan aluminium sebesar 99.99% yang mempunyai kekerasan 17 BHN. Dengan menambahkan unsur paduan dan perlakuan panas dapat diperoleh paduan Al dengan kekerasan yang lebih tinggi. Sebagai contoh, paduan aluminium dengan 4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.5% Mn yang biasa disebut paduan 2024 yang mempunyai kekerasan 120 BHN. (Tata Surdia, 1990: 137)

#### 3. Kekuatan tarik maksimum

Kekuatan tarik maksimum didefinisikan sebagai kekuatan tarik yang dapat ditahan oleh material sebelum putus. Harga kekuatan tarik maksimum diperoleh dengan membandingkan antara beban maksimum selama tes dengan luas penampang mula material yang di uji. Untuk aluminium dengan kemurnian 99.99% kekuatan tarik maksimumnya adalah  $49$  N/mm<sup>2</sup>.

#### 4. Daya hantar panas

Aluminium mempunyai daya hantar panas yang baik. Hal ini dapat dilihat cepatnya distribusi panas dari daerah yang temperatur tinggi ke daerah yang temperaturnya rendah. Hal inilah yang menyebabkan aluminium digunakan sebagai

peralatan pemanas atau untuk berbagai keperluan yang berhubungan dengan perpindahan panas.

#### 5. Daya hantar listrik

Aluminium mempunyai daya hantar listrik 65% dari tembaga, sedangkan massa jenisnya kira-kira 1/3 massa jenis tembaga. Karena daya hantar listrik yang baik ini, aluminium banyak digunakan sebagai penghantar listrik. Tapi untuk keperluan ini aluminium harus semurni mungkin. Dalam hal ini dapat digunakan aluminium dengan kemurnian 99.0% atau di atasnya.

#### 6. Ketahanan terhadap korosi

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi yang baik sekali berkat lapisan kuat oksida aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pada permukaannya. Lapisan inilah yang melindungi aluminium selanjutnya. Lapisan ini terbentuk seketika pada permukaan aluminium ketika aluminium berkontaminasi dengan udara. Jika lapisan ini koyak, maka dengan sendirinya terbentuk lapisan film yang baru hasil reaksi dengan udara. Inilah yang dinamakan aluminium mempunyai daya tahan korosi yang alamiah.

### 2.4 Pengaruh Unsur Paduan

Pengaruh utama yang disebabkan oleh penambahan unsur paduan dapat dijelaskan sebagai berikut:

#### 1. Tembaga

Pengaruh tembaga dalam paduan aluminium adalah dapat meningkatkan kekuatan aluminium pada temperatur tinggi. Paduan aluminium yang mengandung tembaga merupakan paduan yang memiliki sifat mampu mesin yang baik.

#### 2. Silikon

Pengaruh yang nampak dalam penambahan silikon adalah dapat memperbaiki sifat mampu cornya. Selain itu paduan silikon akan meningkatkan ketahanan korosinya, baik adanya penambahan unsur lainnya atau tidak. Pengaruh buruk akibat penambahan silikon ini adalah dapat menurunkan kemampuan mesinnya.

#### 3. Magnesium

Magnesium digunakan untuk meningkatkan ketahanan karatnya. Bila dipadukan dengan silikon juga, maka ketahanan karatnya semakin besar. Magnesium tidak

menyebabkan berkurangnya sifat *ductile* logam. Selain itu magnesium mampu meningkatkan sifat mampu mesin dan mampu bentuknya.

4. Mangan

Mangan mampu meningkatkan ketahanan karat aluminium serta bila ditambahkan magnesium juga maka dapat memperbaiki kekuatan aluminium tersebut.

5. Nikel

Pemaduan aluminium dengan nikel akan meningkatkan sistem pengerasan pengendapan Ni dengan Mn secara bersama-sama akan sangat efektif dalam memperbaiki keuletan aluminium.

6. Zinc

Zn akan menambah kekuatan aluminium. Kekuatan paduan aluminium yang maksimum adalah 5-6% dengan sejumlah Mg dan Cu yang lebih sedikit.

7. Chromium

Sejumlah kecil Cr ditambahkan terhadap aluminium akan memperbaiki ketahanan korosi, sifat mampu las, tahan panas dan oksidasi. Namun demikian jumlah Cr terhadap aluminium yang berlebihan akan menurunkan mampu bentuknya

8. Lead dan Bismuth

Lead dan Bismuth yang ditambahkan pada aluminium akan memperbaiki kemampuan mesinnya.

## 2.5 Sifat Mampu Las Aluminium

Dalam hal pengelasan paduan aluminium mempunyai sifat yang kurang baik bila dibandingkan dengan baja. Sifat-sifat yang kurang baik ini antara lain:

1. Karena panas jenis dan daya hantar panasnya yang tinggi maka sulit sekali untuk memanaskan atau mencairkan sebagian kecil saja.
2. Paduan aluminium mudah teroksidasi dan membentuk oksidasi aluminium  $Al_2O_3$  yang mempunyai titik cair tinggi. Karena sifat ini maka peleburan antara logam dasar dan logam las menjadi terhalang.
3. Karena mempunyai koefisien muai yang tinggi, maka mudah sekali mengalami deformasi.
4. Karena perbedaan yang tinggi antara kelarutan hidrogen dalam logam cair dan logam padat, maka dalam proses pengelasan yang terlalu cepat dan pendinginan

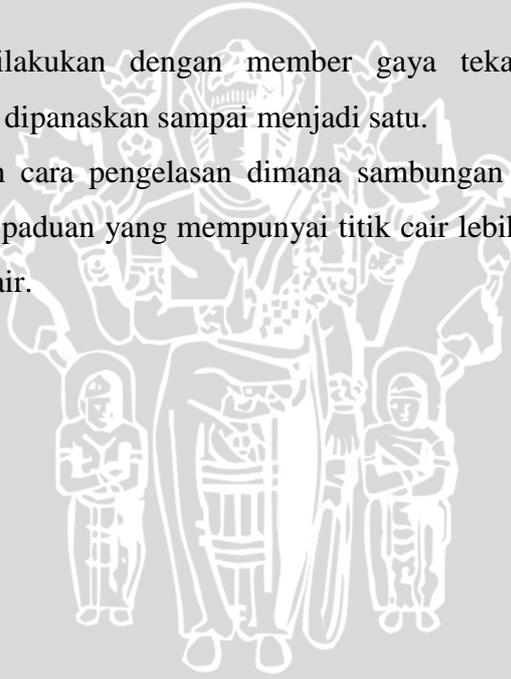
yang cepat pula menyebabkan terperangkapnya gas hydrogen dan membentuk rongga halus di dalam lasan.

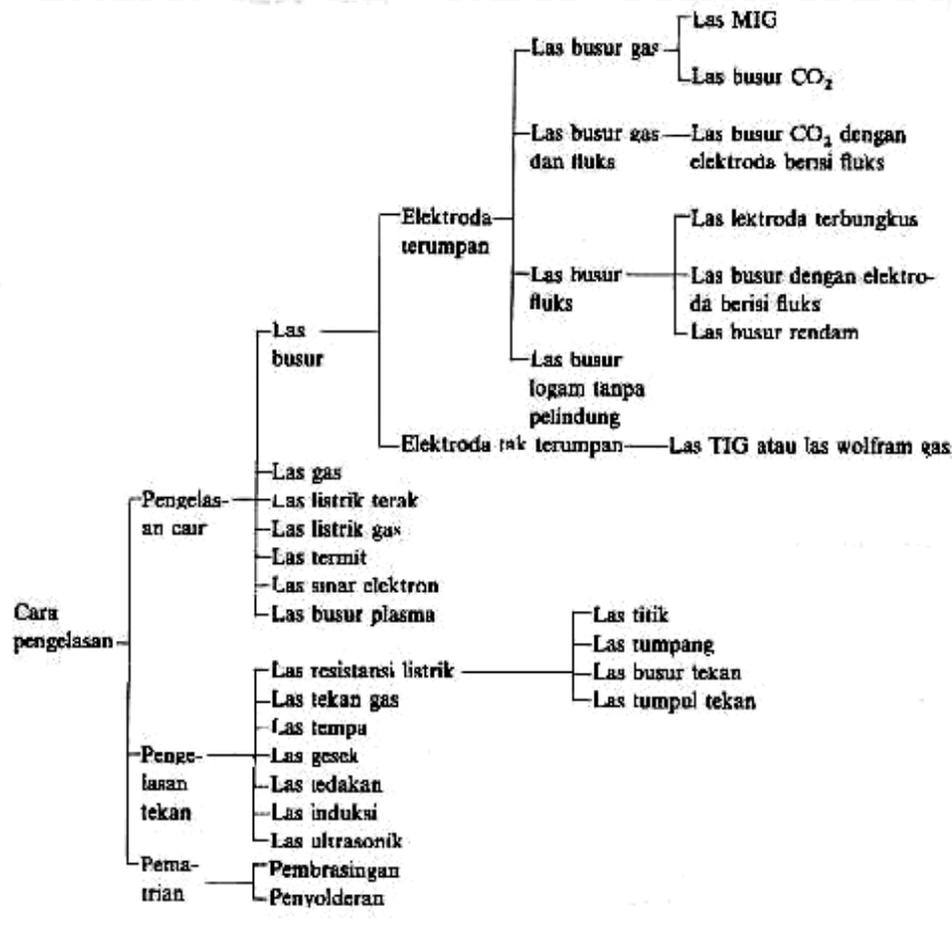
## 2.6 Definisi dan Klasifikasi Pengelasan

Berdasarkan definisi dari *Deutche Industri Normen (DIN)* las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan cair atau lumer. Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari berbagai batang logam dengan menggunakan energi panas.

Secara konvensional klasifikasi cara pengelasan dapat digolongkan menjadi tiga cara antara lain:

1. Pengelasan cair, dilakukan dengan cara melakukan pemanasan pada sambungan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar.
2. Pengelasan tekan, dilakukan dengan member gaya tekan pada bagian sisi sambungan yang telah dipanaskan sampai menjadi satu.
3. Pematrian, merupakan cara pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan yang mempunyai titik cair lebih rendah tetapi logam induk tidak ikut mencair.





Gambar 2.1 Skema Klasifikasi Pengelasan  
Sumber : Wiryosunarto, 2008:8

## 2.7 Las Gesek (*Friction Welding*)

Las gesek merupakan salah satu dari metode pengelasan tekan. Dalam metode ini sumber panas yang dipakai untuk mencairkan benda kerja berasal dari gesekan benda kerja itu sendiri. Mekanisme pengelasan gesek, dimana salah satu logam berputar relatif terhadap logam satunya tidak ikut berputar tetapi memberikan tekanan terhadap logam yang berputar tersebut. Karena adanya gesekan maka timbul panas di kedua permukaan logam yang bersinggungan tersebut. Dari panas ini akan melelehkan kedua permukaan yang bersentuhan tersebut sehingga kedua logam tersebut menjadi satu. Proses terakhir sebelum sambungan menjadi dingin dilakukan penekanan terakhir untuk lebih menyatukan sambungan tersebut.

Berdasarkan metode penggesekan secara garis besar, pengelasan gesek dibagi menjadi dua yaitu:

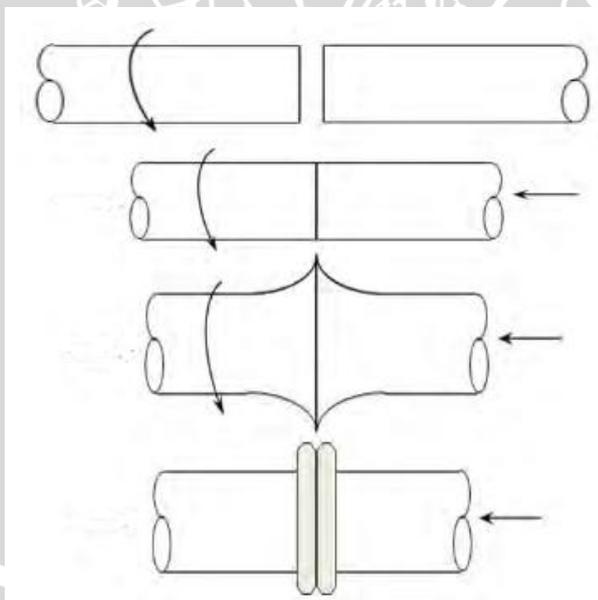
1. Las gesek dengan sumber panas dari gesekan kedua permukaan benda kerja itu sendiri, contohnya *linier friction welding*.

2. Las gesek dengan sumber panas dari gesekan kedua permukaan benda kerja yang akan dilas dengan pahat (*tool*), contohnya *friction stir welding*.

Pengelasan ini dapat dilakukan pada penyambungan dua material yang berbeda jenisnya dan sifat materialnya seperti aluminium dengan baja karbon rendah. Hal ini merupakan salah satu kelebihan dari metode pengelasan ini.

### 2.7.1 *Linear Friction Welding*

Linier *friction welding* adalah metode pengelasan gesek yang memanfaatkan gesekan lengkung antara dua permukaan benda kerja yang akan dilas. Mekanisme pengelasan gesek ini, salah satu logam berputar relatif terhadap logam satunya dengan kecepatan tertentu dimana logam satunya tidak ikut berputar tetapi memberikan gaya tekan terhadap terhadap logam yang berputar tersebut. Karena adanya gesekan maka timbul panas di kedua permukaan logam yang bersinggungan tersebut. Dari panas ini akan melelehkan kedua permukaan yang bersentuhan tersebut sehingga kedua logam tersebut menjadi satu. Proses terakhir sebelum sambungan menjadi dingin dilakukan penekanan terakhir untuk lebih menyatukan sambungan tersebut.



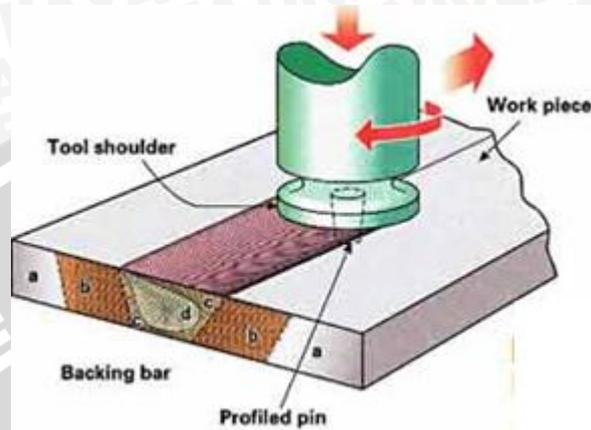
Gambar 2.2 Metode pengelasan *Linear Friction Welding*

Sumber: Murti, 2011

### 2.7.2 *Friction Stir Welding*

*Friction stir welding* adalah metode pengelasan gesek yang memanfaatkan gesekan antara benda kerja dengan plat. Dua plat yang akan disambung menjadi satu

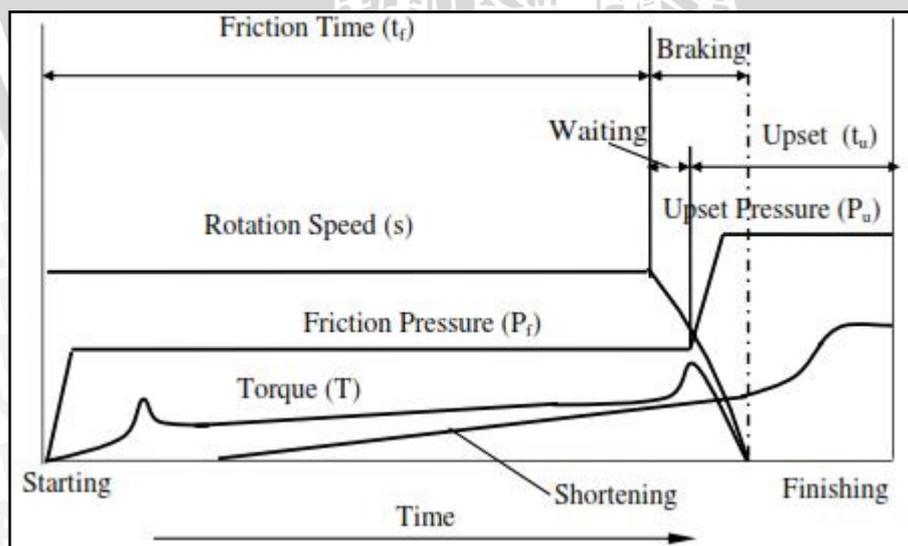
dicekam berhimpitan di bawah pahat yang telah dipasang pada mesin frais atau mesin bor. Pahat yang berputar menekan pada benda kerja sehingga akan timbul panas akibat gesekan benda kerja tersebut dengan pahat yang berputar. Panas tersebut akan melelehkan benda kerja sehingga terjadi penyatuan antara kedua benda kerja, simulasi proses pengelasan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema Proses *Friction Stir Welding*  
Sumber: Johnson dan Kalle, 2013

### 2.7.3 *Friction Time dan Sudut Chamfer*

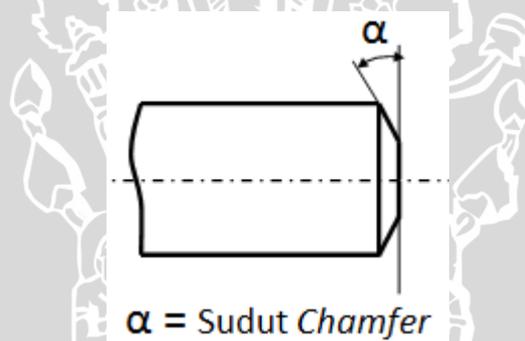
Pada pengelasan gesek (*friction welding*) terjadi fenomena fisik, seperti perubahan panas akibat gesekan, deformasi plastis, solidifikasi, perubahan struktur dan sebagainya. Adapun parameter penting dalam proses pengelasan gesek ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Parameter *Friction Welding*  
Sumber: Sahin, 2007

Dari semua parameter pada Gambar 2.4, ada lima parameter terpenting yaitu *friction time*, *friction pressure*, *upset time*, *upset pressure* dan *rotation speed*. Satu parameter dipilih, yaitu *friction time*. *Friction time* adalah waktu yang ditetapkan sebelumnya untuk menentukan berapa lama *friction* dikerjakan pada benda. Efeknya pada pemendekan aksial dan terbentuknya flash pada sambungan las. Semakin lama *friction time* yang diberikan pada saat proses pengelasan maka flash yang terjadi akan semakin besar dan akan berakibat pada penurunan kekuatan sambungan las, tetapi jika *friction time* yang diberikan pada saat pengelasan kurang, maka tidak akan muncul flash dan spesimen tidak akan tersambung sempurna.

Sudut *chamfer* adalah bentuk geometri benda kerja yang dibuat memotong tepi secara simetris terhadap poros benda kerja dengan sudut tertentu sampai dengan  $90^{\circ}$ . *Chamfer* merupakan tepi miring yang menghubungkan dua permukaan. Jika permukaan yang tegak lurus, *chamfer* biasanya akan menjadi simetris pada  $45^{\circ}$ . Tujuan dari sudut *chamfer* adalah untuk mengurangi luasan kontak atau luasan gesekan pada saat pengelasan gesek berlangsung.



Gambar 2.5 Bentuk Geometri Sudut *Chamfer*

#### 2.7.4 Kelebihan dan Keterbatasan Las Gesek

Beberapa kelebihan dari las gesek ini antara lain:

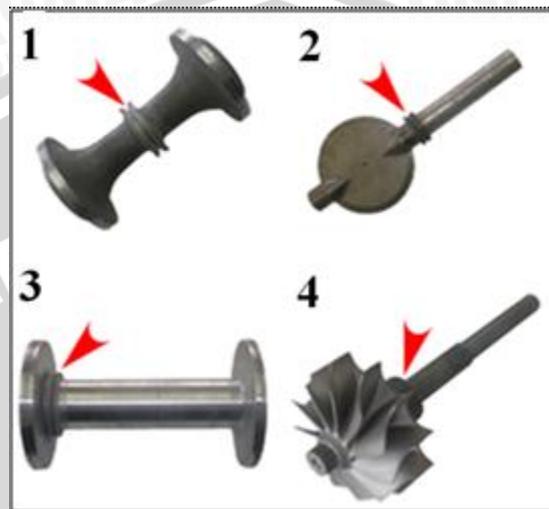
1. Tidak membutuhkan bahan tambahan.
2. Proses pengelasan cepat.
3. Sambungan las kuat.

Beberapa keterbatasan las gesek antara lain:

1. Salah satu benda kerja harus dapat diputar.
2. Terbatas hanya untuk pengelasan yang permukaan kerjanya berbentuk datar atau kerucut.
3. Salah satu benda kerja harus dapat terdeformasi secara plastis.

### 2.7.5 Aplikasi Las Gesek

Telah banyak penyambungan dilakukan dengan menggunakan metode pengelasan gesek. Contoh pengelasan ini digunakan pada penyambungan komponen kendaraan bermotor seperti *Bimetallic Engine Valve*. Selain pada pengelasan *Bimetallic Engine Valve* masih banyak proses penyambungan dilakukan dengan pengelasan gesek seperti Gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.6 Aplikasi las gesek, 1. Aluminum *Hub for Motorcycle* 2. *Butterfly Valve Shaft* 3. Aluminum *Hub for Bicycle* 4. *Turbo Charger Impeller shaft*  
Sumber: Seiki, 2014

### 2.8 Weldability pada Pengelasan

Pengertian *weldability* menurut *Deutsche Industrie Normen (DIN) 8528 (ISF, 2008: 1)* adalah sifat mampu las yang dimiliki oleh suatu material dan dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu:

#### 1. Jenis material

Jenis material ditentukan oleh komposisi kimia, sifat metalurgi dan sifat mekanik dari material. Komposisi kimia dan sifat metalurgi mempengaruhi karakteristik sifat mekanik dari material tersebut. selain itu, unsur paduan lain juga menentukan sifat mekanik dari material tersebut.

#### 2. Faktor keamanan perencanaan

Terdiri dari perencanaan dan tegangan yang terjadi pada benda kerja. Kedua hal tersebut sangat berpengaruh terhadap hasil pengelasan yang diinginkan. Tahap perencanaan meliputi energi yang bekerja pada benda kerja, dimensi material, serta pengaturan sambungan. Tegangan yang terjadi pada benda kerja dipengaruhi oleh tipe tegangan, temperatur dan korosi.

### 3. Proses pengelasan

Proses pengelasan terdiri dari tiga tahapan yaitu persiapan, eksekusi dan perlakuan setelah proses pengelasan. Tahap persiapan meliputi penentuan metode *welding*, tipe sambungan, perlakuan panas sebelum proses dan kondisi lingkungan. Tahap eksekusi meliputi penentuan parameter pengelasan yaitu masukan panas serta kontrol panas. Tahapan *finishing* setelah proses pengelasan adalah penentuan perlakuan panas setelah proses pengelasan dan proses gerinda.

#### 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:

$$dQ = \omega \cdot dM \quad (\text{W}) \quad (2-1)$$

Dengan  $\omega$  adalah kecepatan sudut,  $dM$  merupakan deferensial dari momen torsi.  $dM$  dinyatakan dengan persamaan berikut :

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

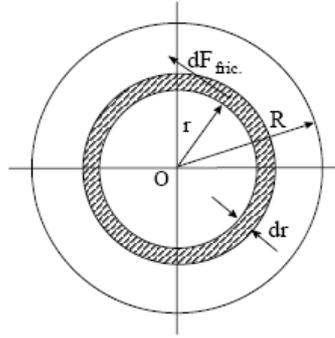
dengan  $dF_{\text{fric}}$  adalah gaya gesekan,  $r$  adalah jari – jari lingkaran. Kemudian dapat didefinisikan bahwa gaya gesek  $dF_{\text{fric}}$  sama dengan gesekan – koefisien gesek dikalikan dengan aksial-kekuatan tekan  $P$  dinyatakan dengan persamaan berikut :

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

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

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

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 2.7 friction surface dan friction ring (dr)

Sumber : Can. dkk, 2010

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr} \quad (2-12)$$

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

$$\dot{Q} = \pi \cdot \omega \cdot P \cdot r \quad (2-13)$$

## 2.10 Pengujian Sambungan Las

### 2.10.1 Pengujian Tidak Merusak (*Non Destructive Test*)

Adalah pengujian yang dilakukan tanpa merusak material yang sedang diuji. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui cacat las yang terjadi dalam proses pengelasan. Yang termasuk pengujian ini adalah: uji ultrasonik, uji radiografi, uji cairan penetran dan lain-lain.

### 2.10.2 Pengujian Merusak (*Destructive Test*)

Adalah pengujian terhadap material lasan sampai terjadi kerusakan pada material tersebut. Yang termasuk pengujian merusak adalah uji mekanik yang berupa uji tarik, uji dampak, uji kekerasan dan uji bending serta uji metalografi.

#### 2.10.2.1 Pengujian Kekerasan

Kekerasan adalah kemampuan suatu bahan untuk menahan penetrasi, goresan benda yang lebih keras. Kekerasan merupakan sifat mekanik yang sangat penting karena dari kekerasan dapat diperkirakan kekuatan dari material tersebut. Kekerasan suatu material harus diketahui khususnya untuk material yang dalam penggunaannya akan mengalami pergesekan.

Secara garis besar pengukuran kekerasan dibagi menjadi 3 jenis, salah satunya yaitu :

##### ➤ *Resistance to Indentation*

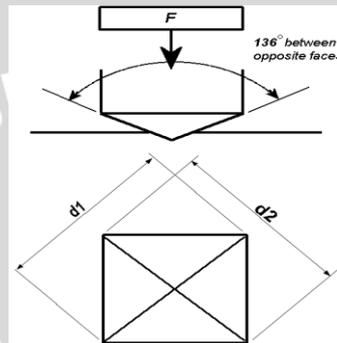
##### a. *Vickers Method*

Pengujian kekerasan *vickers* menggunakan piramida berlian sebagai indenter untuk mendapatkan nilai kekerasan suatu bahan. Metode ini efektif untuk menguji kekerasan dengan hasil indentasi berukuran mikro atau dalam skala mikro. Kualitas dasar yang diukur selama uji kekerasan adalah kemampuan bahan tersebut untuk menahan deformasi plastis lokal yang diakibatkan beban lokal hasil indentasi. Prinsipnya sama dengan pengujian *brinell*, hanya saja menggunakan indenter yang berbentuk piramida berlian dengan sudut puncak antara dua sisi berhadapan  $136^\circ$ , tapak tekan berbentuk bujur sangkar. Beban yang diberikan antara

lain 0.098, 0.246, 0.49, 0.98, 1.96, 2.94, 4.90, 9.80) N. Angka kekerasan dinyatakan oleh :

$$VHN = \frac{1,8544 \cdot P}{d^2} \quad (2-14)$$

dengan: VHN = angka kekerasan ( $\text{kgf}/\mu\text{m}^2$ )  
 $P$  = beban yang ditetapkan (kgf)  
 $d$  = panjang diagonal tapak tekan ( $\mu\text{m}^2$ )



Gambar 2.8 *Vickers Method*  
 Sumber: Saputera, 2012

Cara ini merupakan cara pengujian kekerasan yang paling sensitif. Cara ini memiliki satu skala kontinyu untuk semua material dan angka kekerasan *vickers* tergantung dari beban yang diberikan. Sangat memungkinkan sekali penggunaan beban yang ringan pada pengujian cara *vickers* oleh karena itu cara ini bisa digunakan untuk pengujian kekerasan pada material yang tipis sampai 0,005 in.

Tabel 2.2 Karakteristik berbagai pengujian kekerasan

Cara pengujian	Brinell ( $H_R$ )	Rockwell ( $H_{RA}$ , $H_{RC}$ etc.)	Rockwell super facial ( $H_{R30T}$ , $H_{R30N}$ dst)	Vickers ( $H_V$ )	Kekerasan mikro ( $H_v$ )	Shore ( $H_s$ )
Penekan	Bola baja 10 mm $\varnothing$ karbida	Kerucut intan $120^\circ$ ; bola baja $1/16''$ - $1/2''$	Kerucut intan $120^\circ$ ; bola baja $1/16''$ - $1/2''$	Piramida intan sudut bidang berhadapan $136^\circ$	Jenis Vickers jenis knoop sudut $130^\circ, 172^\circ$	Palu intan 3 g
Beban	500 – 3,000 kg	Beban mula 10kg beban total 60,100,150kg	Beban mula 3kg, beban total 15,30 dan 45kg	1-120 kg	1-1000 g	
Kekerasan	$\frac{\text{Beban}}{\text{Luas penekan}}$	Dalamnya penekanan	Dalamnya penekanan	$\frac{\text{Beban}}{\text{Luas penekan}}$	$\frac{\text{Beban}}{\text{Luas penekan}}$	Tinggi pantulan $6,5''$ dari $10''$ tinggi pantulan asal adalah 100

Sumber: Surdia, 1999. hal:32

Kekerasan suatu material logam dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya:

1. Kadar Karbon

Semakin tinggi kadar karbon, maka logam akan semakin keras namun rapuh. Kadar karbon sebesar 0,6 – 1% merupakan kadar karbon yang sangat berpengaruh pada kekerasan logam. Setelah lebih dari 1% maka kadar karbon tidak berpengaruh pada nilai kekerasannya.

2. Unsur paduan

Unsur paduan akan mempengaruhi sifat mekanik baja. Beberapa unsur paduan yang terdapat pada baja beserta pengaruhnya pada sifat mekanik antara lain:

a. Nikel (Ni)

Fungsi : meningkatkan kekerasan, ketahanan erosi, keuletan dan tahan gesek.

b. *Chromium* (Cr)

Fungsi : meningkatkan kekerasan, menambah karbida dan menambah elastisitasnya.

c. Mangan (Mn)

Fungsi : meningkatkan kekerasan, ketahanan terhadap suhu tinggi dan membuat mengkilap.

d. *Silicon* (Si)

Fungsi : meningkatkan ketahanan korosinya, baik adanya penambahan unsur lainnya atau tidak.

e. Molibdenum (Mb)

Fungsi : dalam jumlah 0,1–0,6 % bisa meningkatkan kekuatan yang dimiliki baja.

f. Vanadium (V)

Fungsi : menaikkan kekerasan dan kekuatan baja, menurunkan kandungan karbon *eutectoid*, jika bercampur Cr akan membuat baja jadi tahan aus.

g. *Cobalt* (Co)

Fungsi : meningkatkan kekerasan dan daya tahan aus

h. Boron (B)

Fungsi : menaikkan kekerasan. Pada kadar karbon kurang dari 0,6 % akan menyebabkan rapuh.

i. Titanium (Ti)

Fungsi : sebagai deoksidasi dan efektif menambah pertumbuhan butiran serta meningkatkan kekerasan baja.

### 3. Perlakuan Panas

Pengaruh perlakuan panas akan mempengaruhi kekerasan logam tergantung pada perlakuan yang diberikan. *Hardening* akan meningkatkan kekerasan (paling keras), pada tingkat kekerasan kedua yaitu *tempering*. *Normalizing* akan meningkatkan kekerasan namun dibawah tingkat *tempering* dan yang paling lunak adalah dengan proses *annealing*.

### 4. Bentuk Butir dan Dimensinya

Material dengan ukuran butir kecil akan memiliki kekerasan yang tinggi dibandingkan dengan butiran yang besar. Hal ini dikarenakan ukuran butir yang lebih kecil memiliki gaya ikat antar atom yang lebih besar sehingga membuat material tersebut keras.

### 5. Homogenitas.

Homogenitas suatu material akan mempengaruhi kekerasan karena semakin homogen suatu material atau semakin sama arah orientasi kristalnya maka material tersebut akan bersifat ulet dan untuk material yang strukturnya heterogen maka material tersebut bersifat keras dan getas.

#### 2.10.2.2 Pengujian Mikrostruktur

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan pengaruh kekasaran permukaan dan sudut *chamfer* terhadap perubahan kondisi struktur mikro pada tiap daerah-daerah *Fully Plasticized Zone* (Zpl), *Partly Deformed Zone* (Zpd) dan *Undeformed Zone* (Zud).

Untuk menghitung diameter butirannya digunakan metode planimetri. Pada metode planimetri dibuat lingkaran dengan luasan 5000 mm<sup>2</sup>. Kemudian dihitung jumlah butir utuh yang ada dalam lingkaran dan juga butir yang bersinggungan dengan lingkaran. Secara matematis adalah seperti dibawah ini :

$$N_A = f(N_{inside} + \frac{1}{2}N_{intercepted}) \quad (2-15)$$

dengan:

$N_A$  : Jumlah butir dalam area (butir/mm<sup>2</sup>)

$N_{inside}$  : jumlah butir bagian dalam lingkaran

$N_{intercept}$  : jumlah butir yang bersinggungan dengan lingkaran

F : faktor pengali Jeffries

Kemudian untuk menentukan ukuran diameter butir digunakan persamaan ASTM E-112 (Lampiran 4).

$$G = \{3.322 (\log NA) - 2.954\}$$

dengan :

G : ASTM *grain size number*

### 2.11 Hipotesa

Penggunaan variasi sudut *chamfer* satu sisi dan *friction time* pada pengelasan gesek akan mempengaruhi kekerasan pada hasil sambungan las gesek Al-Mg-Si. Dengan adanya variasi sudut *chamfer* satu sisi dan *friction time* akan mempengaruhi masukan panas (*Heat Input*) yang akan mempengaruhi pembentukan butir. Semakin besar sudut *chamfer* yang digunakan dan semakin lama *friction time* maka *heat input* nya semakin besar sehingga struktur mikronya menjadi unhomogen sehingga mempengaruhi kekerasan dari sambungan las.

