

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 1.1 Penelitian Sebelumnya

Ardianto, dkk (2015) dalam penelitian yang berjudul “*Kekuatan puntir sambungan las gesek Al-Mg-Si dengan variasi sudut chamfer dua sisi dan kekasaran*” Kekuatan puntir dipengaruhi oleh besar kecilnya daerah *fully plasticized Zone* (Zpl), *Partly deformed Zone* (Zpd) atau HAZ, *Undeformed Zone* (Zud), *Porosity Zone* (Zpr) dengan sudut *chamfer*  $0^{\circ}$  dan  $15^{\circ}$ . Didapatkan bahwa semakin besar luasan *fully plasticized Zone* (Zpl) maka kekuatan puntir akan semakin tinggi dengan sudut *chamfer*  $15^{\circ}$ .

Seli dkk (2010) “*Mechanical evaluation and thermal modelling of friction welding of mild steel and aluminium*”. Pada penelitian ini ikatan antara aluminium dan baja dapat terbentuk. Material di daerah las memiliki tingkat kekerasan yang lebih rendah dari pada logam induknya dikarenakan *thermal effect* dari las gesek. Selain itu *tensile strength* juga lebih rendah dari logam induknya.

Santoso, dkk (2012) Dari hasil penelitian yang berjudul “*Pengaruh Sudut Chamfer Dan Gaya Tekan Akhir Terhadap Kekuatan Tarik Dan Porositas Sambungan Las Gesek Pada Paduan Al-Mg-Si*” didapatkan bahwa kekuatan tarik pada pengelasan gesek aluminium paduan Al-Mg-Si akan meningkat seiring semakin besarnya gaya tekan akhir dan semakin kecilnya sudut *chamfer*. Dan porositas menurun dengan semakin bertambahnya sudut *chamfer* dan gaya tekan akhir.

Irawan, dkk (2016) dalam penelitiannya yang berjudul “*Kekuatan Puntir Pada Sambungan Las Continuous Drive Friction Welding Aluminium Al6061 Berbentuk Silinder Dengan Sudut Chamfer Satu Sisi Pada Area Gesekan*” menyimpulkan bahwa kekuatan puntir tertinggi disebabkan karena memiliki luas Zpl yang besar, memiliki ukuran butir yang kecil, porositas yang kecil pada sambungan las CDFW dan adanya penambahan kandungan  $Mg_2Si$  pada area Zpl dan Zp. Dalam penelitian tersebut menjelaskan bahwa spesimen yang memiliki kekuatan puntir yang tinggi terdapat pada perbandingan diameter  $D_1/D_2$  0.25.

## 1.2 Aluminium

Alumunium awalnya ditemukan oleh Sir Humphrey Davi pada tahun 1809 sebagai suatu unsur dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H.C. Oersted pada tahun 1825. Paul Heroult dan C.M Hall di Amerika Serikat secara terpisah merka telah memperoleh logam aluminium dan alumina dengan cara elektrolisa dari garmnya yang terfusi. Proses pembuatan dengan alumunium dengan metode Heroult Hall masih dipakai untuk memproduksi alumunium sampai sekarang.

Alumunium adalah logam yang berlimpah keberadaannya, konduktor yang baik untuk panas, ketahanan korosi yang baik, ringan, kuat serta konduktor listrik yang baik. Untuk menaikkan sifat mekaniknya, sering kali aluminium biasanya dipadu dengan memberi unsur tambahan, seperti Si, Fe, Cu, Mn, Mg, dan Zn. Penambahan unsur Si dan Mg berguna untuk menambah daya tahan terhadap korosi, Fe untuk mencegah terjadinya penyusutan, Cu untuk menambah kekuatan, dan Mn untuk memperbaiki mampu tempa. Penggunaan dari aluminium dan paduannya antara lain untuk pesawat terbang, kapal laut, industri otomotif, dll. (Surdia, 1999)

Dibawah ini adalah tabel dari sifat fisik aluminium dan sifat mekanik aluminium :

Tabel 2.1  
Sifat fisik Aluminium murni

Property	Al	Unit
Atomic number	13	-
Relative atomic mass (C = 12.000)	26.982	-
Crystal structure	fcc	-
Melting point	660	°C
Boiling point	2520	°C
Relative density (d)	2.7	-
Elastic modulus (E)	70	GPa
Specific modulus (E/d)	26	-
Mean specific heat 0–100 °C	917	J. kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Thermal conductivity 20–100 °C	238	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Coefficient of thermal expansion 0–100 °C	23.5	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Electrical resistivity at 20 °C	2.67	μ ohm cm <sup>-1</sup>

Sumber : Polmear (2015)

Tabel 2.2  
Sifat mekanik Aluminium murni

<b>Aluminium</b>		
<i>Tensile strength</i> (MPa)	<i>Tensile strength yield (0.2% offset)</i> (MPa)	<i>Elongation in 50 mm (%)</i>
45-70	10-30	43-50

Sumber : Hatch (1984)

### 1.2.1 Aluminium Paduan

Paduan aluminium dibagi menjadi dua kategori: paduan tempa (dibentuk dengan pengerjaan tempa), dan cor paduan (dituangkan dalam keadaan cair ke dalam cetakan yang sesuai dengan bentuk yang diinginkan). Sementara kekuatan dan sifat-sifat lainnya, baik tempa dan cor produk tergantung pada bahan-bahan mereka, atau penambahan unsur pada paduan, variasi lebih lanjut tentang sifat ini dapat dicapai dengan *tempering*. *Tempering* menunjukkan perubahan sifat mekanik dari logam dengan cara mekanik atau perlakuan panas. *Tempering* dapat diproduksi dalam produk tempa yang dihasilkan dari pengerjaan dingin (*cold working*).

Paduan tempa yang dapat dikeraskan dengan perlakuan panas dapat diidentifikasi sebagai *heat-treatable*. Sebaliknya, paduan tempa yang tidak dapat diberi perlakuan panas dapat diidentifikasikan *non-heat-treatable*, paduan tempa ini dapat dikeraskan hanya dengan pengerjaan dingin (*cold working*).

Aluminium Association merupakan Sistem penunjukan untuk aluminium paduan diperkenalkan pada tahun 1954. Pada sistem ini, sejumlah empat digit menunjukan setiap paduan yang terdaftar dalam asosiasi. Nomor pertama dari paduan menunjukan unsur paduan utama, yang menghasilkan sekelompok paduan dengan sifat yang mirip. Nomor kedua menunjukkan modifikasi dari paduan. Nomor ketiga dan keempat menunjukan penomoran paduan yang disusun secara berurutan oleh asosiasi.

Berikut karakteristik paduan tempa aluminium berdasarkan serinya :

1. Aluminium Murni (kandungan aluminium 99%), seri 1xxx
  - a. Memiliki kemurnian antara 99%-99.9%
  - b. Tahan korosi
  - c. Konduksi panas dan konduksi listrik baik
  - d. Kekuatan tarik rendah
2. Copper (Al-Cu), seri 2xxx
  - a. Tidak tahan korosi

- b. Kekuatan yang sangat tinggi
  - c. Banyak digunakan pada industri penerbangan
  - d. Sifat mampu lasnya kurang baik
  - e. Dibutuhkan pelapisan permukaan agar sifat tahan korosi meningkat
3. Manganase (Al-Mn), seri 3xxx
    - a. Tahan korosi
    - b. Memiliki kekuatan yang tinggi
    - c. Sifat potong dan sifat mampu las yang baik
  4. Silicon (Al-Si), seri 4xxx
    - a. Menurunkan titik leleh pada pengelasan
    - b. Mengeraskan spesimen aluminium
  5. Magnesium (Al-Mg), seri 5xxx
    - a. Tahan terhadap korosi
    - b. Memiliki sifat mampu las yang baik
    - c. Banyak digunakan pada industri perkapalan
  6. Magnesium dan silikon (Al-Mg-Si), seri 6xxx
    - a. Tahan terhadap korosi
    - b. Memiliki kekuatan yang tinggi
    - c. *Yield strength* mendekati baja karbon rendah
    - d. Memiliki sifat mampu las yang baik
    - e. Mudah di ekstruksi
  7. Zinc (Al-Zn), seri 7xxx
    - a. Tidak terlalu baik terhadap korosi
    - b. Memiliki kekuatan yang sangat tinggi

Tabel 2.3  
Sistem Penujukan dan Karakteristik Aluminium Paduan Tempa

Series Number	Primary Alloying Element	Relative Corrosion Resistance	Relative Strength	Heat Treatment
1xxx	-	excellent	fair	non-heat-treatable
2xxx	copper	fair	excellent	heat-treatable
3xxx	manganese	good	fair	non-heat-treatable
4xxx	silicon	-	-	varies by alloy
5xxx	magnesium	good	good	non-heat-

Series Number	Primary Alloying Element	Relative Corrosion Resistance	Relative Strength	Heat Treatment
6xxx	magnesium and silicon	good	good	treatable heat-treatable
7xxx	zinc	fair	excellent	heat-treatable

Sumber : Kissel (2002)

### 1.2.2 Aluminium paduan A6061

Paduan Al-Mg-Si adalah paduan yang mampu diberi perlakuan panas dan mempunyai sifat tahan korosi, memiliki kekuatan yang tinggi, mampu potong dan mampu las. Jika aluminium dipadukan dengan magnesium dan silikon maka akan terbentuk aluminium silikat ( $Mg_2Si$ ). Aluminium sendiri banyak yang sudah mengandung Si maka penambahan Mg diperlukan untuk menghasilkan efek pengerasan dari  $Mg_2Si$ . Tetapi paduan ini akan menjadi getas maka untuk mengurangi hal ini dibutuhkan penambahan sekitar 0,03 - 0,1 %.

Beberapa produk yang menggunakan paduan aluminium A6061 antara lain ring piston, silinder linier, pipa, tabung, bantalan dan komponen pompa.

Tabel 2.4  
Komposisi kimia berdasarkan berat A6061

Paduan	Unsur	Kadar Prosentase (%)
A6061	Fe	0.7
	Si	0.4-0.8
	Cu	0.15-0.40
	Mn	0.15
	Cr	0.04-0.35
	Mg	0.8-1.2
	Zn	0,25
	V	0.000
	Ti	0.150
	Al	95,8-98,6
	<i>Other, each</i>	0.05
<i>Other, total</i>	0.15	

Sumber : ASTM, *American Standard Testing and Material* (2004)

Tabel 2.5  
Sifat Mekanik Aluminium Paduan 6061

Alloy	Temper	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation in 2 In (50%) (%)	Hardness (HB)	Shearing strength (Mpa)	Modulus of elasticity (GPa)
6061	O	125	55	25	30	85	69
	T4	240	145	22	65	165	69
	T6	310	275	12	95	205	69

Sumber : Kaufman (2008)

### 1.3 Baja

Baja merupakan suatu paduan dari besi (Fe) dan karbon (C), dimana unsur karbon (C) menjadi dasar. Selain mengandung unsur Fe Dan C, baja juga mengandung unsur paduan lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), dan mangan (Mn) yang jumlahnya dibatasi. Baja karbon adalah baja yang mengandung karbon antara 0,1% - 1,7%. Unsur paduan utama baja adalah karbon, dengan ini baja dapat digolongkan menjadi tiga yaitu baja karbon rendah, baja karbon sedang, dan baja karbon tinggi. (Smallman, 1985)

Klasifikasi baja menurut kandungan karbon dibagi menjadi tiga macam, yaitu:

a. Baja karbon rendah

Yaitu baja yang mengandung karbon kurang dari 0,30%. Baja karbon rendah dalam perdagangan dibuat dalam bentuk pelat, profil, batangan untuk keperluan tempa, pekerjaan mesin, dan lain-lain.

b. Baja karbon sedang

Baja ini mengandung karbon antara 0,30% – 0,60 %. Didalam perdagangan biasanya dipakai sebagai alat-alat perkakas, baut, poros engkol, roda gigi, ragum, pegas dan lain-lain.

c. Baja karbon tinggi

Baja karbon tinggi ialah baja yang mengandung karbon antara 0,7% – 1,7%. Baja ini biasanya digunakan untuk keperluan alat-alat konstruksi yang berhubungan dengan panas yang tinggi atau dalam 10 penggunaannya akan menerima atau mengalami panas, misalnya landasan, palu, gergaji, pahat, kikir, bor, bantalan peluru, dan sebagainya.

#### 1.3.1 Baja St 41

Baja ST 41 adalah baja dengan kandungan C = 0.2%, S = 0.05%, Si = 0.2%, Mn = 0.6%, P = 0.05%, arti dari baja jenis St 41 adalah baja karbon rendah yang mempunyai

kekuatan tarik maksimum sebesar  $41 \text{ N/mm}^2$ . Baja St 41 ini memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan besi cor.

Aplikasi baja St 41 antara lain :

1. Digunakan untuk kawat, paku, *wire mesh*, peralatan otomotif dan sebagai bahan baku *welded fabrication* (kisi-kisi jendela atau pintu dan jeruji).
2. Aplikasi khusus seperti untuk kawat elektroda berlapis untuk keperluan pengelasan.

Ada beberapa masalah utama dalam pemakaian baja yaitu sifat korosif dan tahan terhadap panas. Dengan menggunakan komposisi kimia dan heat treatment yang tepat dapat mengantiipasi kelemahan dari baja tersebut sesuai dengan kebutuhan.

#### 1.4 Pengelasan

Pengelasan sebagai metode penyambungan telah banyak digunakan untuk konstruksi bangunan baja dan konstruksi mesin, hal ini disebabkan karena metode penyambungan dengan las menghasilkan sambungan yang kuat, ringan dan biaya murah.

Metode pengelasan disamping digunakan untuk penyambungan juga digunakan untuk reparasi atau perbaikan, misalnya membuat lapisan keras pada perkakas, mempertebal bagian-bagian konstruksi yang aus. Metode pengelasan kelihatannya sederhana, tetapi didalamnya banyak masalah yang harus diatasi dengan pemecahan yang memerlukan pengetahuan. Perancangan sambungan konstruksi bangunan dan konstruksi mesin dengan las harus direncanakan; cara pengelasan, bahan las dan jenis las yang digunakan, serta cara pemeriksaannya, berdasarkan fungsi dari bagian-bagian bangunan atau mesin yang dirancang.

Klasifikasi Pengelasan Berdasarkan Cara Kerja :

1. Pengelasan cair

Cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar. Contohnya las busur, las gas, las listrik gas, las termit, dan lain-lain. (Wiriyosumarto, 2000)

2. Pengelasan tekan

Cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga menjadi satu. Contohnya las resisten tempa, las gesek, las termit, dan lain-lain. (Wiriyosumarto, 2000)

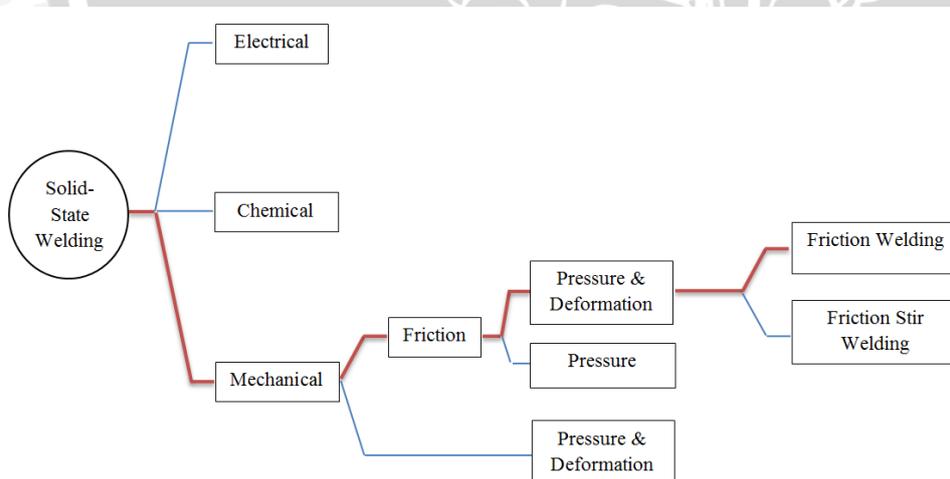
### 3. Pematrian

Cara pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah. Dalam hal ini logam induk tidak mencair. Contohnya soldering. (Wiriyosumarto, 2000)

#### 1.5 Friction Welding

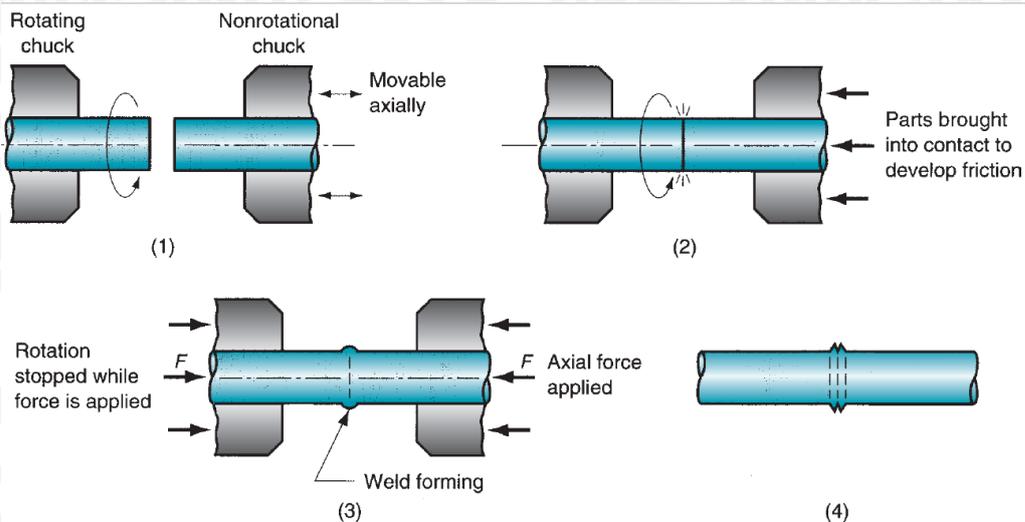
*Friction welding* adalah salah satu metode dalam pengelasan tekan. Prinsip dasar dari pengelasan sendiri adalah dengan cara memanaskan logam yang akan di las supaya logam dapat meleleh dan bisa saling menempel. Dalam metode *friction welding*, bekerja dengan menggabungkan dua buah material dalam fasa padat yang dipengaruhi oleh kecepatan putar dari *spindle* dan tekanan secara aksial yang menghasilkan panas dari gesekan antara kedua material tersebut (AWS, 2010).

Metode *friction welding* dapat diterapkan pada dua material logam tidak sejenis, seperti misalnya Aluminium dengan *Copper*, dan metode ini merupakan cara paling baik dalam penyambungan dua material berbeda jenis (Sahin, 2010). Hal inilah yang menjadi keunggulan utama dari *friction welding*. Selain itu, metode *friction welding* dengan menggunakan dua material yang berbeda dapat meningkatkan sifat mekanik dari salah satu material dan menurunkan berat jenis, ketahanan korosi yang baik pada kedua material yang sudah tersambung (Taban, 2010).



Gambar 2.1 Skema Klasifikasi Pengelasan Fase Padat

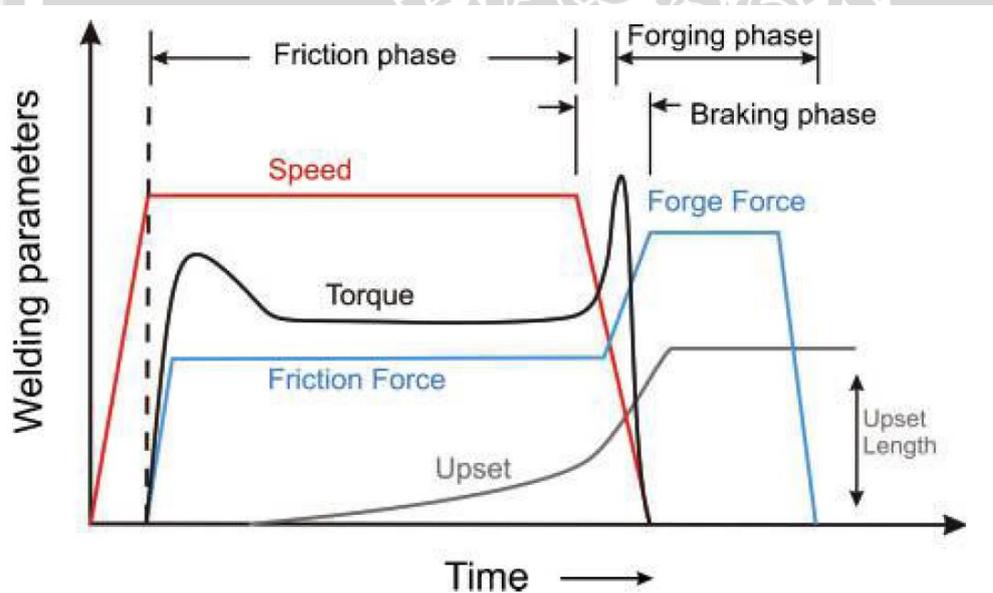
Sumber : American Welding Society A3.0 (2010)



Gambar 2.2 Skema *friction welding* : (1) benda berputar, tidak bersentuhan; (2) benda saling bersentuhan untuk menghasilkan gesekan (3) putaran berhenti dan tekanan aksial diberikan; dan (4) terbentuk lasan.

Sumber : Groover (2010)

Dalam metode *friction welding*, terdapat parameter pengelasan yang harus diperhatikan. Berbagai macam parameter tersebut tertera dalam gambar di bawah ini.



Gambar 2.3 Parameter Pada *Friction Welding*.

Sumber : Maalekian (2007).

Penjelasan dari berbagai parameter di atas, yaitu :

- *Friction Phase / Friction Time*

*Friction time* ialah waktu yang dibutuhkan kedua permukaan spesimen bergesekan yang kemudian spesimen dapat menyatu. (Maalekian, 2007).

- *Burn-Off Length / Upset*

Burn-off length yaitu panjang spesimen yang berkurang (pemendekan spesimen) akibat gesekan antara dua spesimen, dimana salah satu spesimen diberi gaya tekan secara aksial pada saat proses pengelasan berlangsung sehingga akan menimbulkan panas pada dua spesimen tersebut dan terjadinya deformasi. (Maalekian, 2007).

- *Friction Pressure / Friction Force*

*Friction pressure* adalah tekanan yang diberikan pada logam yang tidak berputar sehingga dapat menekan logam yang berputar dan mengakibatkan gesekan. Tekanan tersebut menghasilkan panas yang semakin besar sehingga dapat melunakkan bagian yang bergesekan dan dua logam tersebut dapat menyatu.

- *Upset Time*

*Upset time* adalah waktu yang diberikan kepada dua spesimen yang telah menyatu pada proses pengelasan gesek untuk proses penahanan (*holding*) agar ikatannya menjadi semakin kuat.

- *Upset Pressure / Forge Force*

*Upset pressure* adalah tekanan lanjutan yang dilakukan setelah dua buah logam menyatu akibat proses pengelasan gesek untuk memperkuat ikatan yang terbentuk.

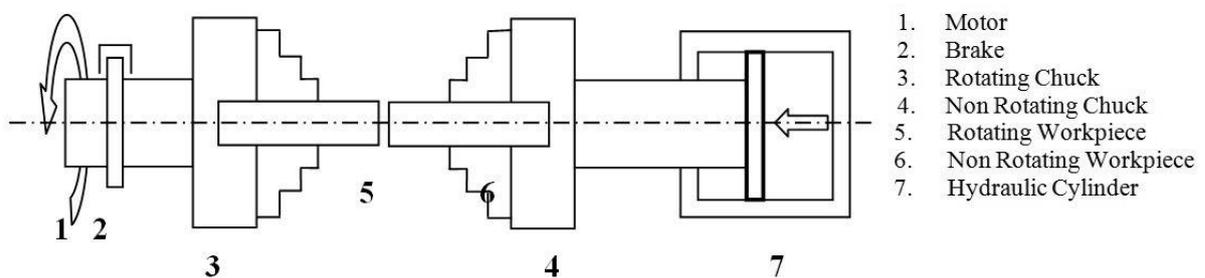
### 1.5.1 Kelebihan Friction Welding

*Friction Welding* mulai marak digunakan dalam dunia industri. Hal ini dikarenakan *Friction Welding* memiliki kemampuan yang tidak dapat digunakan pada metode pengelasan konvensional. Kelebihan dari *Friction Welding*, (Moarrefzadeh, 2012) yaitu :

1. *Friction welding* membutuhkan biaya yang lebih murah.
2. Bisa diaplikasikan pada dua logam yang berbeda.
3. Daerah HAZ yang terbentuk dari pengelasan gesek sangat kecil.
4. Pengelasan gesek hanya membutuhkan energi yang kecil.
5. Pengelasan pada temperatur rendah dapat mempertahankan mikrostruktur dan sifat material.
6. Pemantauan pengelasan dapat dikontrol dengan mudah.
7. Siklus pengelasan dapat di pantau secara otomatis oleh mesin.
8. Merupakan pengelasan fase padat, tidak terjadi inklusi dan gas *porosity*.

### 1.5.2 Continuous Drive Friction Welding

*Continuous Drive Friction Welding* adalah proses penggabungan dua dengan mekanisme salah satu benda diputar dengan kecepatan tinggi dan salah satu benda yang lain memberi gaya penekanan secara aksial. Akibat dari penekanan tersebut timbul panas sehingga partikel dari dua logam dapat saling berikatan dan perputaran yang terjadi mengakibatkan partikel dari dua benda tersebut tercampur. Sedangkan penekanan menyebabkan partikel terdorong mengisi celah-celah kosong sekaligus mengeluarkan udara dan proses ini menghasilkan proses penyambungan logam tanpa pencairan atau yang dinamakan *solid state process*.



Gambar 2.4 Continuous Drive Friction Welding

Sumber : Sahin (2010)

Pada pengelasan las gesek ini terdapat parameter-parameter yang harus diperhatikan ketika proses penyambungan, terutama parameter waktu dan gaya yang diberikan ketika proses pengelasan.

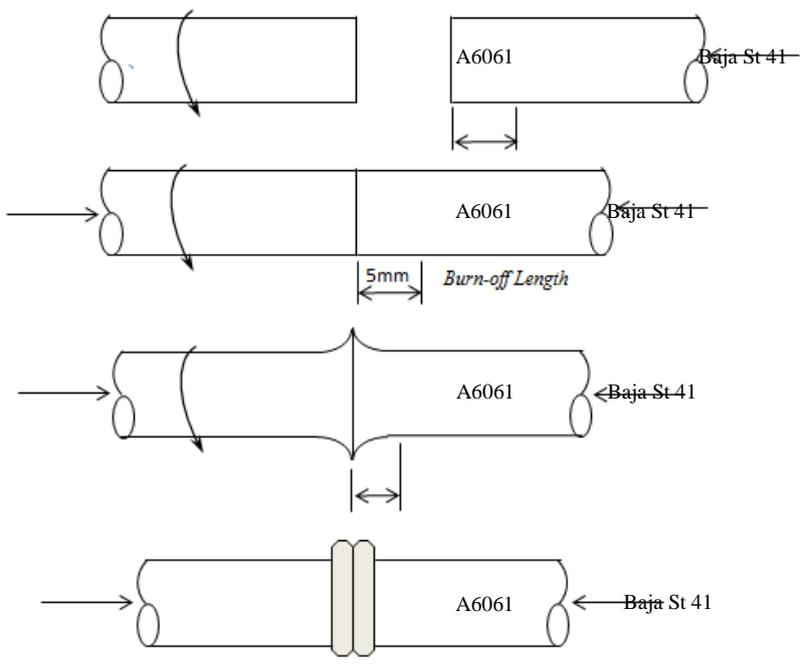
### 1.5.3 Dissimilar Continuous Drive Friction Welding

Metode *Continuous Drive Friction Welding* adalah suatu metode yang hampir sama dengan metode *Dissimilar Continuous Drive Friction Welding* bedanya metode *Dissimilar Continuous Drive Friction Welding* material yang di las berbeda. Logam *non ferrous* aluminium dan paduan banyak digunakan karena sifatnya yang baik dan tidak mahal. Namun aluminium paduan baik memiliki sifat seperti *stainless steel* yang kuat dan memiliki mampu las yang baik.

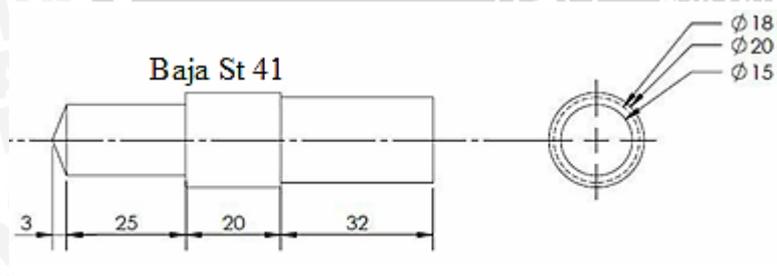
### 1.6 Burn-off Length dan Geometri Kerucut Satu Sisi

*Burn-off length* merupakan salah satu parameter pada *friction welding*. *Burn-off Length* yaitu panjang spesimen yang berkurang (pemendekan spesimen) akibat gesekan antara dua spesimen, dimana salah satu spesimen diberi gaya tekan secara aksial pada saat proses pengelasan berlangsung sehingga akan menimbulkan panas pada dua spesimen

tersebut dan terjadinya deformasi (Maalekian, 2007). Dan juga geometri kerucut satu sisi merupakan sebuah variasi dalam proses *friction welding*. Tujuan adanya penambahan variasi tinggi kerucut satu sisi, untuk mendapatkan luas bidang kontak semakin kecil yang berpengaruh terhadap panas masukan pada saat proses pengelasan berlangsung (Sahin, 2010).



Gambar 2.5 Burn-off Length dengan Panjang 5 mm



Gambar 2.6 Geometri Kerucut Satu Sisi dengan Tinggi 3 mm

Pada gambar 2.5 dan gambar 2.6 merupakan variasi dari *burn-off length* dan geometri tinggi kerucut satu sisi yang berpengaruh terhadap hasil dari sambungan pengelasan, disebabkan kedua variasi tersebut mempengaruhi dari *heat input* yang dihasilkan pada proses pengelasan.

### 1.7 Pengujian Sambungan Las

Macam-macam metode pengujian dan inspeksi pada sambungan las terbagi menjadi dua (Groover, 2010), yaitu :

### 1. Pengujian *Destructive*

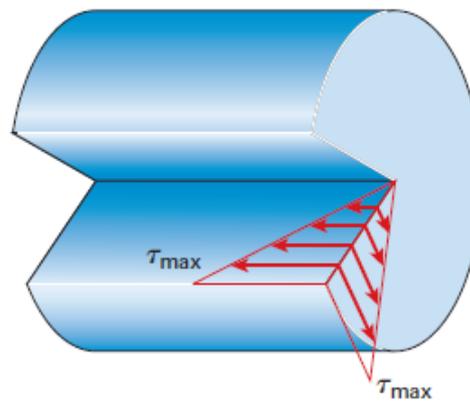
Pengujian merusak (*Destructive Test*) biasanya digunakan untuk mengukur sifat mekanik suatu material, seperti: kekuatan, kekerasan, *fatigue* dan sebagainya.

### 2. Pengujian *Non Destructive*

*Non destrructive test* (NDT) adalah aktivitas tes atau inspeksi terhadap suatu benda untuk mengetahui adanya cacat, retak, atau *discontinuity* lain tanpa merusak benda yang kita tes atau inspeksi. Pada dasarnya, tes ini dilakukan untuk menjamin bahwa material yang kita gunakan masih aman dan belum melewati *damage tolerance*.

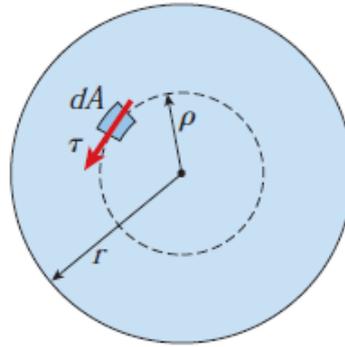
#### 1.7.1 Pengujian Puntir

Pengujian Puntir merupakan salah satu jenis pengujian material dengan sifat merusak (*destructive test*). Pengujian ini dilakukan untuk menentukan sifat-sifat pada bahan seperti modulus elastisitas geser, kekuatan luluh puntir, dan modulus pecah. Pengujian puntir dapat dilakukan pada misalnya poros, gandar, bor, dan batang kemudi, yang mempunyai sifat-sifat yang getas. Pengujian ini dimaksudkan untuk mencari tegangan geser maksimum pada material. Tegangan geser merupakan gaya yang bekerja pada luas penampang dengan arah gaya yang longitudinal pada sumbunya, dan tidak terjadi deformasi pada arah memanjang batang. Tegangan geser terjadi pada poros yang mengalami beban puntir.



Gambar 2.7 Distribusi Tegangan akibat Beban Puntir

Sumber : Gere (2010)



Gambar 2.8 Penentuan Arah Tegangan Geser pada Potongan Melintang  
 Sumber : Gere (2010)

Rumus momen torsi ( $T$ ) yang digunakan untuk batang melingkar :

$$T = F \times L \text{ (N.mm)} \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan :

$F$  = gaya yang diberikan (N)

$L$  = jarak pusat rotasi ke gaya yang terukur (mm)

Adapun untuk momen inersia polar ( $J$ ) adalah :

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \text{ (mm}^4\text{)} \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan :

$d$  = diameter benda uji (mm)

Sehingga untuk mencari tegangan geser maksimum ( $\tau_{\max}$ ) dapat menggunakan persamaan berikut :

$$\frac{\tau_{\max}}{r} = \frac{T}{J} \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan :

$\tau_{\max}$  = tegangan geser maksimum (MPa)

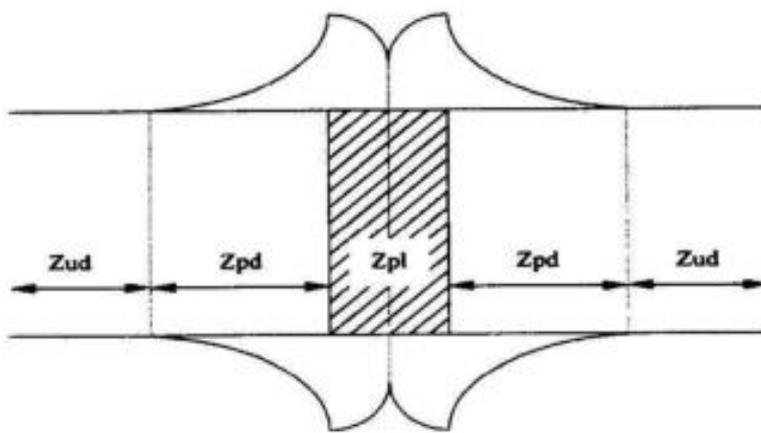
$r$  = radius benda uji (mm)

$J$  = momen inersia polar (mm<sup>4</sup>)

Dari hasil tegangan geser maksimum ( $\tau_{\max}$ ) dapat dikatakan bahwa hasil tersebut merupakan kekuatan puntir/tegangan puntir. (Popov, 1976)

### 1.8 Daerah Heat-Affected Zone (HAZ)

Daerah HAZ adalah bagian dari logam yang dikenakan panas tanpa meleleh pada proses pengelasan (Kalpakjian, 2009). Akibat dari terjadinya panas ini, struktur mikro dan sifat-sifat mekanisnya berubah dari keadaan semula. Pada pengelasan gesek ada beberapa bagian yang 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.

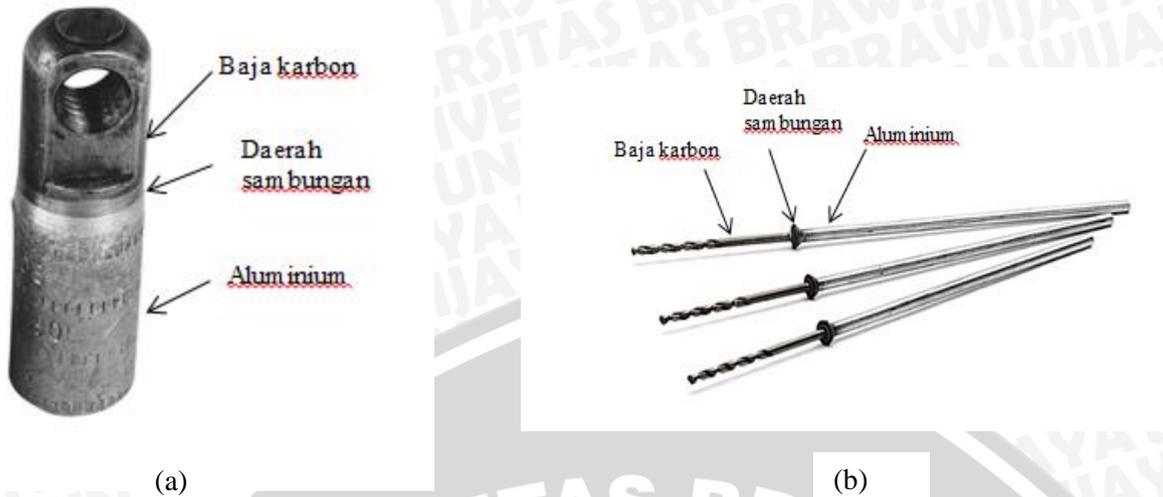


Gambar 2.9 Daerah *zpl*, *zpd* dan *zud*  
Sumber : Lin dkk (1999)

Semakin besar panas yang dihasilkan maka daerah HAZ yang terbentuk juga semakin besar. Ini akan menyebabkan kekuatan dari sambungan las tersebut akan semakin menurun.

### 1.9 Aplikasi Friction Welding

*Friction Welding* mulai marak digunakan dalam dunia industri seperti dalam bidang perkapalan dan penerbangan. Beberapa contoh aplikasi dari proses penyambungan *friction welding*, yaitu :



Gambar 2.10 Gambar aplikasi *friction welding dissimilar* : (a) *Electrical connector* ; (b) Mata bor  
Sumber : Mtiwelding (2016)

### 1.10 Hipotesis

Berdasarkan teori dan beberapa penelitian yang sudah pernah dilakukan sebelumnya, dapat ditarik hipotesis bahwa variasi tinggi kerucut satu sisi dan *Burn-off Length* (BOL) dengan gaya penekanan 7000 N dan 17500 N akan mempengaruhi dari besarnya kekuatan puntir pada sambungan las gesek beda material antara A6061 dan baja St 41. Dengan adanya variasi tinggi kerucut satu sisi dan *Burn-off Length* (BOL) akan mempengaruhi pula pada luas daerah HAZ.

Dimana semakin besar tinggi kerucut, menyebabkan luas bidang kontak saat pengelasan semakin kecil dan *heat input* berkurang, sehingga luas daerah HAZ pada sambungan las gesek semakin sedikit dan kekuatan puntir pada sambungan las gesek menjadi semakin meningkat.

Semakin kecil *Burn-off Length* (BOL), akan menyebabkan *heat input* atau panas yang masuk semakin rendah dan daerah HAZ juga akan semakin kecil. Ini menyebabkan kekuatan puntir meningkat.