

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Lin (1999) melakukan penelitian dengan judul “*The Effect of Joint Design and Volume Fraction on Friction Welding Properties of A360/SiC (p) Composites*”. Penelitian tersebut menggunakan material aluminium A360 dan komposit SiC. Pada penelitian tersebut memvariasikan benda kerja dengan berbeda bentuk. Pada variasi pertama, yakni salah satu benda kerja diberikan sudut *chamfer* dan pada variasi kedua, kedua benda kerja tidak diberi sudut *chamfer*. Selain itu, penelitian tersebut membandingkan antara pengelasan dengan material sama (aluminium-aluminium) dan pengelasan dengan material yang berbeda (aluminium-komposit). Penelitian tersebut menggunakan *friction time* selama 8s, *rotational speed* sebesar 800rpm, dan *friction pressure* sebesar 5,6MPa. Kemudian melakukan *upset pressure* sebesar 5,6MPa dan *upset time* selama 10s. Pada penelitian tersebut menghasilkan pada variasi yang menggunakan sudut *chamfer* memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada variasi tanpa menggunakan sudut *chamfer*. Dan pada pengelasan dengan dua material yang sama memiliki kekuatan yang lebih baik daripada pengelasan dengan dua material yang berbeda.

Mumin Sahin (2006) melakukan penelitian dengan judul “*An experimental study on joining of severe plastic deformed aluminium materials with friction welding method*”. Penelitian tersebut menggunakan material paduan aluminium 5083. Pada penelitian tersebut divariasikan *friction time* dan *friction pressure* yang memiliki pengaruh terhadap kekuatan tarik. Variasi *friction pressure* yang dilakukan pada penelitian tersebut yakni 35MPa, 40MPa, dan 45MPa. Sementara variasi *friction time* yang dilakukan yakni sebesar 1s, 3s, dan 5s. Pada penelitian tersebut dihasilkan semakin meningkatnya *friction pressure* dan *friction time* semakin meningkatkan kekuatan tariknya.

Srija (2013) melakukan penelitian dengan judul “*Finite element analysis of friction welding process for 2024Al alloy and UNS C23000 Brass*”. Penelitian tersebut memiliki tujuan untuk melakukan pengelasan dengan dua jenis material yang berbeda melalui proses *continuous drive friction welding* dengan dibantu *software finite element method*. Penelitian tersebut memvariasikan *friction pressure* dengan variasi 20MPa, 30MPa, dan 40MPa. Selain itu penelitian tersebut juga memvariasikan *friction time* dengan variasi 4s,

5s, dan 6s. Pada penelitian tersebut juga memvariasikan *rotational speed* yakni 1000rpm, 1250rpm, dan 1500rpm. Pada penelitian tersebut dihasilkan kesimpulan, yakni semakin meningkatnya *friction pressure*, *friction time*, dan *rotational speed* maka akan meningkatkan deformasi yang terjadi pada kedua benda kerja tersebut selama proses pengelasan.

Dicky Adi Tyagita (2014) melakukan penelitian dengan judul penelitian “Kekuatan puntir dan porositas hasil sambungan las gesek AlMg-Si dengan variasi *chamfer* dan gaya tekan akhir”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh sudut *chamfer* dan *upset pressure* pada AlMgSi. Sudut *chamfer* divariasikan dengan  $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ , dan  $45^{\circ}$ . Sementara *upset pressure* divariasikan 157Kgf, 185Kgf, dan 202Kgf dengan *upset pressure* selama 120s. Salah satu benda kerja dirotasi dengan *rotational speed* sebesar 1600rpm. Pada penelitian tersebut dihasilkan kesimpulan, yakni semakin menurunnya sudut *chamfer* dan semakin besarnya *upset pressure* menyebabkan meningkatnya kekuatan puntir hasil pengelasan *continuous drive friction welding*. Pada penelitian tersebut, kekuatan puntir tertinggi terdapat pada sudut *chamfer*  $15^{\circ}$  dan *upset pressure* 202Kgf dengan nilai kekuatan puntir sebesar 193,93MPa. Sementara itu, porositas akan menurun dengan menurunnya sudut *chamfer* dan semakin besarnya *upset pressure*. Pada penelitian tersebut, porositas terendah terdapat pada sudut *chamfer*  $15^{\circ}$  dan *upset pressure* 202Kgf dengan nilai porositas sebesar 0,2122%.

Adib (2016) melakukan penelitian dengan judul “Pengaruh Gaya Tekan Akhir 500kgf dengan Variasi Waktu Gesekan dan Sudut *Chamfer* Terhadap Nilai Kekuatan Tarik Sambungan Las Gesek Al-Mg-Si”. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh *friction time* dan sudut *chamfer* terhadap kekuatan tarik sambungan las *continous drive friction welding*. Penelitian tersebut memvariasikan *friction time* selama 45s, 50s, dan 55s, penelitian tersebut juga memberikan variasi sudut *chamfer* sebesar  $0^{\circ}$ ,  $11,5^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ , dan  $30^{\circ}$ . Penelitian tersebut menggunakan *friction pressure* sebesar 250 kgf, *upset pressure* sebesar 500kgf, *rotational speed* sebesar 1600rpm, dan *upset time* selama 110s. Penelitian tersebut menghasilkan Pada penelitian ini menghasilkan semakin lama *friction time* dan semakin besarnya sudut *chamfer* menyebabkan menurunnya kekuatan tarik yang dihasilkan oleh las *continuous drive friction welding*.

## 2.2 Steel

### 2.2.1 Definisi Baja

Baja merupakan hal yang sudah tidak asing lagi di era saat ini. Baja merupakan salah satu logam paduan yang sering digunakan pada industri manufaktur. Baja memiliki kandungan logam besi (Fe) dan unsur karbon sebagai unsur paduan utamanya. Selain itu, terdapat berbagai macam unsur yang menyusun paduan baja tersebut. Antara lain yakni, fosfor, mangan, sulfur, dan silikon. Selain itu, perbedaan persentase karbon dan besi mampu menyebabkan perbedaan sifat mekanik pada logam paduan tersebut. Yakni, mulai dari baja tersebut memiliki sifat yang paling lunak dan mudah dibuat, maupun baja tersebut bersifat sangatlah keras.

### 2.2.2 *Stainless Steel*

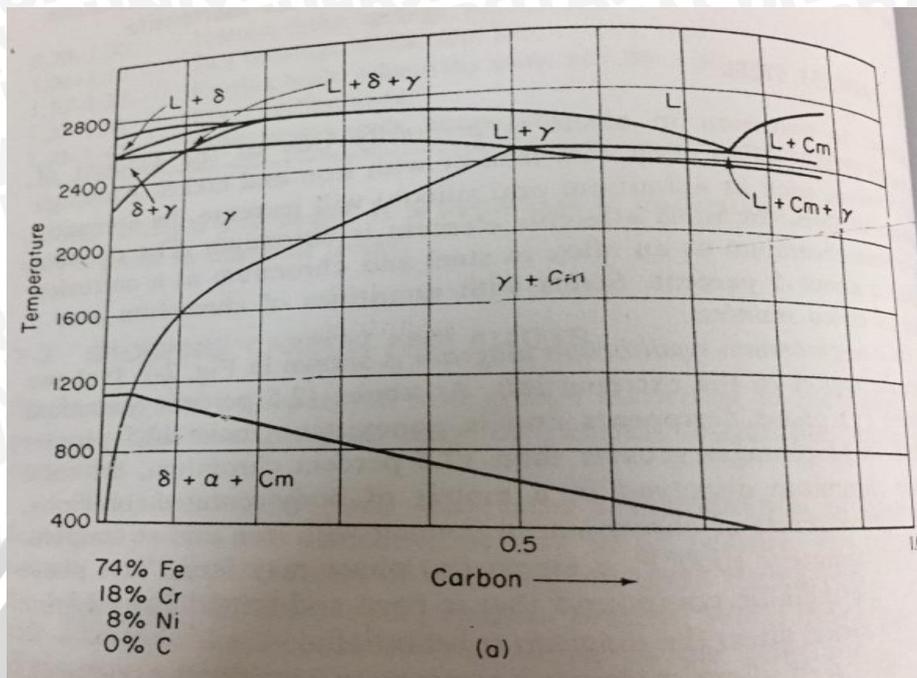
Pada industri manufaktur, dibutuhkan material yang memiliki karakteristik yang berbeda- beda. Salah satu sifat yang dibutuhkan yakni adalah kemampuan ketahanan terhadap korosi. Unsur- unsur tambahan yang mampu menambah kemampuan ketahanan terhadap korosi yakni aluminium, *silicon*, dan *chromium*. Namun, diantara unsur- unsur tersebut *chromium* memiliki kemampuan tahan terhadap korosi yang terbaik. Unsur *chromium* biasanya dipadukan pada paduan baja. Paduan baja yang mengandung unsur *chromium* melebihi 5 persen disebut dengan *stainless steel*.

Tabel 2.1 : Komposisi Kimia *Stainless steel* SS-304

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Fe
0.07%	0.3%	1.38%	0.4%	0.28%	18.4%	8.1%	71.07%

Sumber : Khan (2011)

### 2.2.3 Diagram Fasa *Stainless Steel*



Gambar 2.1 : Diagram Fasa *Stainless Steel*  
Sumber : Pollack(1981:184)

Gambar di atas merupakan diagram fasa *stainless steel*. Diagram tersebut menerangkan adanya perubahan fasa yang diakibatkan karena adanya perubahan temperatur ( $^{\circ}\text{F}$ ) dan persentase kandungan karbon (%) pada *stainless steel* tersebut. Dari diagram tersebut dapat diperhatikan yakni pada temperatur  $\pm 400^{\circ}\text{F}$  sampai dengan  $\pm 1200^{\circ}\text{F}$  ( $\pm 204,4^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $\pm 648,89^{\circ}\text{C}$ ) paduan *stainless steel* mulai berubah fasanya menjadi *austenite*. Sedangkan setelah memasuki temperatur  $\pm 2775^{\circ}\text{F}$  ( $\pm 1523,889^{\circ}\text{C}$ ) paduan *stainless steel* menjadi cair. Sedangkan temperatur rekristalisasi paduan *stainless steel* sebesar  $537,78^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.4 Penggolongan *Stainless Steel*

Sistem penggolongan paduan baja *stainless steel* berfungsi untuk memudahkan untuk memilih material yang ingin digunakan sesuai kebutuhan serta memudahkan di dalam mengidentifikasi paduan tersebut. Sistem penggolongan *stainless steel* berdasarkan AISI (*American Iron and Steel Institute*) sebagai berikut.

- Martensite *Stainless Steel*: Kandungan *chromium* yang dimiliki pada umumnya antara 11,5-18,0%. Kandungan karbon pada umumnya antara 0,15-1,2%.

- Austenit *Stainless steel* : Kandungan *chromium* yang dimiliki pada umumnya 16-26% dan mengandung nikel sebesar 3-20% serta memiliki kandungan karbon sebesar 0,02-0,25%.
- Ferrite *Stainless steel* : Kandungan karbon yang dimiliki kurang dari 0,2% serta mengandung *chromium* sebesar 16-20%.

## 2.3 Aluminium

### 2.3.1 Definisi Aluminium

Salah satu unsur logam yang terkandung di muka bumi adalah aluminium. Aluminium ditemukan oleh Friedrich Wöhler pada tahun 1827. Aluminium yang terdapat di permukaan bumi berbentuk senyawa kimia yang disebut bauksit, yakni bijih aluminium yang memiliki komposisi terdiri atas tanah tawas, aluminium oksida, besi oksida, dan asam silikat.

Bauksit dapat ditemukan di berbagai negara di dunia ini. Beberapa negara yang dapat ditemukannya bauksit adalah Prancis, Italia, Rusia, Hungaria, Afrika, Amerika, Asia, Australia, dan Indonesia. Bauksit di Indonesia dapat ditemukan di daerah Riau, Kalimantan Barat, dan Kalimantan Selatan.

Aluminium memiliki kelebihan daripada logam-logam yang lain. Aluminium memiliki kekuatan tinggi, tahan korosi, dan merupakan konduktor listrik yang baik. Salah satu karakteristik dari aluminium yakni adalah ringan dengan berat jenis sebesar  $2,7\text{gr/cm}^3$ . Hal ini lebih ringan dari pada baja yang memiliki berat jenis sebesar  $7,8\text{ gr/cm}^3$ .

Tabel 2.2 : Komposisi Kimia Al -6061

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

Sumber : ASM *Aerospace Specification Metals Inc.* (2016)

Pada tabel di atas dapat diketahui dari komposisi unsur aluminium Al-6061. Kandungan magnesium dan *silicon* pada aluminium tersebut mampu meningkatkan daya tahan karat aluminium tersebut. Unsur magnesium pada aluminium tersebut mampu meningkatkan sifat mampu mesin dan mampu bentuk dari aluminium tanpa mengurangi sifat keuletan serta membuat aluminium paduan tersebut mampu dilas dengan baik.

### 2.3.2 Sistem Penggolongan Aluminium

Untuk memudahkan mengidentifikasi aluminium dan paduan aluminium, digunakan sistem empat digit. Standarisasi logam aluminium yang dilakukan oleh *American Standart Testing Materials* (ASTM) menggunakan angka dalam menetapkan penggolongan aluminium paduan.

Tabel 2.3 Sistem Penamaan Paduan Aluminium Tempa

Unsur Paduan Utama	No. Seri
Aluminium, 99% dan lebih besar	1xxx
Copper	2xxx
Mangan	3xxx
Silicon	4xxx
Magnesium	5xxx
Magnesium dan Silikon	6xxx
Zink	7xxx
Unsur Lain	8xxx

Sumber: Avner (1997 : 484)

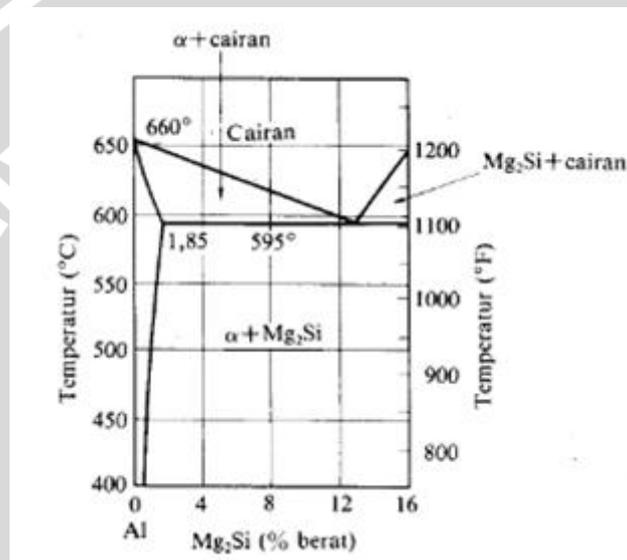
Berikut ini adalah cara untuk memahami penamaan aluminium.

- xxxx : Angka pertama menjelaskan jenis unsur paduan utama yang terdapat pada aluminium. Angka 1 menjelaskan kandungan unsur aluminium murni antara 99 – 99,9 %. Angka 2 menjelaskan kandungan tembaga sebagai unsur paduan utamanya. Angka 3 menjelaskan kandungan mangan sebagai unsur paduan utamanya. Angka 4 menjelaskan kandungan silikon sebagai unsur paduan utamanya. Angka 5 menjelaskan kandungan magnesium sebagai unsur paduan utamanya. Angka 6 menjelaskan kandungan magnesium-silikon sebagai unsur paduan utamanya. Angka 7 menjelaskan kandungan *zinc* sebagai unsur paduan utamanya.
- xxxx : Angka kedua menjelaskan paduan aluminium tersebut merupakan hasil olahan kesekian kalinya. Contohnya adalah semisal angka yang tertera adalah angka 0, maka penjelasannya yakni paduan aluminium tersebut masih asli atau belum diolah, sedangkan apabila angka yang tertera adalah angka 1, maka penjelasannya yakni paduan aluminium tersebut hasil olahan pertama.
- xxxx : Angka ketiga dan keempat menjelaskan kandungan minimum aluminium yang terdapat pada paduan aluminium tersebut. Contohnya adalah semisal angka yang tertera adalah 61, maka arti kandungan aluminium minimum yang ada pada paduan aluminium tersebut sebesar 61 %.

- Contoh : Aluminium 6061 memiliki arti bahwa paduan aluminium tersebut memiliki unsur paduan utamanya yakni magnesium dan silikon, paduan aluminium tersebut masih asli atau belum diolah, dan kandungan unsur aluminiumnya minimal sebesar 61%.

Paduan Al-Mg-Si memiliki berbagai macam sifat, yakni sifat mampu potong yang baik, daya tahan korosi yang baik, dan mampu las. Paduan tersebut dapat diberikan perlakuan panas.

### 2.3.3 Diagram Fasa Al-Mg-Si



Gambar 2.2 :Diagram Fasa Al –Mg-Si  
Sumber : Surdia (1987:139)

Pada gambar di atas menggambarkan tentang diagram fasa Al – Mg – Si, diagram fasa ini menjelaskan adanya perubahan fasa yang terjadi pada material akibat perubahan temperatur maupun perubahan kandungan unsur paduan magnesium-silikon. Al – Mg – Si memiliki titik untuk berubah fasa menjadi austenit pada temperatur 595°C sehingga mencapai daerah transisi antara fasa padat menjadi cair. Titik cair Al – Mg – Si berada pada temperatur 660°. Sedangkan temperatur rekristalisasi paduan Al-Mg-Si yakni sebesar 315,56°C.

## 2.4 Pengelasan

### 2.4.1 Definisi Pengelasan

Definisi las berdasarkan *Deutsche Industrie Normen* (DIN), adalah suatu ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan

lumer atau cair. Definisi pengelasan menurut Messler (1983), pengelasan adalah proses menggabungkan dua material yang mempunyai kesamaan tipe atau kelas menjadi satu dengan memanfaatkan pengikatan secara kimia melalui panas dan tekanan. Dari definisi tersebut, pengelasan dapat diartikan sebagai penyambungan dua buah logam atau lebih menggunakan energi panas. Berdasarkan cara kerjanya, proses pengelasan dibagi menjadi tiga yaitu:

- a) Pengelasan cair, yakni proses pengelasan dengan menggunakan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar yang berguna untuk memanaskan sambungan sampai mencair.
- b) Pengelasan tekan, yakni proses pengelasan dengan cara sambungan dipanaskan kemudian ditekan sehingga bergabung menjadi satu.
- c) Pematريان, yakni proses pengelasan yang memanfaatkan paduan logam yang memiliki titik cair yang rendah sehingga mampu menyambungkan dan logam induk tidak ikut mencair.

#### **2.4.2 Continuous Drive Friction Welding**

*Continuous drive friction welding* adalah salah satu proses pengelasan tekan yang memanfaatkan gesekan antar kedua logam untuk saling memanaskan satu sama lainnya. Pada proses pengelasan ini, salah satu benda kerja dipasangkan pada unit dengan penggerak motor yang menyebabkan benda kerja tersebut bergerak secara translasi, sedangkan benda kerja satunya dihubungkan dengan unit penggerak motor sehingga benda kerja tersebut mampu berotasi. Rotasi yang terjadi berlangsung dengan kecepatan yang konstan. Benda kerja yang akan dilas saling menekan dimana salah satu benda kerja berotasi dan benda kerja yang lain menekan (*friction pressure*). Gesekan yang terjadi antara kedua permukaan benda kerja tersebut menimbulkan panas yang semakin meningkat pada ujung benda kerja. Hal ini terus dilakukan sampai batas waktu yang telah ditentukan (*friction time*). *Friction pressure* dapat ditingkatkan nilai tekanannya (*upset pressure*) setelah batas waktu yang telah ditentukan (*upset time*) dan setelah rotasi yang terjadi telah berhenti.

Pada pengelasan *continous drive friction welding*, benda kerja tidak perlu mencair agar benda kerja menyatu. Dalam pengelasan tersebut yakni dibutuhkan salah satu benda kerja agar mencapai temperatur rekristalisasi agar kedua benda kerja dapat saling menyambung (Adib, 2016). Salah satu fenomena lain dalam mengelas dua logam yang berbeda, yakni salah satu benda kerja mengalami deformasi plastis akibat peningkatan

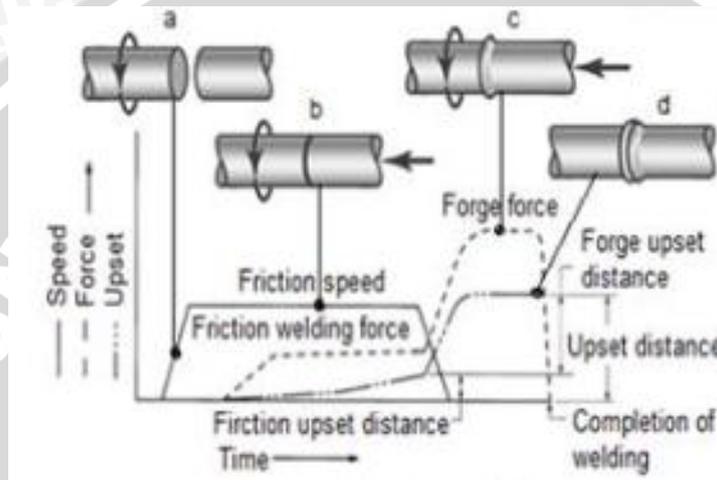
temperatur. Benda kerja tersebut perlu mencapai 0.3x temperatur cair benda kerja sehingga bisa terdeformasi plastis (Sahin, 2006). Temperatur deformasi plastis benda kerja akibat pengelasan *continuous drive friction welding* dapat diketahui dengan persamaan :

$$T_r = 30\% \times T_c \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2006}) \quad (2-1)$$

Keterangan :

$T_r$  = Temperatur deformasi plastis benda kerja ( $^\circ\text{C}$ )

$T_c$  = Temperatur cair material ( $^\circ\text{C}$ )

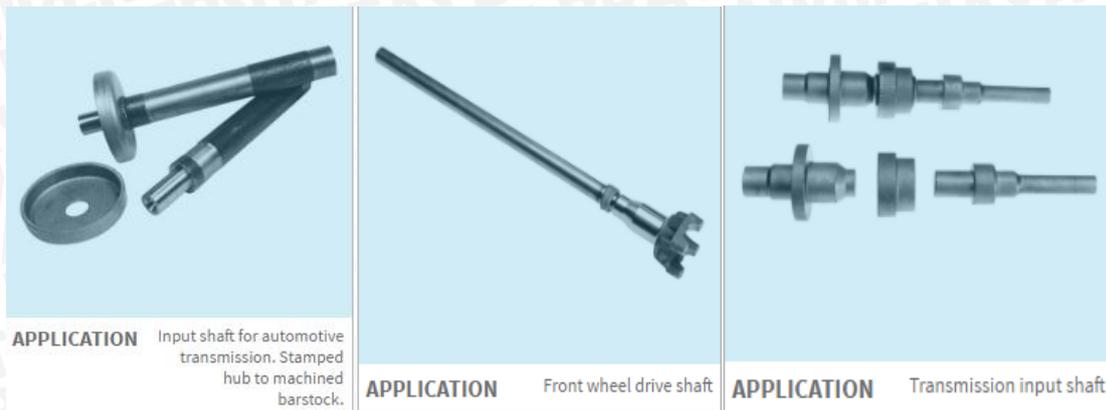


Gambar 2.3 : Parameter *Continuous Drive Friction Welding*  
Sumber : Srija dan Reddy (2015)

Setiap proses pengelasan memiliki kelebihan yang berbeda- beda. Begitu juga dengan proses pengelasan *continuous drive friction welding*. Berikut ini adalah kelebihan dari *continuous drive friction welding*.

- Alat yang digunakan untuk proses pengelasan relatif sederhana.
- Waktu pengelasan relatif singkat.
- Mampu digunakan untuk mengelas logam yang tidak sejenis.
- Tidak memiliki dampak berbahaya bagi kesehatan.
- Tidak memerlukan logam pengisi/ *filler*.

Dalam industri manufaktur, proses pengelasan digunakan di dalam proses pembuatan berbagai macam benda atau part dari suatu produk. Berikut ini adalah contoh pengaplikasian *continuous drive friction welding*.

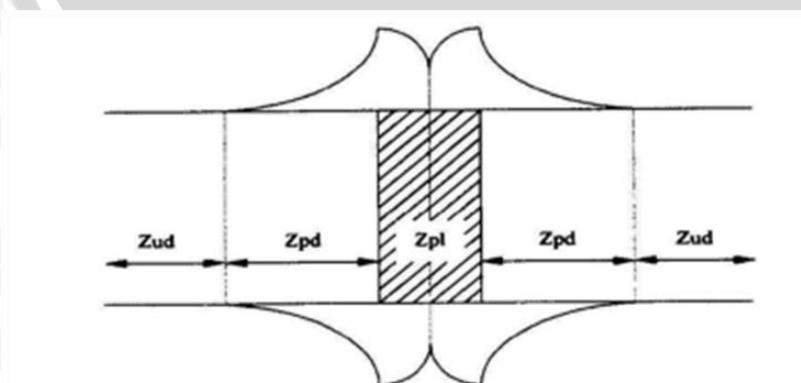


Gambar 2.4 : Pengaplikasian Las *Continuous Drive Friction Welding*  
 Sumber : mtiwelding (2016)

### 2.4.3 Daerah Sambungan Las

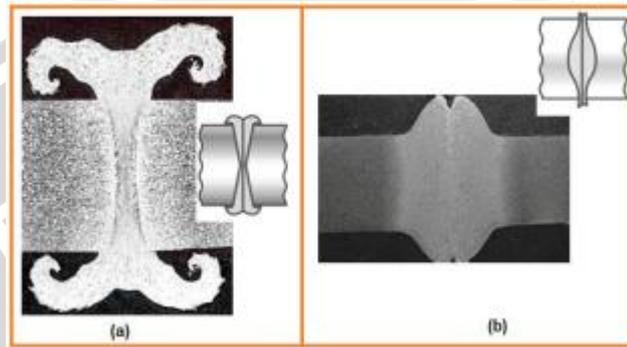
Daerah sambungan las atau *heat affected zone (HAZ)* adalah daerah yang terpengaruh panas pada saat proses pengelasan. Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan sifat- sifat mekanis dan perubahan struktur mikro dari benda kerja yang dilas dari keadaan awal. Luas daerah HAZ dipengaruhi oleh panas yang dihasilkan dari proses pengelasan tersebut. Semakin tinggi panas yang dihasilkan maka semakin luas pula daerah HAZ tersebut. Pada proses pengelasan *continuous drive friction welding*, daerah HAZ dibagi menjadi tiga bagian yang diantaranya adalah:

1. *Fully plasticized zone (Zpl)* yakni daerah HAZ yang mengalami deformasi plastis secara keseluruhan dan menyatu saat pengelasan.
2. *Partly deformed zone (Zpd)* yakni daerah HAZ yang mengalami deformasi sebagian yang diakibatkan oleh proses pengelasan.
3. *Undeformed zone (Zud)* yakni daerah yang tidak terpengaruh panas sehingga tidak terjadi deformasi pada bagian tersebut.



Gambar 2.5: Daerah HAZ Pada *Continuous Drive Friction Welding*  
 Sumber : Lin dkk (1999)

Bentuk daerah sambungan las (HAZ) dipengaruhi oleh *friction pressure*, *friction time*, dan *rotational speed*. Jika *friction pressure*-nya terlalu tinggi atau *rotational speed*-nya terlalu rendah, maka bentuk daerah sambungan las (HAZ) akan berbentuk sempit seperti yang terlihat pada gambar 2.6(a). Sedangkan jika *friction pressure*-nya terlalu rendah atau *rotational speed*-nya terlalu tinggi, maka bentuk daerah sambungan las (HAZ) akan berbentuk melebar seperti yang terlihat pada gambar 2.6(b).



Gambar 2.6 : Pengaruh *Friction Pressure* dan *Rotational Speed* Pada HAZ  
 Sumber : Srija dan Reddy (2015)

#### 2.4.4 Energi Pada Sambungan Las

Pada proses pengelasan *continuous drive friction welding*, terdapat energi panas yang dihasilkan akibat gesekan antara kedua permukaan benda kerja. Energi panas tersebut akan menyebar ke seluruh bagian kedua benda kerja tersebut. Berikut adalah persamaan-persamaan yang mengakibatkan adanya energi panas tersebut.

$$dQ = \omega \cdot dM \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \tag{2-2}$$

Dimana  $\omega$  adalah kecepatan sudut dan  $dM$  adalah nilai momen torsi pada ketebalan lingkaran yang bergesekan ( $dr$ ). Nilai dari momen torsi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$dM = r \cdot dF_{\text{friction}} \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \tag{2-3}$$

Dimana  $dF_{\text{friction}}$  adalah gaya gesek pada lingkaran yang bergesekan ( $dr$ ), dan  $r$  adalah diameter jari- jari lingkaran. Setelah itu, hal tersebut akan didefinisikan bahwa gaya gesek  $dF_{\text{friction}}$  setara dengan koefisien gesek dikalikan dengan gaya penekanan ( $P$ ) pada jari-jari permukaan benda( $dr$ ). Karena gesekan terjadi pada luas permukaan material yang bergesekan dengan tebal lingkaran ( $dr$ ), maka gaya gesek dikalikan dengan luas permukaan yang bergesekan ( $dr$ ).

$$dF_{\text{friction}} = \mu \cdot P \cdot 2\pi r \cdot dr \dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \tag{2-4}$$

Setelah itu substitusikan persamaan (2-3) dan (2-4) ke dalam persamaan (2-2), sehingga didapatkan.

$$dQ = \omega \cdot r \cdot (\mu \cdot P \cdot 2\pi r \cdot dr) \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-5)$$

$$dQ = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-6)$$

Untuk mencari nilai kalor pada silinder pejal dapat dilakukan dengan cara mengintegrasikan nilai jari- jari R pada persamaan (2-6), sehingga:

$$dQ = \int_0^R 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-7)$$

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot \frac{r^3}{3} \Big|_0^R \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-8)$$

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^3 \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-9)$$

Permodelan yang dilakukan oleh Khan (2011) mengembangkan rumus (2-9) menjadi berikut:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^3 \cdot \eta \dots\dots\dots(\text{Khan, 2011}) \quad (2-10)$$

Keterangan :

Q : Jumlah energi per satuan waktu yang terjadi permukaan las (Watt) (1 Watt = 0,2388Kalori/s)

P : *Friction pressure* (N/m<sup>2</sup>)

$\omega$  : Kecepatan sudut (rad/s)

r : Radius benda kerja/ permukaan yang bergesekan (m)

$\mu$  : Koefisien gesek

$\eta$  : *Inelastic heat fraction* (%)

## 2.5 Perpindahan Panas

### 2.5.1 Konduksi

Perpindahan panas dalam kesehariannya mampu ditemukan di dalam berbagai macam hal. Perpindahan panas dapat melalui zat perantara berupa zat padat, fluida, dan dapat berpindah meskipun tidak ada zat perantara. Salah satu jenis perpindahan panas yakni adalah konduksi. Konduksi adalah proses perpindahan panas yang mengalir melalui zat perantara berupa benda padat. Konduksi dirumuskan sebagai berikut.

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{L} \dots\dots\dots(\text{Cengel, 2002}) \quad (2-11)$$

Keterangan :

Q : Laju perpindahan panas (Watt) (1 Watt = 0,2388Kalori/s)

$k$  : Konduktivitas termal ( W/m<sup>0</sup>C)

$A$  : Luas permukaan (m<sup>2</sup>)

$T_1$  : Temperatur pada titik 1 (°C)

$T_2$  : Temperatur pada titik 2 (°C)

$L$  : Tebal benda (m)

### 2.5.2 Konveksi

Perpindahan panas dalam kesehariannya mampu ditemukan di dalam berbagai macam hal. Perpindahan panas dapat melalui zat perantara berupa zat padat, fluida, dan dapat berpindah meskipun tidak ada zat perantara. Salah satu jenis perpindahan panas adalah konveksi. Konveksi adalah proses perpindahan panas yang mengalir melalui zat perantara berupa fluida (gas atau cairan). Konveksi dirumuskan sebagai berikut.

$$Q = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \dots\dots\dots(\text{Cengel, 2002}) \quad (2-12)$$

Keterangan :

$Q$  : Laju perpindahan panas (Watt) (1 Watt = 0,2388Kalori/s)

$h$  : Koefisien perpindahan panas secara konveksi ( W/ m<sup>2</sup>. °C)

$A_s$  : Luas permukaan (m<sup>2</sup>)

$T_s$  : Temperatur permukaan (°C)

$T_\infty$  : Temperatur fluida (°C)

### 2.6 Tegangan

Tegangan adalah gaya yang bekerja pada suatu benda. Yakni perbandingan antara gaya yang bekerja dengan luas penampang suatu benda. Tegangan mampu menyebabkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) pada suatu benda. Baik deformasi elastis maupun deformasi plastis. Tegangan dirumuskan sebagai berikut.

$$\sigma = F/A \dots\dots\dots(\text{Guy, 1959}) \quad (2-13)$$

Keterangan:

$\sigma$  : Tegangan (Pa)

$F$  : Gaya yang bekerja pada benda (N)

$A$  : Luas penampang benda (m<sup>2</sup>)

## 2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah sebuah metode yang berguna untuk memecahkan masalah secara formulasi matematik. Dan untuk lebih mudahnya digunakan teknik numerik sehingga metode elemen sehingga metode inilah dibutuhkan.

Konsep dari metode elemen hingga adalah membagi suatu struktur geometri menjadi elemen- elemen yang lebih kecil dengan dimensi berhingga. Sedangkan struktur asli diasumsikan sebagai rangkaian dari elemen- elemen kecil tersebut. Selain itu, elemen- elemen tersebut dihubungkan melalui *joint* yang memiliki jumlah berhingga atau dapat disebut sebagai node atau titik *node*. Setelah itu, properti dari masing- masing elemen tersebut dihitung sehingga properti secara keseluruhan akan diketahui.

Rumus keseimbangan dari setiap elemen menghasilkan rumus keseimbangan dari keseluruhan struktur tersebut yang menyebabkan terjadinya kesinambungan antar node. Kemudian, kondisi batas dibebankan pada struktur tersebut agar mampu mengetahui nilai dari variabel yang diinginkan.

Berikut ini adalah rumus matriks metode elemen hingga yang berkaitan dengan perpindahan panas.

$$k \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \dots\dots(\text{Akin, 2010}) \quad (2-14)$$

Dimana :

$$k = \frac{k_T \cdot A}{L} + h \cdot A \quad \dots\dots(\text{Akin, 2010}) \quad (2-15)$$

$$f = f_{\text{generated}} + f_{\text{conv}} \quad \dots\dots(\text{Akin, 2010}) \quad (2-16)$$

$$f = f_{\text{generated}} + h \cdot A \cdot T_{\infty} \quad \dots\dots(\text{Akin, 2010}) \quad (2-17)$$

Keterangan :

$k_T$  = konduktivitas termal ( $\text{W/m}^0\text{C}$ )

$A$  = luas permukaan ( $\text{m}^2$ )

$L$  = tebal benda (m)

$h$  = koefisien perpindahan panas secara konveksi ( $\text{W/m}^{20}\text{C}$ )

$k$  = kekakuan termal ( $\text{W}^0\text{C}$ )

$\phi$  = perubahan temperatur ( $^0\text{C}$ )

$f$  = laju perpindahan panas (W) (1 Watt = 0,2388Kalori/s)

$T_{\infty}$  = temperatur fluida ( $^0\text{C}$ )

## 2.8 Software Berbasis Elemen Hingga

Salah satu *software* berbasis elemen hingga adalah Ansys. *Software* ini mampu untuk mendiskritisasi model dengan sangat halus, menghasilkan hasil dengan nilai ketelitian yang tinggi, dan mampu bekerja pada elemen yang banyak. *Software* ini digunakan untuk menganalisis berbagai hal, antara lain: analisis elektrik, analisis fluida, analisis magnetis analisis *structural*, dan analisis *thermal*.

Pada proses penggunaan *software* tersebut, terdapat beberapa langkah yang biasanya dilakukan, antara lain:

### a. *Preprocessing* (proses awal).

*Preprocessing* memiliki beberapa tahap sebagai berikut:

- Pendefinisian masalah.
- Pemilihan tipe elemen yang berfungsi untuk mendiskritisasi model yang dibuat.
- Memasukkan data material.
- Pembuatan gambar geometri yang dapat dibuat dalam bentuk 1 dimensi, 2 dimensi, maupun 3 dimensi
- *Meshing* atau pengaturan tipe elemen dan pendiskritisasi struktur elemen tak hingga menjadi berhingga.
- Mendefinisikan analisis solusi yang akan digunakan.
- Memasukkan dan mengatur *boundary conditions* atau kondisi batas yang akan digunakan.
- Memasukkan pembebanan.

### b. *Solution* (proses solusi).

*Solution* memiliki beberapa tahap sebagai berikut:

- *Solving*, yakni proses penyelesaian masalah yang menggunakan perhitungan *numerical* yang dilakukan oleh komputer.

### c. *General post processing* (proses pembacaan hasil).

*General post processing* memiliki beberapa tahap sebagai berikut:

- *Plot result*, yakni penampilan hasil dari proses *solving* yang ditampilkan dalam bentuk *contour plot*. *Contour plot* ditampilkan dalam bentuk gradasi warna yang menggambarkan tentang tingkatan distribusi nilai variabel yang dihasilkan. Sehingga memudahkan di dalam memahami informasi tersebut.
- *List result*, yakni penampilan hasil analisis yang ditampilkan dalam bentuk tabel yang memberikan informasi secara detail mengenai nilai variabel yang dihasilkan.

- *Animation*, yakni pemberitahuan informasi yang digambarkan dengan *contour plot*. Namun untuk *animation*, *contour plot* tersebut ditampilkan dalam bentuk animasi video. Video tersebut menggambarkan tentang perkembangan dari kondisi awal sampai kondisi akhir variabel yang dihasilkan dari analisis tersebut. Sehingga mampu memahami informasi secara mudah .

## 2.9 Hipotesis

Semakin kecil sudut *chamfer* menyebabkan semakin besar nilai temperatur yang terjadi pada proses pengelasan *continuous drive friction welding*. Sedangkan semakin besar diameter benda kerja menyebabkan semakin besar nilai temperatur yang terjadi pada kedua benda kerja.

