

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Sebelumnya**

Zhao, Xin et al. (2005) dalam penelitiannya *empirical dynamic modeling and nonlinear force control friction stir welding*, gaya penekanan diperlukan untuk meningkatkan gaya gesek. Semakin tinggi gaya tekan maka akan menimbulkan gaya gesek yang semakin besar. Dengan gaya gesek yang semakin besar maka akan menimbulkan panas yang semakin besar pula. Sehingga semakin besar gaya tekan akan meningkatkan kekuatan tarik.

Razal, A. et al. (2011) pengaruh gaya tekan terhadap kekuatan tarik hasil *friction stir welding* pada magnesium AZ61A. Menggunakan 5 variasi gaya tekan yaitu 3, 4, 5, 6, 7 kN. Didapatkan hasil *tensile strength*, *microstructure* dan *hardness*. Dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa dengan gaya tekan 5 kN menghasilkan kekuatan tarik yang tinggi. Hal ini dikarenakan perubahan ukuran butir pada *stir zone* dan kekerasan meningkat seiring meningkatnya nilai kekuatan tarik.

Langari, J. et al. (2016) pengaruh kecepatan pengelasan terhadap gaya tekan, sifat mekanik dan morfologi pengelasan hasil *friction stir welding* pada A7075–T651. Untuk mengukur nilai gaya tekan menggunakan *load cell* hasilnya menunjukkan bahwa meningkatnya *welding speed* dengan *rotational rate* yang konstan dapat meningkatkan gaya tekan dan *microhardness* tetapi menurunkan kualitas tampilan hasil las-an. Namun meningkatnya *rotational rate* dengan *welding speed* yang sama tidak berhubungan terhadap gaya tekan, *microhardness* dan *weld morphology*.

Shahi, P. et al. (2014) dalam penelitiannya untuk mengetahui nilai dari gaya tekan secara langsung atau tidak langsung dapat menggunakan *load cell*, *strain gauge*, *dynamometers* serta sinyal output dari motor. Penggunaan *load cell*, *strain gauge*, *dynamometers* merupakan salah satu metode yang efisien.

Melendez et al. (2011) meningkatnya RPM dapat menghilangkan material yang terdapat dibawah *shoulder* dengan cepat sehingga pada *plunge depth* tertentu dapat menurunkan gaya tekan.

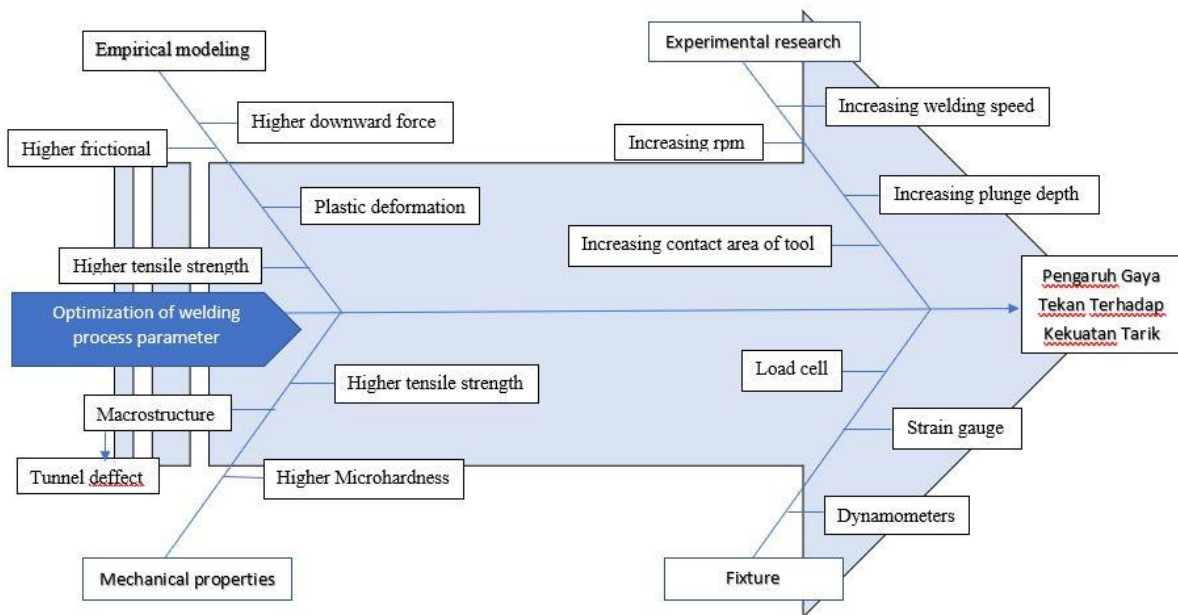
Longhurts (2009) pengaruh rpm mengakibatkan panas meningkat, material melunak dan menurunkan gaya tekan.

Crawford et al. (2003) Pada *welding speed* yang lebih tinggi, *heat input* lebih sedikit untuk benda kerja dan daerah pengelasan menjadi jauh lebih dingin, oleh karena itu dibutuhkan gaya tekan yang besar dengan *welding speed* yang besar pula.

Rajiv S. Mirsha, (2007) Kontak antara pin dengan benda kerja menciptakan pemanasan secara *frictional* dan *deformational* yang melunakan benda kerja sedangkan kontak antara *shoulder* dan benda kerja meningkatkan panas pada benda kerja dan memperluas area material yang lunak dan menekan material yang terdeformasi.

Melendez et al. (2011) Adanya *plunge depth* dan gaya tekan yang besar diperlukan karena *plastic zone* yang lebih besar pada material dengan temperatur yang rendah serta memiliki *yield strength* yang tinggi.

Collingan et al. (1999) Dalam penelitiannya menunjukkan dengan rendahnya gaya tekan menimbulkan *tunnel defect* pada *retreating side* sehingga nilai kekuatan tariknya rendah. Hal ini disebabkan kurangnya *frictional heat* dan rendahnya *plastic flow* pada logam induk sehingga menimbulkan adanya *tunnel defect* pada daerah pengelasan. Untuk lebih jelasnya *fishbone* diagram dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Fishbone diagram

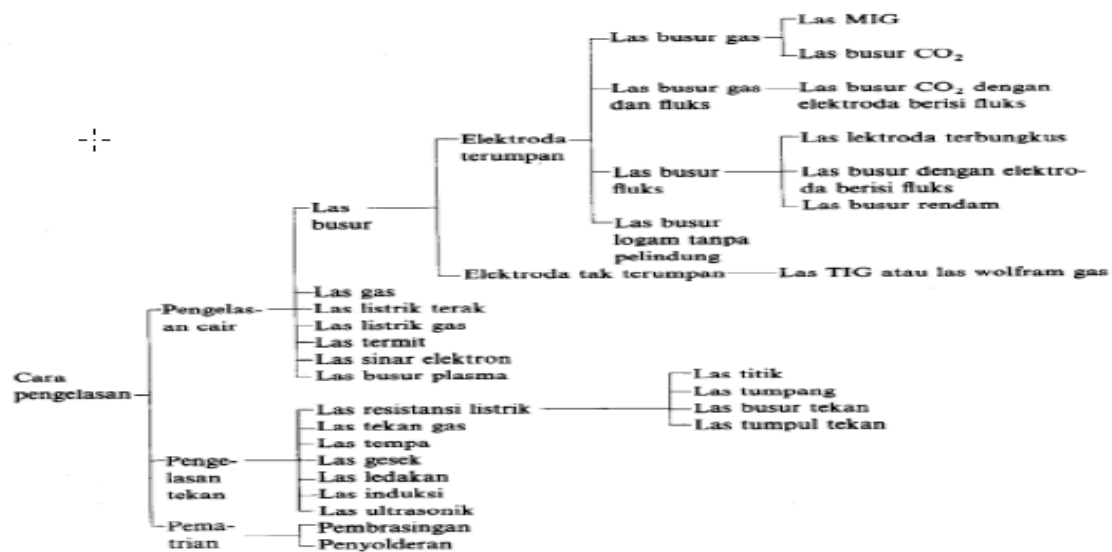
## 2.2 Pengelasan

Pengelasan (*welding*) merupakan suatu proses penyambungan secara permanen antara dua material melalui prinsip difusi yang dipengaruhi oleh temperatur, tekanan, dan sifat metalurgi (*Welding science and technology*, 2007:1). Sedangkan berdasarkan definisi dari *American Welding Society (AWS)*, pengelasan merupakan proses penyambungan material dengan menggunakan kumpuh las, kumpuh las merupakan logam yang membeku dari

logam induknya akibat pemanasan pada temperatur tertentu dengan atau tanpa penekanan, dengan atau tanpa logam pengisi.

Pada tahap permulaan dari perkembangan teknologi las, biasanya pengelasan hanya digunakan pada sambungan dan reparasi. Tetapi setelah melalui pengembangan riset dan penelitian dalam waktu yang cukup lama, maka sekarang ini penggunaan proses pengelasan sudah menjadi hal yang umum di semua negara. Penggunaan proses pengelasan mencakup di semua bidang contohnya dalam bidang manufaktur seperti industri alat alat berat, industri perkapalan, kereta api, pesawat terbang, bahkan dunia otomotif pun sudah sejak lama diaplikasikan. Saat ini pengelasan merupakan pengerjaan yang sangat penting dalam dunia manufaktur dengan bahan baku logam. Dari pertama penemuan pengelasan hingga saat ini mengalami perkembangan yang sangat pesat banyak teknologi pengelasan baru yang telah ditemukan.

Ada banyak sekali jenis pengelasan. Menurut *American Welding Society* (AWS), ada sekitar 50 jenis pengelasan yang berbeda. Pengelasan dapat diklasifikasikan sebagai berikut, seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Klasifikasi proses pengelasan

Sumber: Wiryosumarto (2008:7)

Sedangkan menurut cara kerjanya pengelasan dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

#### 1. Pengelasan Tekan

Pengelasan ini pada prosesnya benda kerja dipanaskan kemudian ditekan sehingga material akan tersambung.

#### 2. Pengelasan Cair

Teknik pengelasan ini terjadi dimana pada sambungan dipanaskan sampai mencair menggunakan energi panas dari busur listrik.

### 3. Pematrian

Pematrian merupakan sebuah metode pengelasan yang dipengaruhi panas dari logam pengisi yang dilakukan diantara logam induk yang akan disambung. Logam pengisi tersebut mudah melebur dari pada logam induknya (Wirjosumarto, 2008:7).

#### 2.2.1 Las Gesek

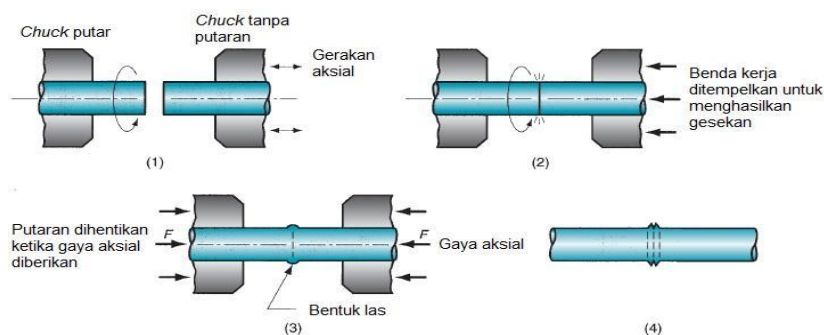
Las gesek atau biasa dikenal dengan *friction welding* adalah metode penyambungan dua buah material logam. Dalam metode ini panas dihasilkan dari perubahan energi mekanik kedalam energi panas pada bidang *interface* benda kerja karena adanya gesekan selama gerak rotasi dan juga dipengaruhi oleh tekanan (Budi, 2012). Las gesek pada umumnya memiliki tiga jenis, yaitu *continuous drive friction welding*, *linier friction welding* dan *friction stir welding*.

Benda kerja dalam *continuous drive friction welding* mengalami empat perubahan *phase* yang berbeda yaitu, *phase solid*, *phase transisi*, *phase steady* dan *phase pendinginan*. Gesekan mulai terjadi pada *phase solid* dimana panas akan mulai timbul akibat gesekan di kedua material dan mengalami peningkatan panas sejalan dengan kecepatan putar dan tekanan yang diberikan. Kemampuan material dalam penyerapan panas menyebabkan terjadinya perbedaaan ukuran butir pada daerah sambungan antara kedua sisi material. Luas permukaan kontak berpengaruh terhadap seberapa besar panas yang akan dihasilkan dalam proses penyambungan dalam waktu dan tekanan yang sama. Gaya yang diterima oleh benda kerja akan menghasilkan tekanan yang lebih besar pada permukaan sisi kontak dengan luasan kontak kecil, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk memanaskan daerah sambungan bisa cepat tercapai (Spindler, 1994).

Parameter dalam las gesek adalah waktu gesekan, tekanan gesekan, waktu tempa, tekanan tempa dan kecepatan putar (Nur Husodo, 2012). Las gesek lebih baik jika dibandingkan dengan las konvensional dalam hal porositas karena pada *continuous drive friction welding* menghasilkan hasil lasan yang hampir tidak mengalami porositas atau hanya terjadi porositas mikro (Jiang et al, 2004).

Benda hasil pengelasan *friction welding* mempunyai tiga zona yaitu *undeformed zone* (UZ) yang mana kekerasannya hampir sama sama dengan logam induk, *plasticized zone* (PZ) dan *partly deforming zone* (PDZ), kekerasan tertinggi ada pada PZ dari pada PDZ dan UZ, kekerasan pada PZ meningkat disebabkan oleh ukuran butir yang halus pada zona tersebut (Sathiya et al, 2007). *Continuous drive friction welding* dapat dijumpai di bidang otomotif, pesawat terbang, peralatan pertanian, dan migas.

Mekanisme kerja *continuous drive friction welding* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Mekanisme kerja *continuous drive friction welding*  
Sumber: Mikell P. Groover (2010:736)

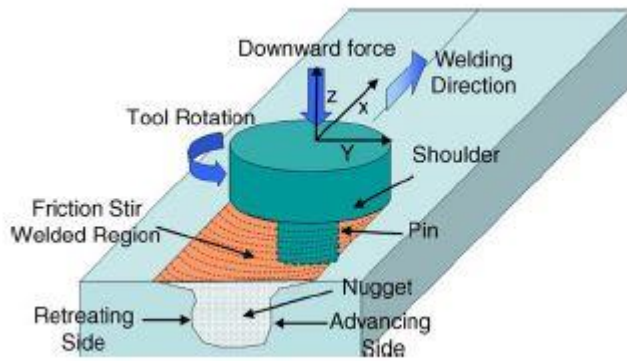
### 2.2.2 Friction Stir Welding

*Friction stir welding* (FSW) merupakan salah satu teknik pengelasan yang pertama kali ditemukan dan dikembangkan oleh Wayne Thomas di *The Welding Institut* (TWI) pada 1991 di Cambridge Inggris. *Friction stir welding* merupakan sebuah metode pengelasan yang termasuk pengelasan gesek, yang pada prosesnya tidak memerlukan bahan penambah atau pengisi, panas dan deformasi plastis dihasilkan dari gesekan antara *friction tool* dengan benda kerja (*workpiece*) (Terry, 2005).

*Friction stir welding* pada prosesnya terjadi dengan pelunakan *base metal* akibat input panas yang dihasilkan dari gesekan antara *friction tool* dengan *base metal*, panas dihasilkan oleh proses pencampuran mekanis dan panas adiabatik yang ada didalam material sehingga menyebabkan material melunak tanpa mencapai titik lelehnya.

Proses pengelasan FSW bekerja dibawah suhu *melting* dari material benda kerja yaitu sekitar 80% – 90% dari titik *melting*-nya (Chao, Qi dan Tang, 2003:138). Dikarenakan apabila terlalu tinggi temperatur maka material induk akan melunak sehingga akan terjadi slip (Lohwasser, 2009).

Pada proses *friction stir welding*, panas dihasilkan dari gesekan antara *tool* dan benda kerja. Benda kerja akan menerima 95% dari panas keseluruhan dan *tool* akan menerima 5% dari panas keseluruhan. Panas yang dihasilkan akan menentukan kualitas hasil las-an, *residual stress* dan distorsi, sedangkan panas yang diberikan pada *tool* akan memengaruhi keawetan *tool* itu sendiri (Chao, Qi dan Tang, 2003:138).



Gambar 2.4 Mekanisme *friction stir welding*

Sumber: Rajiv S. Mirsha (2007)

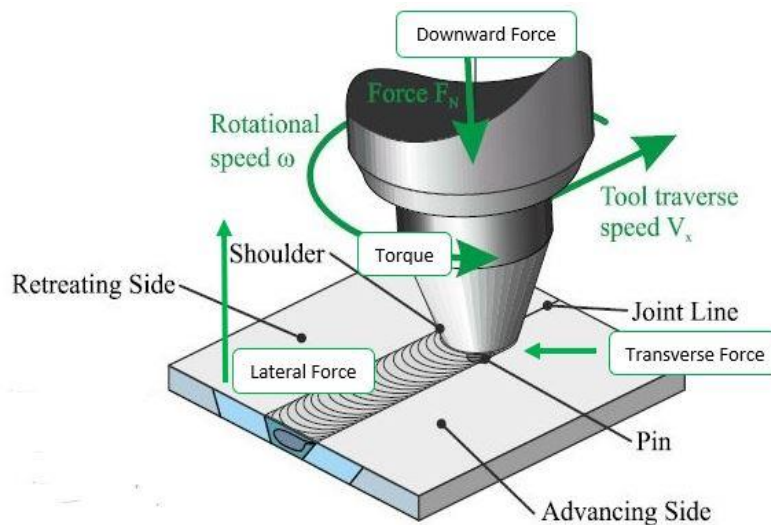
Pada proses FSW seperti pada Gambar 2.4 *tool* yang digunakan adalah *tool* silindris dengan *shoulder* dan memiliki *probe* yang berulir/tidak berulir. *Tool* ini diputar dengan rpm konstan dan melaju dengan kecepatan translasi yang konstan sepanjang *joint line* diantara dua benda kerja yang akan dilas (ASM International, 2007). Part yang akan dilas harus dicekam dengan baik dan ditempatkan diatas *backing* plat sehingga beban yang diberikan pada *tool* dan diteruskan ke benda kerja tidak menyebabkan bagian bawah plat yang dilas terdeformasi. Panas yang terjadi membuat material yang ada di sekitar pin menjadi melunak dan akibat adanya gerak rotasi dan translasi dari *tool* menyebabkan material yang ada di depan pin bergerak ke belakang pin dan ini terjadi terus menerus selama gerak translasi berlangsung dan menghasilkan sambungan yang diinginkan.

### 2.2.3 Gaya Pada *Friction Stir Welding*

Pada metode *friction stir welding* terdapat berbagai macam gaya yang berkerja selama proses pengelasan, diantaranya:

1. *Downward force*, merupakan gaya yang diberikan mesin kepada *tool* yang diteruskan ke benda kerja dan berfungsi untuk menjaga kontak antara *friction tool* dengan benda kerja sehingga tingkat penetrasi dan panas yang dihasilkan tetap terjaga selama proses berlangsung.
2. *Traverse force*, adalah gaya yang searah dengan pergerakan *tool*. Peningkatan gaya transversal diakibatkan dari resistensi material terhadap pergerakan *tool*. *Traverse force* akan menurun ketika terjadi peningkatan temperatur dalam benda kerja.
3. *Lateral force*, adalah gaya yang timbul dari *downward force* yang diakibatkan penetrasi *tool* pada benda kerja.
4. Torsi, merupakan gaya yang berasal dari putaran *tool* dan resistensi benda kerja terhadap putaran tersebut saat proses pengelasan berlangsung (ASM International,

2007). Seperti pada Gambar 2.5 merupakan gaya yang terdapat pada *friction stir welding*.



Gambar 2.5 Gaya pada *friction stir welding*  
Sumber: ASM International (2007)

#### 2.2.4 Kelebihan *Friction Stir Welding*

Dalam metode *friction stir welding* terdapat banyak kelebihan dari pada metode pengelasan lainnya, menurut Bharat Raj Singh (2014) keuntungan dari *friction stir welding* ialah:

1. Sifat mekanik yang lebih baik dari pada proses *fusion welding*
2. Tanpa terjadi pelelehan selama pengelasan
3. Dapat menurunkan biaya, dan mengurangi persediaan komponen
4. Dampak lingkungan yang rendah (tidak ada asap)
5. Distorsi panas rendah
6. Tidak memerlukan bahan pengisi
7. *Friction tool* dapat digunakan berulang-ulang
8. Energi yang dibutuhkan saat pengelasan lebih rendah dari pada proses *fusion welding*

#### 2.2.5 Aplikasi *Friction Stir Welding*

Menurut Prasetyana (2016) FSW sudah banyak diaplikasikan dalam dunia industri, biasanya diaplikasikan untuk menyambungkan material aluminium dan paduannya. Di negara maju telah mengaplikasikan pengelasan FSW ini pada industri pembuatan kapal, kereta api, pesawat terbang, pesawat luar angkasa, bahkan di dunia otomotif pun sudah mengaplikasikan metode pengelasan ini. Seperti pada Gambar 2.6.



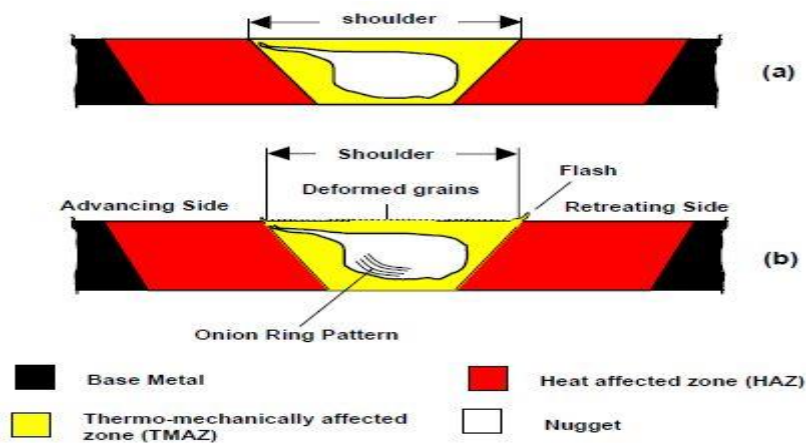
Gambar 2.6 Aplikasi *friction stir welding* pada industri otomotif  
Sumber: Honda Manufacturing (2012)

### 2.2.6 Daerah Hasil Pengelasan

Daerah hasil pengelasan merupakan daerah yang terpengaruhi oleh panas yang menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik pada material. Daerah hasil pengelasan dibagi 4 bagian, yaitu:

1. *HAZ (Heat Affected Zone)*, yaitu daerah yang mengalami siklus termal tetapi tidak mengalami deformasi plastis dan perubahan sifat mekanik dan pada daerah ini terjadi perubahan struktur mikro.
2. *TMAZ (Thermomechanically affected zone)* adalah daerah transisi antara logam induk dan daerah las yang mengalami deformasi plastis tetapi tidak terjadi rekristalisasi.
3. *Base Metal* merupakan daerah utama dari material yang tidak mengalami perubahan apapun akibat panas yang timbul dari proses pengelasan.
4. *Weld Nugget* merupakan area yang mengalami pelunakan dan membentuk ikatan metalurgi pengelasan yang disebabkan gesekan dan adukan *tool* (ASM International, 2007). Daerah hasil pengelasan dapat dilihat pada Gambar 2.7.



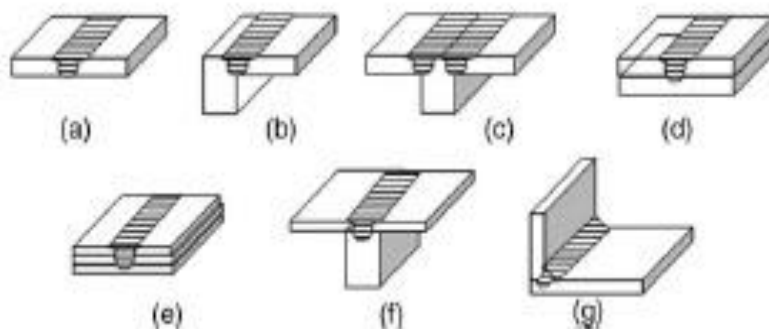


Gambar 2.7 Daerah hasil pengelasan *friction stir welding*  
 Sumber: Terry, K. (2005)

### 2.2.7 Jenis-Jenis Sambungan *Friction Stir Welding*

Pada *friction stir welding* terdapat berbagai variasi sambungan yang disesuaikan dengan perkembangan zaman seperti pada Gambar 2.8. Beberapa variasi sambungan FSW antara lain:

1. Sambungan tumpul (*square joint*)
2. Sambungan sisi tumpul (*edge butt*)
3. *T-butt joint*
4. Sambungan tumpang (*lap joint*)
5. Sambungan tumpang bertumpuk (*multiple lap joint*)
6. Sambungan tumpang berbentuk T (*T-lap joint*)
7. Sambungan fillet (*fillet joint*)



Gambar 2.8 Jenis sambungan *friction stir welding*  
 Sumber: Mirsha (2005:3)

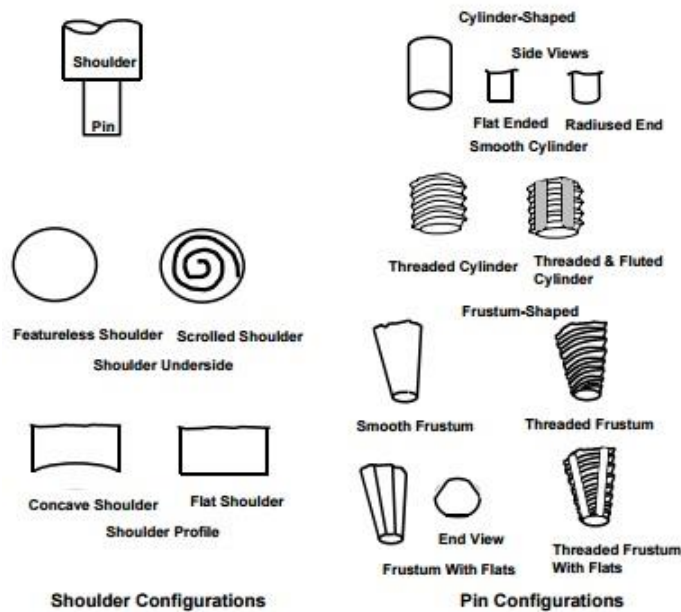
### 2.2.8 Tools Pada *Friction Stir Welding*

*Friction tool* pada proses FSW memiliki 2 bagian utama yaitu pin dan *shoulder*. *Shoulder* merupakan bagian yang menghasilkan panas dengan gesekan yang dilakukan

terhadap benda kerja, bagian ini juga menjadi penahan material panas yang ada dibawahnya. Disamping itu bagian ini pin yang memberikan gaya vertikal ke arah benda kerja yang menjaga kondisi *contact tool* dengan benda kerja. Sedangkan pin adalah bagian yang melakukan penetrasi ke dalam benda kerja, dimana bagian *tool* ini adalah bagian yang mengaduk material atau mengalirkan material yang sudah melunak akibat panas yang dihasilkan *shoulder*, sehingga menciptakan suatu sambungan antara dua material (Reza, 2011). FSW pada mulanya menggunakan satu silinder utuh dengan *probe* berbentuk silinder sederhana. Pada *probe* berbentuk sederhana hanya dapat menghasilkan *flow* material dan pencampuran yang terbatas, akibatnya kecepatan pengelasan yang dihasilkan menjadi rendah (Terry, 2005:13). TWI merupakan lembaga yang mengembangkan perancangan tool pada FSW, *probe* dengan berulir berhasil dibuat untuk menghasilkan deformasi plastis yang terjadi pada benda kerja sehingga dapat memungkinkan pencampuran material dilakukan pada putaran lebih tinggi sehingga menghasilkan kualitas lasan yang lebih optimal karena mampu mereduksi kekosongan sambungan (K.J. Colligan, 2003:34).

Pada saat pengelasan gesekan antara *tool* dan benda kerja menghasilkan panas sekitar 80-90% dari temperatur titik lebur benda kerja yang akan dilas. Material *tool* harus memiliki titik cair yang lebih tinggi dari benda kerja agar saat pengelasan berlangsung material *tool* tidak ikut tercampur dengan lasan (Efendi, 2016). Bentuk pin mulai menjadi lebih kompleks dengan meningkatnya teknologi saat ini seperti *Threaded pin*, *Fluted pin* dan *frustum pin* dengan bagian bawah rata ditemukan dengan maksud untuk mempercepat *travel speed*, menyempurnakan pengadukan material lalu memperbaiki kualitas pengelasan. *Scroll shoulder* dan *concave shoulder* dibuat untuk mengurangi efek *undercutting* dan *flash* pada sambungan yang ditimbulkan oleh bagian bawah *tool shoulder* (Thomas, 1999).

Desain *tool* yang menjadi lebih kompleks juga diiringi dengan berkembangnya material *tool* dari metode *friction stir welding* harus memiliki kriteria berupa temperatur lebur (*melting point*) yang tinggi, *physical* dan *chemical wear resist* dan efektif melepaskan panas saat pengelasan. FSW saat ini terdapat beberapa *tool* yang digunakan seperti *polycrystalline cubic boron nitride* (PCBN), AISI 316 dan AISI310 *stainless steel* dan *alloy 600* dari *nickel alloy* (Mishra, 2007). Macam-macam *friction tool* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Konfigurasi *tool friction stir welding*  
Sumber: Terry, K. (2005:14)

### 2.2.9 Heat input

Menurut Misrha (2005) penelitian terbaru menunjukkan bahwa panas terbesar dihasilkan dari gesekan permukaan antara *shoulder* dan benda kerja, sedangkan antara pin dan benda kerja tidak menghasilkan panas secara signifikan. Menurut N. Rajamanickam (2016) persamaan *heat input* juga dipengaruhi oleh koefisien gesek, gaya tekan, diameter pin dan *shoulder* serta *rotational speed* sebagai berikut.

$$Q = \frac{1}{2} \mu F_N (R_i + R_o) \omega \quad (2-1)$$

Dengan:

$Q$  = Kalor yang dihasilkan (J/mm)

$\mu$  = Koefisien gesek (Aluminium dan Baja = 0,47)

Sumber: M. Ihsan (2008)

$F_N$  = Gaya Tekan (N)

$R_i$  = Diameter pin (mm)

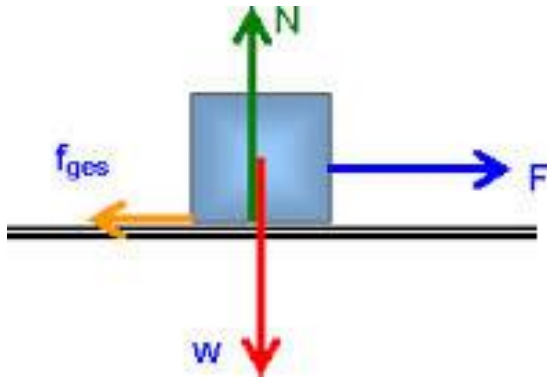
$R_o$  = Diameter *shoulder* (mm)

$\omega$  = *Rotational speed* (rpm)

### 2.2.10 Friction Force pada Benda Kerja

*Friction* atau gesekan merupakan bertemunya 2 benda dan saling bersinggungan antara satu dengan lainnya sedangkan gaya gesek (*friction force*) merupakan gaya yang bekerja didalamnya. *Friction* adalah gesekan diantara permukaan yang saling kontak dan

bergerak relatif. Koefisien gesek adalah area kontak antara dua permukaan dengan sifat dan kekuatan yang saling memengaruhi. Prinsip gaya gesek seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Prinsip gaya gesek  
Sumber: Halliday dan Resnick (1984)

Menurut hukum kekekalan energi, kalor merupakan energi yang berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Energi listrik dapat berubah menjadi energi kalor dan juga sebaliknya. Pada FSW panas yang dihasilkan dari gesekan antara *tool* dengan benda kerja. Menurut perumusan matematisnya ialah:

$$\Delta E = 0, \text{ maka } Q = W \quad (2-2)$$

Untuk menghitung energi yang digunakan dapat dihitung dengan rumus:

$$W = F \cdot s \quad (2-3)$$

dengan:

$Q$  = Kalor (J)

$W$  = Energi (J)

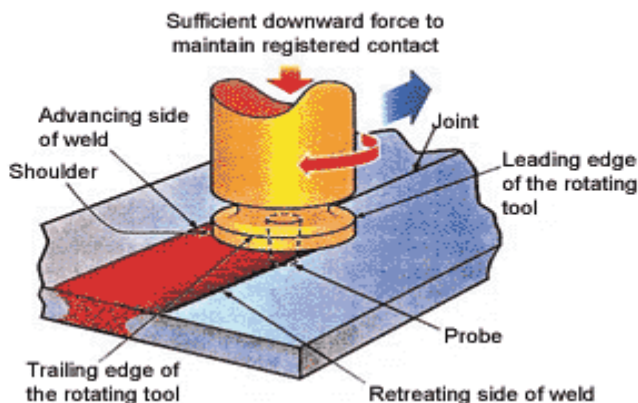
$F$  = Gaya (N)

$s$  = Jarak (m)

Sehingga energi yang diterima saat pengelasan besarnya sama dengan lamanya waktu pengelasan sehingga berpengaruh terhadap kalor yang dihasilkan begitu pula sebaliknya.

### 2.2.11 Downward Force pada FSW

Pada proses FSW mengatur gaya yang bekerja pada proses pengelasan dapat menghasilkan pengelasan yang optimal. Ada 3 gaya yang bekerja saat proses pengelasan FSW berlangsung diantaranya *downward force*, *traverse force*, dan *lateral force*. Gaya tekan pada FSW menghasilkan gaya penekanan pada *friction tool*. Penekanan tersebut dapat menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus sehingga kekuatan sambungan meningkat (Longhurst, 2009).



Gambar 2.11 Downward force

Sumber: Longhurst (2009)

Pada Gambar 2.11 merupakan prinsip *downward force*. Untuk memberikan variasi *downward force* pada prosesnya menggunakan alat bantu seperti *starin gauge*, *load cell*, dan *dynamometers* yang diletakkan pada mesin FSW (Shahi, P. et al. 2014). Namun pada penelitian kali ini akan menggunakan pegas atau *spring* untuk mengatur gaya tekan yang diberikan. Dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$F = k \cdot \Delta x \quad (2-4)$$

Dengan:

F = Gaya yang dilakukan pegas (N)

k = Konstanta pegas (Nm)

$\Delta x$  = Perubahan panjang pegas (m)

Gaya tekan juga berpengaruh terhadap parameter proses *friction stir welding*, seperti kecepatan pengelasan, kecepatan rotasi, diameter *friction tool*.

Gaya tekan meningkat seiring meningkatnya kecepatan pengelasan. Namun pengaruh kecepatan pengelasan sangat rendah dibandingkan dengan pengaruh *rotational speed*, dikarenakan keduanya tidak berhubungan secara langsung. Meningkatnya kecepatan rotasi *tool* menghasilkan temperatur yang lebih tinggi pada permukaan kontak antara *friction tool* dan benda kerja, sehingga material menjadi lebih lunak dan menurunkan *downward force* (Longhurst, 2009).

Dalam *friction stir welding* gaya tekan memiliki peranan penting untuk menentukan kualitas lasan, seperti adanya cacat pengelasan yang dihasilkan dan dapat meningkatkan kekuatan sambungan las. Besarnya gaya tekan pada *friction stir welding* menghasilkan penekanan *friction tool* pada benda kerja yang membuat logam induk mengalami deformasi plastis yang dapat menentukan kekuatan sambungan.

### 2.2.12 Siklus Proses FSW

Siklus pada proses *friction stir welding* dapat dibagi dalam beberapa bagian, dimana pada setiap bagian mempunyai aliran panas dan *thermal profile* yang berbeda. Menurut Frigaard et al. (2001) ada beberapa siklus proses FSW, diantaranya:

1. *Dwell Time*, pada awalnya proses pemanasan dilakukan pada benda kerja dengan *friction tool* berputar tanpa bergerak translasi (*stationery*). Pada langkah ini material yang ada di bawah *friction tool* dipanaskan hingga melunak dan *tool* akan bergerak translasi sepanjang *joint line*. Biasanya pada langkah ini juga proses pin/*probe* penetrasi ke benda kerja dimulai.
2. *Transient Heat*, proses ini terjadi saat *friction tool* mulai bergerak translasi biasanya pada saat pemanasan sementara dimana pada saat ini panas yang dihasilkan dan suhu pada sekitar *friction tool* menjadi tidak stabil lalu bergerak hingga menjadi *steady – state* pada saat *friction tool* mulai bergerak.
3. *Pseudo steady–state*, pada proses berlangsung terjadi fluktuasi suhu pada area sekitar *friction tool* tetapi tidak terjadi perubahan secara mikrostruktur.
4. *Post steady–state*, pada saat pengelasan akan berakhir panas benda kerja akan meningkat di sekitar *friction tool*.

### 2.3 Aluminium

Aluminium ialah unsur logam yang paling banyak terkandung dalam perut bumi. Aluminium juga logam paling banyak digunakan setelah baja. Karakteristik utamanya ringan (berat jenis =  $2,7 \text{ gr/cm}^3$ ) dibandingkan dengan baja (berat jenis =  $7,8 \text{ gr/cm}^3$ ), memiliki konduktifitas panas dan listrik yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, serta memiliki keuletan yang cukup tinggi.

Aluminium dapat sendiri dapat dipadukan dengan beberapa logam lainnya seperti Cu, Mg, Si, Mn, Zn, dan Ni yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan memberikan tambahan sifat bagus lainnya. Namun aluminium dan paduannya mempunyai sifat mampu las yang kurang baik bila dibandingkan baja, diantaranya adalah panas jenis dan daya hantar yang tinggi, mudah teroksidasi dan membentuk oksida aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang mempunyai titik cair yang tinggi sehingga menyebabkan peleburan antara logam induk dan logam hasil pengelasan menjadi terhalang dan apabila mengalami proses pembekuan yang terlalu cepat akan terbentuk rongga halus bekas kumpulan hidrogen (Wiryosumarto, 1996).

Seiring berkembangnya zaman aluminium telah dikembangkan secara luas tidak hanya untuk keperluan rumah tangga bahkan dunia industri pun saat ini menggunakan aluminium sebagai materialnya, seperti dalam industri otomotif, kapal laut, pesawat terbang. Aluminium dapat dilihat seperti pada Gambar 2.12 dan pada Tabel 2.1 merupakan sifat fisik dan mekanik aluminium.



Gambar 2.12 Aluminium

Tabel 2.1  
Sifat Fisik Dan Mekanik Aluminium

Sifat – sifat Fisik	Kemurnian Al (%)			
	99,996		>99,0	
Massa Jenis pada temperatur 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	2,6989		2,71	
Titik Cair (°C)	660,2		653 – 657	
Panas Jenis (cal/g. °C) (100 °C)	0,2226		0,2297	
Hantaran Listrik (%)	64,94		59 (dianil)	
Tahanan listrik koefisien temperatur (°C)	0,00429		0,0115	
Koefisien pemuai (20-100°C)	23,86 x 10 <sup>-6</sup>		23,5 x 10 <sup>-6</sup>	
Jenis kristal, konstanta kisi	Fcc, a = 4,013kX		Fcc, a = 4,04 kX	
Sifat – sifat Mekanik	Kemurnian Al (%)			
	99,996		>99,0	
	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan Tarik (kg/mm <sup>2</sup> )	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur (0,2%)(kg/mm <sup>2</sup> )	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	23	5
Kekerasan brienell	17	27	23	44

Sumber: Surdia (1999:134)

### 2.3.1 Klasifikasi Aluminium

Aluminium dapat diklasifikasikan menjadi 3, yakni berdasarkan pembuatannya, berdasarkan perlakuannya dan berdasarkan unsur–unsur paduan. Aluminium berdasarkan unsur paduan dibagi menjadi 7 macam, yaitu:

#### 1. Aluminium murni (seri 1000)

Aluminium seri ini adalah aluminium dengan kemurnian antara 99,0% dan 99,9%. Aluminium seri ini memiliki sifat yang baik dalam ketahanan korosi, konduksi panas

dan konduksi listrik serta mempunyai sifat mampu las dan mampu potong jika dibandingkan seri aluminium lainnya. Kekurangannya ialah kekuatannya rendah.

2. Aluminium paduan Al – Cu (seri 2000)

Pada paduan Al – Cu dapat dilakukan perlakuan panas, dengan pengerasan endap atau penyepuhan sifat mekanik pada paduan ini dapat meyerupai logam lunak, tetapi daya tahan terhadap korosi rendah dibandingkan dengan jenis paduan lainnya, mampu lasnya kurang baik. Dari sifat paduannya, paduan ini biasanya digunakan di industri pesawat terbang seperti duralumin (seri 2017) dan super duralumin (seri 2024).

3. Aluminium paduan Al – Mn (seri 3000)

Jenis paduan ini tidak dapat di perlakuan panaskan sehingga dapat menaikkan kekuatannya, tetapi dapat di perlakuan melalui pengerjaan dingin dalam pembuatannya. Jika dibandingkan dengan aluminium murni paduan ini memiliki sifat yang sama seperti tahan korosi, mampu potong serta mampu lasnya. Dalam hal kekuatan paduan ini lebih unggul dari pada aluminium murni.

4. Aluminium paduan Al – Si (seri 4000)

Paduan ini tidak dapat di perlakuan panaskan. Pada paduan ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik serta dalam proses pembekuan tidak terjadi retak. Paduan jenis Al – Si banyak digunakan untuk bahan las dalam pengelasan paduan cor ataupun aluminium paduan tempa.

5. Aluminium paduan Al – Mg (seri 5000)

Jenis paduan ini juga tidak dapat diperlakukan panaskan, tetapi mempunyai sifat yang baik dalam daya tahan korosi, terutama korosi terhadap air laut, dan mampu lasnya cukup baik. Paduan seri ini banyak diaplikasikan dalam kontruksi, tangki penyimpanan gas alam cair dan oksigen cair.

6. Aluminium paduan Al – Mg – Si (seri 6000)

Pada paduan ini termasuk seri paduan yang dapat diperlakukan panaskan dan mempunyai sifat mampu potong, mampu las serta daya tahan korosi yang cukup. Kekurangan dari dari paduan ini ialah terjadinya pelunakan pada daerah las akibat dari panas yang ditimbulkan.

7. Aluminium paduan Al – Zn (seri 7000)

Paduan seri ini termasuk pada jenis dapat diperlakukan panaskan. Biasanya ke dalam paduan pokok Al – Zn lalu ditambahkan Mg, Cu, dan Cr. Mempunyai kekuatan tarik yang diperoleh pada paduan ini sangat baik. Berlawanan dengan kekuatan tariknya,



sifat mampu las dan daya tahan terhadap korosi kurang baik. Paduan ini mulai banyak diaplikasikan pada konstruksi las (Wiryo Sumarto, 2008:114).

Pengkodean pada aluminium berdasarkan standar AA (*Aluminium Association*) dengan penggunaan 4 angka, seperti berikut.

Urutan 1	Urutan 2	Urutan 3	Urutan 4	Urutan 5
AA	1	1	0	0

Dengan:

Urutan 1: Huruf AA merupakan singkatan dari *Aluminium Association*.

Urutan 2: Jenis aluminium paduan.

Urutan 3: Angka 0, menunjukkan paduan dasar sedangkan 1-9, menunjukkan perbaikan paduan.

Urutan 4 dan 5: Menunjukkan presentase kadar kemurnian aluminium paduan.

### 2.3.2 Sifat Mekanik Aluminium

Aluminium mempunyai beberapa sifat mekanik diantaranya:

#### 1. Ringan

Aluminium termasuk pada jenis logam yang mempunyai berat jenis yang ringan dengan densitas  $2,7 \text{ gr/cm}^3$ , sehingga aluminium banyak diaplikasikan dalam pembuatan alat atau benda yang membutuhkan berat yang ringan dengan kekuatan yang baik.

#### 2. Tahan korosi

Karena permukaan aluminium memiliki lapisan oksida yang kuat. Lapisan ini yang melindungi logam aluminium terhadap udara sehingga kuat untuk menahan terjadinya korosi.

#### 3. Mampu bentuk

Pada aluminium dapat mampu bentuk serta mampu mesin yang baik, hal ini dapat mempermudah pemakaian aluminium menjadi aplikatif untuk segala komponen mesin.

#### 4. Mampu daur ulang

Aluminium juga dapat di proses ulang, dengan memiliki sifat mampu daur ulang tersebut dapat mengurangi biaya produksi, khususnya ketika proses peleburan hal ini disebabkan aluminium tidak membutuhkan energi yang terlalu besar saat melakukan peleburan ulang.

#### 5. Penghantar listrik yang baik

Aluminium memiliki daya hantar listrik yang baik dengan kemampuan 65% lebih baik dari tembaga.

### 2.3.3 Aluminium Paduan

Dengan adanya paduan pada aluminium dapat meningkatkan sifat mekanik, seperti dengan penambahan paduan Cu, Mg, Si, Mn, Zn, dan Ni. Menurut Wiryosumarto (2008) paduan aluminium secara garis besar diklasifikasikan menjadi dua kategori, diantaranya:

1. Berdasarkan mampu diperlakukan panaskan atau tidak dapat diperlakukan panas di kelompokkan menjadi 2, yaitu:
  - a. Paduan yang dapat diberi perlakuan panas (*heat treatable alloy*) yaitu pada paduan ini mampu meningkatkan kekuatannya dengan cara mengerasan atau penemperan.
  - b. Paduan yang tidak dapat diberi perlakuan panas (*non heat treatable alloy*) yaitu paduan ini dapat ditingkatkan kekuatannya dengan pengerjaan dingin.
2. Berdasarkan cara pengolahan produk yang dihasilkan ada dua macam, diantaranya
  - a. Paduan dengan hasil pengerjaan logam (*Wrought alloy*) yaitu suatu paduan yang dihasilkan oleh proses *forming* untuk menghasikan bentuk yang sesuai, seperti plat, pejal dan kawat.
  - b. Paduan dengan aluminium cor (*Casting alloy*) yaitu paduan yang dikerjakan melalui pengerjaan pengecoran lalu dituang ke cetakan dengan bentuk yang sesuai keinginan dan kemudian di *finishing*.

### 2.3.4 Paduan Aluminium 6061

Jenis paduan aluminium 6061 merupakan paduan antara Al – Mg – Si dimana pada paduan ini dapat diberi perlakuan panas (*heat treatable alloys*) dan memiliki sifat mampu potong, mampu las (*weldability*) yang baik, mampu bentuk yang bagus pada proses ekstruksi, mempunyai daya tahan korosi yang baik serta memiliki kekuatan tarik yang tinggi (*strength to weight ratio*). Pada umumnya jenis paduan ini banyak diaplikasikan untuk komponen otomotif (Surdia, 1999:140).

Untuk komposisi kimia aluminium 6061 dapat dilihat pada Tabel 2.2, lalu untuk karakteristik aluminium 6061 pada Tabel 2.3 sedangkan sifat mekanik aluminium 6061 terdapat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.2  
Komposisi Kimia Aluminium 6061

Unsur Paduan	Nilai
Al	90,8 – 98,6%
Mg	0,05 – 1,5%
Si	0,20 – 1,8%
Fe	Max – 0,70%
Zn	Max – 0,25%
Cu	Max – 0,40%
Cr	Max – 0,35%
Ti	Max - 0,15%
Mn	Max - 0,15%
Kandungan Lainnya	Max – 15%

Sumber: ASM Metal Handbook Volume 9 (2004)

Tabel 2.3  
Karakteristik Aluminium 6061

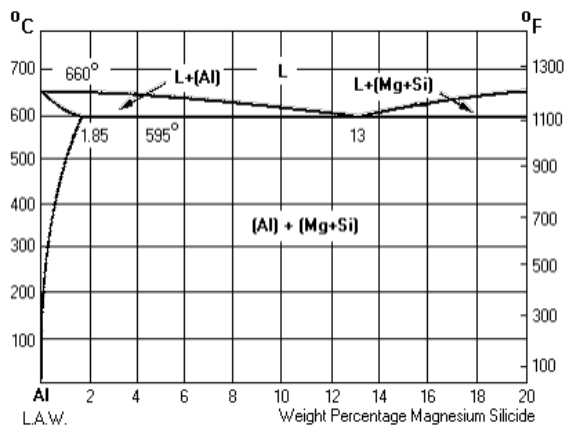
Sifat	Nilai
Density	2,70 g/cm <sup>2</sup>
Melting point	660 °C
Thermal expansion	23,4 x 10 <sup>-6</sup> / K
Modulus of elasticity	70 Gpa
Thermal Conduction	166 W/m.K
Electrical Resistivity	0,040 x 106
Tensile Strength	12,6 Kgf/mm

Sumber: ASM Aerospace Spesification Metal Inc

Tabel 2.4  
Sifat Mekanik Aluminium 6061

Sifat Mekanik	Nilai
Kekuatan tarik (Kgf/mm <sup>2</sup> )	12,6
Kekuatan mulur (Kgf/mm <sup>2</sup> )	5,6
Pertambahan panjang (%)	30
Kekuatan geser (Kgf/mm <sup>2</sup> )	8,4
Kekerasan Breinell (BHN)	30
Batas lelah (Kgf/mm <sup>2</sup> )	6,3

Sumber: Surdia (1999:140)



Gambar 2.13 Diagram fasa Al – Mg – Si

Sumber: Wijayanto (2010)

### 2.3.5 Sifat Mampu Las Aluminium

Aluminium pada dasarnya memiliki sifat yang kurang baik pada proses pengelasan jika dibandingkan dengan baja. Sifat aluminium yang kurang baik diantaranya:

1. Aluminium mempunyai sifat daya hantar terhadap panas yang tinggi yang menyebabkan aluminium sulit untuk dipanaskan.
2. Mudahnya teroksidasi pada aluminium akan membentuk oksida aluminium  $Al_2O_3$  yang memiliki titik cair tinggi. Hal ini menyebabkan peleburan antara logam dasar dan logam lasan menjadi terhalang.
3. Memiliki nilai koefisien muai yang tinggi menyebabkan aluminium mudah sekali terdeformasi sehingga menimbulkan retakan.
4. Pada aluminium paduan memiliki berat jenis yang rendah, sehingga menyebabkan terbentuknya zat lain yang tidak diinginkan.
5. Memiliki titik lebur dan viskositas yang rendah sehingga menyebabkan daerah las menjadi mudah mencair jika terkena panas.

Seiring berkembangnya teknologi dalam bidang pengelasan sifat yang kurang baik tersebut dapat diatasi dengan metode pengelasan yang lebih baik misalnya metode pengelasan *friction stir welding* dan banyak lagi metode pengelasan yang lainnya (Wiryosumarto, 1998:115).

### 2.4 Pengujian Kekuatan Tarik

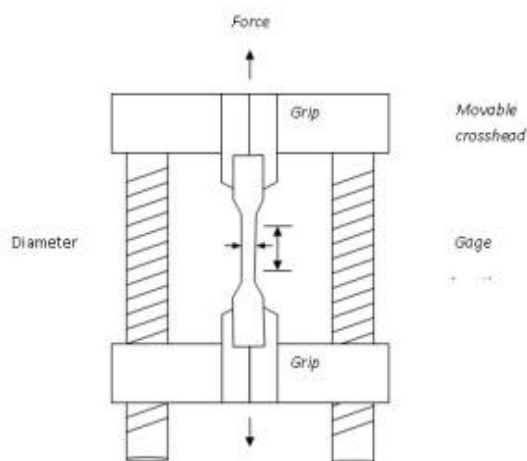
Suatu logam mempunyai sifat-sifat tertentu yang dibedakan atas sifat fisik, mekanik, *thermal*, dan korosif. Salah satu yang penting dari sifat tersebut adalah sifat mekanik. Sifat mekanik terdiri dari keuletan, kekerasan, kekuatan, dan ketangguhan. Sifat mekanik merupakan salah satu acuan untuk melakukan proses selanjutnya terhadap suatu material, contohnya untuk dibentuk dan dilakukan proses permesinan. Untuk mengetahui sifat mekanik pada suatu logam harus dilakukan pengujian terhadap logam tersebut. Salah satu pengujian yang dilakukan adalah pengujian tarik.

Dalam pembuatan suatu konstruksi diperlukan material dengan spesifikasi dan sifat-sifat yang khusus pada setiap bagiannya. Sebagai contoh dalam pembuatan konstruksi sebuah jembatan. Diperlukan material yang kuat untuk menerima beban di atasnya. Material juga harus elastis agar pada saat terjadi pembebanan standar atau berlebih tidak patah. Salah satu contoh material yang sekarang banyak digunakan pada konstruksi bangunan adalah logam.

Meskipun dalam proses pembuatannya telah diprediksikan sifat mekanik dari logam tersebut, kita perlu benar-benar mengetahui nilai mutlak dan akurat dari sifat mekanik logam tersebut. Oleh karena itu, sekarang ini banyak dilakukan pengujian-pengujian terhadap sampel dari material.

#### 2.4.1 Mekanisme Pengujian Kekuatan Tarik

Uji tarik adalah suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu bahan/material dengan cara memberikan beban gaya yang sesumbu (Askeland, 1985). Hasil yang didapatkan dari pengujian tarik sangat penting untuk rekayasa teknik dan desain produk karena menghasilkan data kekuatan material. Pengujian uji tarik digunakan untuk mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara lambat. Untuk lebih jelasnya pada dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Mekanisme uji tarik dilengkapi spesimen ukuran standar  
Sumber: Askeland (1985)

Seperti pada Gambar 2.14 benda yang di uji tarik diberi pembebanan pada kedua arah sumbunya. Pemberian beban pada kedua arah sumbunya diberi beban yang sama besarnya. Pengujian tarik adalah dasar dari pengujian mekanik yang dipergunakan pada material. Dimana spesimen uji yang telah distandarisasi, dilakukan pembebanan sehingga spesimen uji mengalami peregangan dan bertambah panjang hingga akhirnya patah. Pengujian tarik relatif sederhana, murah dan sangat terstandarisasi dibanding pengujian lain. Hal-hal yang perlu diperhatikan agar pengujian menghasilkan nilai yang valid adalah; bentuk dan dimensi spesimen uji, pemilihan grip.

##### 1. Bentuk dan Dimensi Spesimen uji

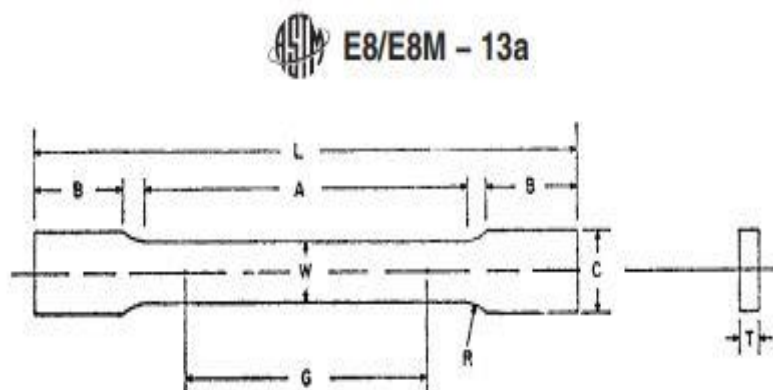
Spesimen uji harus memenuhi standar dan spesifikasi dari ASTM E8. Bentuk dari spesimen penting karena kita harus menghindari terjadinya patah atau retak pada

daerah *grip* atau yang lainnya. Jadi standarisasi dari bentuk spesimen uji dimaksudkan agar retak dan patahan terjadi di daerah *gage length*.

## 2. Grip and Face Selection

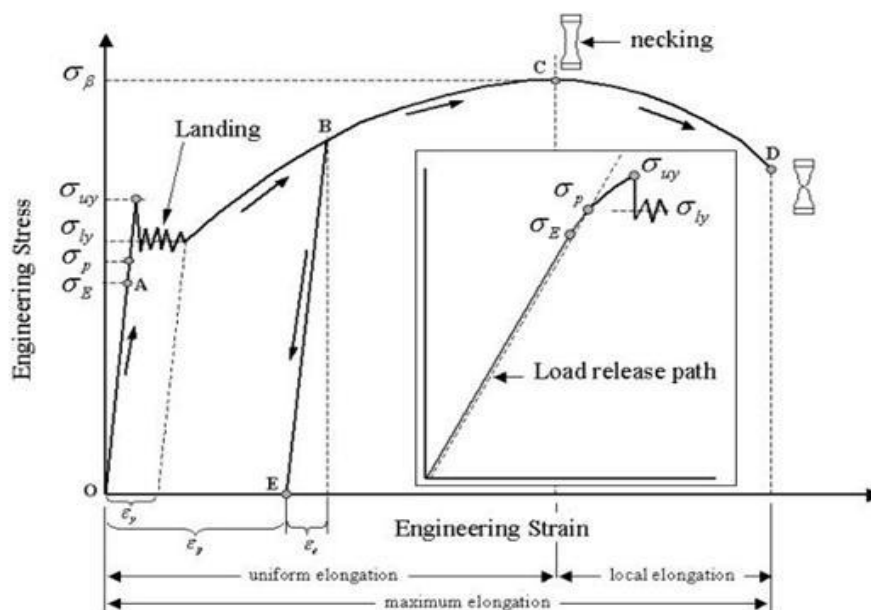
*Face* dan *grip* adalah faktor penting. Dengan pemilihan *setting* yang tidak tepat, spesimen uji akan terjadi slip atau bahkan pecah dalam daerah *grip* (*jaw break*). Ini akan menghasilkan hasil yang tidak valid. *Face* harus selalu tertutupi di seluruh permukaan yang kontak dengan *grip*. Agar spesimen uji tidak bergesekan langsung dengan *face*.

Beban yang diberikan pada bahan yang di uji ditransmisikan pada pegangan bahan yang di uji. Dimensi dan ukuran pada benda uji disesuaikan dengan standar baku pengujian. Seperti pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Standar ASTM E8 pada spesimen untuk uji tarik  
Sumber: ASTM International (2013:4)

Kurva tegangan-regangan teknik dibuat dari hasil pengujian yang didapatkan.



Gambar 2.16 Contoh kurva uji tarik  
Sumber: Hajime Shudo (1983:56)

Pada Gambar 2.16 merupakan kurva uji tarik dapat dijelaskan bahwa batas elastis  $\sigma_E$  (*elastic limit*) dalam gambar diatas dinyatakan dengan titik A. Bila sebuah bahan diberi beban sampai pada titik A, kemudian bebannya dihilangkan, maka bahan tersebut akan kembali ke kondisi semula (tepatnya *hampir kembali ke kondisi semula*) yaitu regangan “nol” pada titik O (lihat dalam Gambar 2.16). Tetapi bila beban ditarik sampai melewati titik A, hukum Hooke tidak lagi berlaku dan terdapat perubahan permanen dari bahan. Terdapat konvensi batas regangan permamen (*permanent strain*) sehingga masih disebut perubahan elastis yaitu kurang dari 0.03%, tetapi sebagian referensi menyebutkan 0.005%. Tidak ada standarisasi yang universal mengenai nilai ini.

Batas proporsional  $\sigma_p$  (*proportional limit*) titik sampai di mana penerapan hukum Hooke masih bisa ditolerir. Tidak ada standarisasi tentang nilai ini. Dalam praktek, biasanya batas proporsional sama dengan batas elastis. Deformasi plastis (*plastic deformation*) yaitu perubahan bentuk yang tidak kembali ke keadaan semula. Pada gambar diatas yaitu bila bahan ditarik sampai melewati batas proporsional dan mencapai daerah *landing*. Tegangan luluh atas  $\sigma_{uy}$  (*upper yield stress*) tegangan maksimum sebelum bahan memasuki fase daerah landing peralihan deformasi elastis ke plastis.

Tegangan luluh bawah  $\sigma_{ly}$  (*lower yield stress*) tegangan rata-rata daerah *landing* sebelum benar-benar memasuki fase deformasi plastis. Bila hanya disebutkan tegangan luluh (*yield stress*), maka yang dimaksud adalah tegangan ini.

Regangan luluh  $\epsilon_y$  (*yield strain*) regangan permanen saat bahan akan memasuki fase deformasi plastis. Regangan elastis  $\epsilon_e$  (*elastic strain*) regangan yang diakibatkan perubahan elastis bahan. Pada saat beban dilepaskan regangan ini akan kembali ke posisi semula. Regangan plastis  $\epsilon_p$  (*plastic strain*) regangan yang diakibatkan perubahan plastis. Pada saat beban dilepaskan regangan ini tetap tinggal sebagai perubahan permanen bahan. Regangan total (*total strain*) merupakan gabungan regangan plastis dan regangan elastis,  $\epsilon_T = \epsilon_e + \epsilon_p$ . Perhatikan beban dengan arah OABE. Pada titik B, regangan yang ada adalah regangan total. Ketika beban dilepaskan, posisi regangan ada pada titik E dan besar regangan yang tinggal (OE) adalah regangan plastis.

Tegangan tarik maksimum TTM (UTS, *ultimate tensile strength*) pada Gambar 2.16 ditunjukkan dengan titik C ( $\sigma_B$ ), merupakan besar tegangan maksimum yang didapatkan dalam uji tarik. Kekuatan patah (*breaking strength*) pada Gambar 2.16 ditunjukkan dengan titik D, merupakan besar tegangan di mana bahan yang diuji putus atau patah. Tegangan luluh pada data tanpa batas jelas antara perubahan elastis dan plastis untuk hasil uji tarik

yang tidak memiliki daerah linier dan landing yang jelas, tegangan luluh biasanya didefinisikan sebagai tegangan yang menghasilkan regangan permanen sebesar 0.2%,

Tegangan yang digunakan pada kurva adalah tegangan membujur rata-rata dari pengujian tarik. Tegangan tarik tersebut diperoleh dengan cara membagi beban yang diberikan dibagi dengan luas awal penampang benda uji. Dituliskan seperti dalam persamaan berikut.

$$\sigma = F / A_0 \quad (2-5)$$

Dengan:

$\sigma$  = Tegangan (kg/mm<sup>2</sup>)

F = Beban yang diberikan (kg)

$A_0$  = Luas penampang awal benda uji (mm<sup>2</sup>)

Regangan yang digunakan untuk kurva tegangan-regangan tarik adalah regangan linier rata-rata. Dituliskan seperti dalam persamaan berikut.

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2-6)$$

Dengan:

e = Regangan

L = Panjang benda uji setelah pengujian (mm)

$L_0$  = Panjang awal benda uji (mm)

Bentuk dan besaran pada kurva tegangan-regangan suatu logam tergantung pada komposisi, perlakuan panas, deformasi plastis, laju regangan, temperatur dan keadaan tegangan yang menentukan selama pengujian. Parameter-parameter yang digunakan untuk menggambarkan kurva tegangan-regangan logam adalah kekuatan tarik, kekuatan luluh atau titik luluh, persen perpanjangan dan pengurangan luas. Dan parameter pertama adalah parameter kekuatan, sedangkan dua yang terakhir menyatakan keuletan bahan (Dieter, 1996).

Bentuk kurva tegangan-regangan pada daerah elastis tegangan berbanding lurus terhadap regangan. Deformasi tidak berubah pada pembebanan, daerah regangan yang tidak menimbulkan deformasi apabila beban dihilangkan disebut daerah elastis. Apabila beban melampaui nilai yang berkaitan dengan kekuatan luluh, benda mengalami deformasi plastis. Deformasi pada daerah ini bersifat permanen, meskipun bebannya dihilangkan. Tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan deformasi plastis akan bertambah besar dengan bertambahnya regangan plastis (Dieter, 1996).



Pada tegangan dan regangan yang dihasilkan, dapat diketahui nilai modulus elastisitas. Persamaannya dituliskan dalam persamaan:

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (2-7)$$

Dengan:

E = Besar modulus elastisitas (kg/mm<sup>2</sup>)

e = Regangan

σ = Tegangan (kg/mm<sup>2</sup>)

Pada mulanya pengerasan regangan lebih besar dari yang dibutuhkan untuk mengimbangi penurunan luas penampang benda uji dan tegangan (sebanding dengan beban F) yang bertambah terus, dengan bertambahnya regangan. Akhirnya dicapai suatu titik di mana pengurangan luas penampang lebih besar dibandingkan pertambahan deformasi beban yang diakibatkan oleh pengerasan regangan. Keadaan ini untuk pertama kalinya dicapai pada suatu titik dalam benda uji yang sedikit lebih lemah dibandingkan dengan keadaan tanpa beban. Seluruh deformasi plastis berikutnya terpusat pada daerah tersebut dan benda uji mulai mengalami penyempitan. Karena penurunan luas penampang lebih cepat daripada pertambahan deformasi akibat pengerasan regangan beban sebenarnya yang diperlukan untuk mengubah bentuk benda uji akan berkurang dan demikian juga tegangan akan berkurang hingga terjadi patah (Dieter, 1996).

## 2.5 Hipotesis

Dari uraian tinjauan pustaka diatas dapat kita lakukan penelitian lebih lanjut mengenai *friction stir welding*. Dengan perbedaan variasi yakni pengaruh gaya tekan. Semakin besar gaya tekan akan menimbulkan gaya gesek yang semakin besar, dengan semakin besarnya gaya gesek akan menghasilkan panas yang besar pula yang membuat *base metal* mengalami pelunakan yang menyebabkan terjadinya rekristalisasi pada daerah *weld nugget* sehingga penyambungan material menjadi kuat dengan nilai kekuatan tarik yang besar pula.

Halaman ini sengaja dikosongkan