

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Taban, dkk pada tahun 2010 melakukan penelitian karakteristik mikrostruktur hasil pengelasan gesek pada aluminium 6061-T6 dan baja AISI 1018. Pada penelitian ini didapat *upset pressure* terbaik di 60 MPa dengan nilai kekuatan tarik sebesar 250 MPa. Dari hasil tersebut disimpulkan bahwa semakin besar tekanan tempanya maka kekuatan tariknya juga semakin besar.

Sedangkan pada tahun yang sama, Seli, dkk melakukan penelitian pengelasan gesek pada baja ringan dan aluminium. Pada penelitian tersebut didapat nilai kekuatan tarik sebesar 45 MPa dan nilai kekerasannya sebesar 125 KHN, nilai tersebut lebih kecil daripada logam induknya. Hal tersebut dapat diakibatkan oleh *thermal effect* yang terjadi pada daerah las.

Lalu Ashfaq, dkk pada tahun 2012 melakukan penelitian pengelasan gesek pada *stainless steel* dan aluminium paduan dengan berbagai desain bentuk permukaan. Pada penelitiannya disimpulkan bahwa kekuatan sambungan tertinggi dihasilkan dengan sistem ET (*External Taper*) dengan sudut sebesar 15°. Hasil ini didapat karena jalur aliran yang efisien dari aluminium paduan pada sistem ini lebih baik dalam membantu menghilangkan kotoran dan fase intermetalik yang terbentuk sehingga menghasilkan ikatan yang baik.

Sedangkan pada tahun 2016, Irawan, dkk melakukan penelitian tentang kekuatan puntir hasil pengelasan gesek aluminium A6061 dengan menggunakan geometri kerucut satu sisi. Pada penelitian ini menyatakan bahwa geometri kerucut satu sisi mempengaruhi kekuatan puntir sambungan las gesek dengan kekuatan puntir terbesar pada spesimen dengan perbandingan $d1/d2$ sebesar 0,2. Hal ini diakibatkan daerah Zpl yang terbentuk besar dan nilai porositas yang kecil pada sambungan las gesek.

2.2 Aluminium

Aluminium merupakan logam terbanyak yang terkandung di dalam bumi. Aluminium juga memiliki beberapa keunggulan yaitu termasuk logam ringan yang mempunyai kekuatan tinggi, tahan terhadap korosi, dan merupakan konduktor listrik yang baik (Wirjosumarto,2000). Aluminium juga merupakan logam yang paling banyak digunakan

setelah baja dengan karakteristik utamanya adalah ringan (berat jenis = $2,7\text{gr/cm}^3$) dibandingkan dengan baja (berat jenis = $7,8\text{ gr/cm}^3$), serta memiliki keuletan yang cukup tinggi. Karena sifat-sifat tersebut aluminium banyak digunakan dalam dunia manufaktur.

2.2.1 Sifat - Sifat Aluminium

Aluminium memiliki beberapa sifat baik sifat fisik maupun sifat mekanik. Sifat-sifat tersebut juga menggambarkan karakteristik dari aluminium itu sendiri. Berikut ini adalah tabel yang menjelaskan sifat fisik dan mekanik aluminium :

Tabel 2.1 Sifat Fisik Aluminium

Sifat – Sifat	Kemurnian Al %	
	99,996	>99,0
Massa Jenis (gr/cm^3) (20°C)	2,6989	2,71
Titik Cair ($^\circ\text{C}$)	660,2	653 - 657
Panas Jenis ($\text{cal/g.}^\circ\text{C}$) (100°C)	0,2226	0,2297
Hantaran Listrik (%)	64,94	59 (dianil)
Koefisien Tahanan Listrik ($^\circ\text{C}$)	0,00429	0,0115
Koefisien Pemuaian ($20 - 100^\circ\text{C}$)	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$

Sumber : Surdia (1995)

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Aluminium

Sifat – Sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		> 99,0	
	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan Tarik (kg/mm^2)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan Mulur (0,2%) (kg/mm^2)	1,3	11,0	3,5	14,8
Regangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44

Sumber : Surdia (1995)

2.2.2 Klasifikasi Paduan Aluminium

Umumnya aluminium paduan dapat diklasifikasikan menjadi tiga yakni berdasarkan pembuatannya, berdasarkan perlakuannya, dan berdasarkan unsur-unsur paduan. Dari ketiga kriteria tersebut dapat membagi aluminium menjadi tujuh macam yaitu :

1 Aluminium Murni (Seri 1000)

Aluminium murni memiliki kadar 90%-99,9%. Aluminium murni memiliki kelebihan antara lain sifat tahan korosi, daya hantar panas yang bagus, daya hantar listrik yang bagus. Sedangkan untuk kekurangannya, aluminium murni memiliki kekuatan yang rendah.

2 Paduan Aluminium dan Tembaga (seri 2000)

Aluminium paduan ini sudah mengalami perlakuan panas. Pemberian perlakuan panas tersebut membuat sifat mekanik dari aluminium paduan ini lebih baik hingga dapat menyamai karakteristik dari baja lunak. Tapi memiliki kekurangan berupa sifat tahan korosi yang rendah dibanding dengan aluminium paduan yang lain, selain itu sifat mampu lasnya juga kurang baik. Biasanya aluminium ini digunakan untuk konstruksi paku keling.

3 Paduan Aluminium dan Mangan (seri 3000)

Aluminium paduan ini memiliki sifat yang hampir mirip dengan aluminium murni dalam hal mampu potong, ketahanan terhadap korosi, dan mampu lasnya. Namun, aluminium paduan ini tidak dapat diberi perlakuan panas untuk meningkatkan nilai kekerasannya.

4 Paduan Aluminium dan Silikon (seri 4000)

Alumunium paduan jenis ini termasuk jenis paduan yang tidak dapat diberikan perlakuan panas. Paduan jenis ini memiliki sifat mampu alir yang baik pada fase cairnya dan dalam proses pembekuannya hampir tidak terjadi retak.

5 Paduan Aluminium dan Magnesium (seri 5000)

Aluminium paduan ini juga termasuk dalam jenis paduan yang tidak dapat diberi perlakuan panas seperti paduan aluminium tembaga dan aluminium silikon. Tetapi paduan ini mempunyai kelebihan yaitu sifat daya tahan terhadap korosi sangat baik terutama terhadap air laut.

6 Paduan Aluminium, Magnesium dan Silikon (seri 6000)

Paduan AL-Mg-Si ini merupakan paduan yang dapat diberikan perlakuan panas untuk menambah kekuatannya. Aluminium ini mempunyai beberapa kelebihan berupa sifat mampu potong, mampu las dan daya tahan terhadap korosi yang cukup baik. Namun, kekurangan dari paduan ini adalah ketika dilakukan proses pengelasan, pada daerah sekitar hasil lasan akan mengalami pelunakan.

7 Paduan Aluminium dan Seng (seri 7000)

Paduan ini merupakan jenis paduan yang bisa diberi perlakuan panas. Kelebihan paduan ini adalah memiliki kekuatan yang baik, seperti kekuatan tarik yang didapat mencapai lebih dari 50 kg/mm². Sehingga paduan ini juga dinamakan ultra duralumin. Tapi paduan ini juga memiliki kekurangan berupa sifat mampu las dan daya tahan terhadap korosi dari paduan ini kurang baik (Wirjosumarto, 2000).

Penjelasan singkat mengenai klasifikasi aluminium paduan berdasarkan elemen utama, ketahanan korosi, kekuatan dan perlakuan panas yang diberikan akan ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 2.3 Klasifikasi Paduan Aluminium

No. Seri	Elemen Paduan	Utama	Ketahan Korosi	Kekuatan	Perlakuan Panas
1xxx	Tidak ada		Baik Sekali	Sedang	Tidak Mampu
2xxx	Tembaga		Sedang	Baik Sekali	Mampu
3xxx	Mangan		Baik	-	Tidak Mampu
4xxx	Silikon		-	-	Tergantung Paduan
5xxx	Magnesium		Baik	Baik	Tidak Mampu
6xxx	Magnesium dan Silikon		Baik	Baik	Mampu
7xxx	Seng		Sedang	Baik Sekali	Mampu

Sumber : Kissel (2002)

2.2.3 Aluminium A6061

Aluminium A6061 termasuk dalam aluminium paduan seri 6000 yang merupakan paduan aluminium, magnesium dan silikon. Tambahkan unsur paduan magnesium dan silikon tersebut yang membuat aluminium A6061 bisa digunakan dalam proses pengelasan. Selain itu, aluminium paduan ini memiliki sifat umum berupa dapat diberikan perlakuan panas, memiliki sifat mampu potong yang baik dan daya tahan terhadap korosi yang baik. Namun, kekurangan dari paduan ini adalah ketika dilakukan proses pengelasan, pada daerah sekitar hasil lasan akan mengalami pelunakan (Wirjosumarto, 2000).

Berikut adalah tabel yang menunjukkan persentase komposisi kimia berdasarkan berat aluminium A6061 :

Tabel 2.4 Persentase Komposisi Kimia Berdasarkan Berat Aluminium A6061

<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>	<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>	<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>
Al	95,8-98,6	Mg	0,8-1,2	Si	0,4-0,8
Cr	0,04-0,35	Mn	Max 0,15	Ti	Max 0,15
Cu	0,15-0,4	<i>Other, each</i>	Max 0,05	Zn	Max 0,25
Fe	0,7	<i>Other, total</i>	Max 0,15		

Sumber : Kissel (2002)

2.3 Baja

Baja adalah logam paduan yang terdiri dari unsur utama besi dan karbon serta tambahan unsur-unsur lainnya dengan kadar karbon tidak lebih dari 2% (Rusmardi, 2006). Unsur karbon tersebut memberikan sifat keras pada baja dengan tingkat kekerasannya tergantung pada kadar karbonnya. Sehingga penggunaan baja pada aplikasinya di bidang teknik bisa beragam sesuai tingkat kekerasan baja yang dibutuhkan.

Selain memiliki kekerasan yang baik, baja juga memiliki kelebihan yang membuat baja cocok digunakan sebagai bahan utama produk manufaktur yaitu memiliki kekuatan yang sangat tinggi, tahan lama dan memiliki kekakuan yang tinggi. Biasanya baja digunakan pada konstruksi jembatan, part kendaraan, alat perkakas dan rangka bangunan.

2.3.1 Klasifikasi Baja Karbon

Baja karbon merupakan logam paduan antara besi (Fe) dan karbon (C) dengan tambahan sedikit unsur Si, Mn, P, S dan Cu (Wirjosumarto, 2000). Baja karbon diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan kadar karbonnya, yaitu :

- Baja karbon rendah, dengan kadar karbon kurang dari 0,3%. Baja karbon rendah dalam perdagangan dibuat dalam bentuk pelat, profil batangan untuk keperluan tempa dan las.
- Baja karbon sedang, dengan kadar karbon antara 0,3%-0,45%. Baja karbon sedang biasanya dibuat untuk alat perkakas, baut, poros engkol, roda gigi ragum, dan pegas.
- Baja karbon tinggi, dengan kadar karbon antara 0,45%-1,70%. Baja karbon tinggi biasanya digunakan untuk alat-alat yang kerjanya berhubungan dengan panas yang tinggi, seperti palu, gergaji, pahat, kikir, bantalan peluru dan lain sebagainya (Amanto, 1999).

2.3.2 Baja St 41

Baja St 41 adalah baja konstruksi yang masuk dalam klasifikasi baja karbon rendah, karena baja St 41 hanya memiliki kandungan karbon antara 0,025% - 0,25%. Terdapat

sekitar 10-30 kg kandungan karbon dalam 1 ton baja St 41. Baja St 41 juga memiliki beban tarik maksimal sebesar 40 kgf/mm². Baja karbon rendah ini memiliki kekuatan dan keuletan yang cukup baik, sehingga banyak digunakan pada pegas, alat perkakas, cetakan tempa dan poros (Santoso dkk, 2008).

Berikut adalah tabel yang menunjukkan persentase komposisi kimia berdasarkan berat baja St 41 :

Tabel 2.5 Persentase Komposisi Kimia Berdasarkan Berat Baja St 41

<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>	<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>	<i>Component</i>	<i>Wt. %</i>
P	0,05	Si	0,2	S	0,05
C	Max 0,2	Mn	0,6		

Sumber: Ross (1992)

2.4 *Friction Welding*

Friction welding merupakan salah satu klasifikasi pengelasan, lebih tepatnya pada klasifikasi pengelasan tekan. Pada pengelasan gesek tidak menggunakan aliran arus dengan elektroda untuk menimbulkan panas seperti pada proses pengelasan konvensional, namun pengelasan gesek menimbulkan panas dari hasil gesekan benda yang akan dilas/disambung. Pada pengelasan jenis ini panas yang dihasilkan dari gesekan akan membuat partikel-partikel dari kedua logam teraduk dan berikatan. Dengan adanya tambahan tekanan membuat partikel-partikel tersebut mengisi celah-celah kosong pada daerah lasan dan membuat ikatan semakin kuat hingga menyambung. Karena peristiwa tersebut dihasilkan proses penyambungan logam tanpa pencairan atau yang dinamakan *solid state process*.

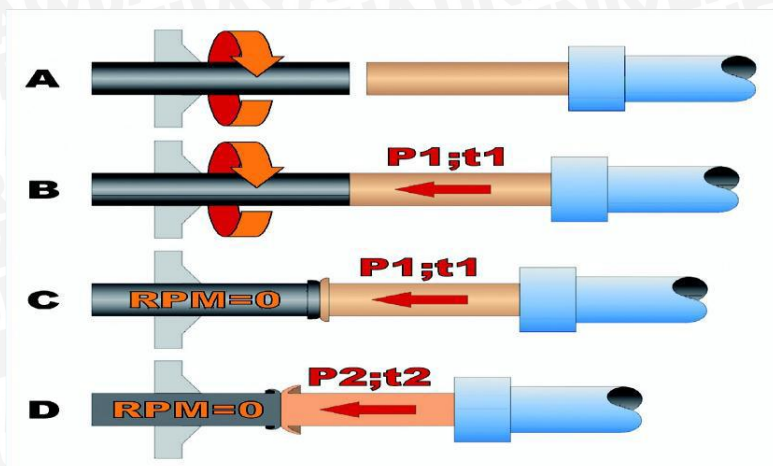
Friction welding memiliki dua metode yaitu :

1. *Continuous drive friction welding*, las gesek yang memiliki sumber panas dari gesekan antara dua benda kerja.
2. *Friction stir welding*, las gesek yang memiliki sumber panas dari gesekan antara benda kerja dan pahat.

2.4.1 *Continuous Drive Friction Welding*

Continuous drive friction welding adalah metode pengelasan gesek yang digunakan untuk menggabungkan dua buah komponen yang memiliki bentuk permukaan melingkar yang simetri. Dalam metode pengelasan ini, komponen didekatkan hingga terjadi kontak dengan salah satu komponen dalam keadaan berputar dan komponen yang lain dalam

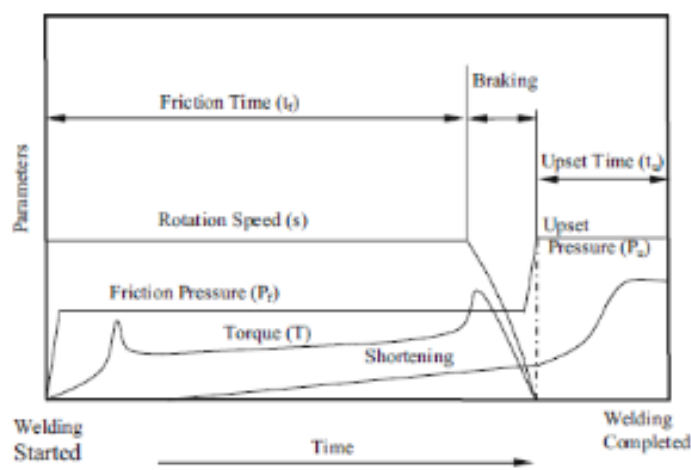
keadaan diam dan diberikan tekanan. Ketika temperatur permukaan yang bergesekan mencapai nilai yang sesuai, putaran dihentikan sementara tekanan tetap konstan atau ditambah. (Yilmaz dkk, 2009)



Gambar 2.1 Continuous drive friction welding

Sumber : Alves (2012)

Pada metode pengelasan gesek ini ada beberapa parameter yang harus diperhatikan ketika proses pengelasan. Parameter tersebut dijelaskan pada gambar berikut.



Gambar 2.2 Parameter friction welding

Sumber : Can, dkk (2010)

Dari gambar di atas terdapat beberapa parameter yang harus diketahui sebelum melakukan pengelasan gesek, yaitu :

1. *Friction Time*

Friction time adalah waktu yang dibutuhkan logam untuk bergesekan hingga dapat menyatu dalam proses pengelasan gesek. Untuk parameter ini dapat juga diganti dengan *burn-off length (BOL)*. *Burn-off length* adalah panjang dari sebagian logam yang akan terdeformasi karena panas yang timbul akibat gesekan saat proses pengelasan gesek dan membuat dua logam yang bergesekan menyatu. Fase pengelasan berakhir setelah panjang *burn-off length* telah habis (Bhamji dkk, 2011).

2. *Friction Pressure*

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.

3. *Upset Time*

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

4. *Upset Pressure*

Upset pressure adalah tekanan tambahan yang diberikan setelah dua buah logam menyatu akibat pengelasan gesek untuk memperkuat ikatan yang terbentuk.

2.4.2 Kelebihan *Friction Welding*

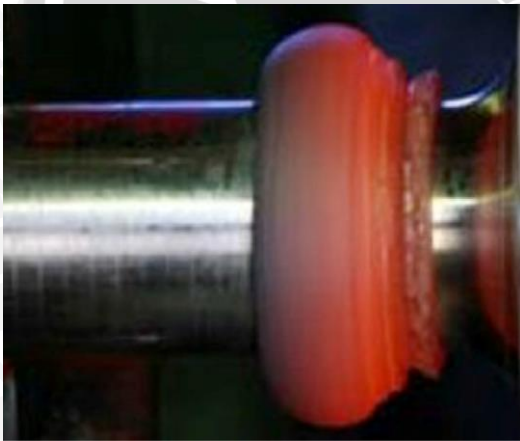
Walaupun sebagai metode pengelasan non konvensional, las gesek mulai marak digunakan dalam dunia industri. Hal ini dikarenakan las gesek memiliki kelebihan-kelebihan yang tidak dimiliki metode pengelasan konvensional. Kelebihan pengelasan gesek antara lain :

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. Kekuatan yang dihasilkan pada sambungan *friction welding* hampir sama dengan kekuatan logam induk.
6. Pengelasan pada temperatur rendah dapat mempertahankan mikrostruktur dan sifat material.

2.5 Flash

Flash merupakan bagian yang terbentuk akibat adanya aliran keluar dari logam yang melunak pada proses pengelasan gesek. Munculnya *flash* juga menjadi pertanda awal proses pengelasan gesek. Selain itu, *flash* juga biasa digunakan sebagai parameter inspeksi produk *friction welding*, karena bentuk *flash* yang tidak normal dapat disebabkan parameter pengelasan yang kurang tepat atau tidak ideal. Namun dalam dunia industri, biasanya *flash* langsung dipotong dalam keadaan masih panas dan lunak agar produksi lebih efisien.

Mekanisme terbentuknya *flash* adalah munculnya panas yang diakibatkan gesekan dua buah logam yang ditambah dengan adanya gaya aksial. Panas akibat gesekan ini membuat permukaan logam yang digesekan mengalami pelunakan dan secara bertahap diekstrusi atau dikeluarkan seiring gaya aksial yang dipertahankan. Logam lunak yang dikeluarkan tersebut akan semakin memanjang dan membentuk lengkungan lalu akan mengeras seiring menurunnya temperatur logam.



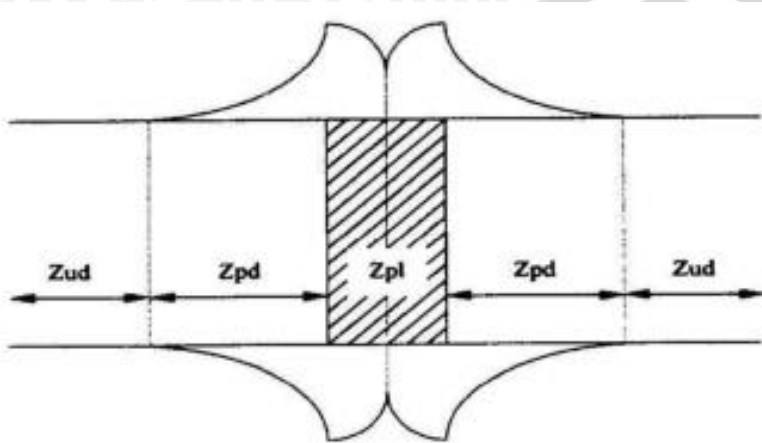
Gambar 2.3 Flash

Sumber : Martinsen, dkk (2015)

2.6 Heat Affected Zone (HAZ)

Heat affected zone atau daerah yang terpengaruh panas adalah daerah yang mengalami perubahan struktur mikro dan sifat mekanisnya akibat pengaruh panas ketika proses pengelasan gesek. Saat proses pengelasan berlangsung, gesekan dua buah logam menghasilkan panas yang membuat logam las mengalami pemanasan sampai mendekati titik lelehnya sehingga menyebabkan pencairan sebagian logam dan terjadi pelarutan padat. Hal tersebut yang mengakibatkan struktur mikro dan sifat mekanisnya tidak sama dengan logam induknya.

Pada pengelasan gesek, HAZ dibagi menjadi tiga bagian yakni *fully plasticized region* (*zpl*) atau daerah sambungan yang menyatu dengan sempurna, *partly deformed region* (*zpd*) merupakan daerah yang mengalami panas sebagian akibat proses pengelasan gesek dan *undeformed region* (*zud*) atau daerah yang tidak terpengaruh panas sama sekali ketika proses pengelasan.



Gambar 2.4 Bagian-bagian HAZ
 Sumber : Lin dkk (1999)

Bila saat proses pengelasan gesek menghasilkan panas yang semakin tinggi, maka daerah HAZ yang terbentuk juga semakin besar, keadaan itu membuat kekuatan sambungan akan semakin menurun. Selain membuat kekuatan sambungan menurun, HAZ juga menyebabkan penurunan ketahanan korosi bahkan dapat menyebabkan daerah tersebut menjadi getas.

2.7 Energi Pada Proses Friction Welding

Pada proses pengelasan gesek, panas ditimbulkan akibat adanya gesekan pada permukaan dua buah logam. Dan diasumsikan bahwa tekanan saat bergesekan menyebar secara merata pada permukaan logam yang berputar dan logam yang tidak berputar. Sehingga energi panas yang dihasilkan dapat dinyatakan dengan rumus :

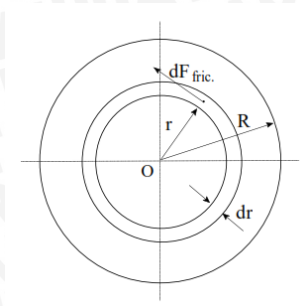
$$d\dot{Q} = \omega \cdot dM_t \dots\dots\dots (2 - 1)$$

Dengan keterangan ω adalah kecepatan putaran dan dM_t adalah perbedaan nilai momen torsi pada dr. Lalu, nilai torsi dapat dihitung dengan rumus :

$$dM_t = r \cdot dF_{friction} \dots\dots\dots (2 - 2)$$



$dF_{friction}$ adalah gaya gesek pada lingkaran dengan lebar dr dan, r adalah jari-jari lingkaran. Gaya gesek $dF_{friction}$ dapat dikatakan setara dengan koefisien gesek dikalikan dengan gaya aksial pada tekanan P yang bekerja pada lingkaran dengan jari-jari dr .



Gambar 2.5 Friction surface
Sumber : Can, dkk (2010)

$$dF_{friction} = \mu \cdot p \cdot 2\pi r \cdot dr \dots\dots\dots (2 - 3)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2 - 2) dan (2 - 3) pada persamaan (2 - 1) maka didapatkan :

$$d\dot{Q} = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot p \cdot r^2 \cdot dr (W) \dots\dots\dots (2 - 4)$$

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

$$\begin{aligned} d\dot{Q} &= \int_0^R 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot p \cdot r^2 \cdot dr \\ \dot{Q} &= 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot p \cdot \omega \cdot \frac{r^3}{3} \Big|_0^R \\ \dot{Q} &= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot p \cdot \omega \cdot r^3 (W) \dots\dots\dots (2 - 5) \end{aligned}$$

dengan :

- \dot{Q} : Jumlah energi pengelasan pada permukaan las gesek (W)
- p : Friction pressure (N/m^2)
- ω : Kecepatan putaran spindle (rad/s)
- r : Radius benda kerja (m)
- M_t : Momen Torsi (kg . m)
- μ : Koefisien gesek

2.8 Suhu Pengelasan

Pada proses pengelasan gesek, material tidak sampai mencair untuk terjadi proses penyambungan. Material pengelasan gesek hanya perlu mencapai suhu rekristalisasi agar



bisa menyatu. Nilai suhu rekristalisasi tidaklah pasti, hal itu dipengaruhi oleh paduan dari tiap material (ASM, 2008). Suhu rekristalisasi bisa diketahui dengan menggunakan rumus :

$$T_r = 0,3 \sim 0,5 T_c \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots (2 - 6)$$

dengan :

$$T_r = \text{Suhu Rekristalisasi (}^\circ\text{C)}$$

$$T_c = \text{Suhu Cair (}^\circ\text{C)}$$

2.9 Pengujian Tarik

Pengujian tarik yaitu pengujian yang bertujuan untuk mendapatkan gambaran tentang sifat mekanik dari suatu logam ketika mendapatkan tegangan tarik. Pengujian tarik dilakukan dengan penambahan beban secara perlahan-lahan, kemudian akan terjadi pertambahan panjang yang sebanding dengan gaya yang bekerja. Kesebandingan ini terus berlanjut sampai bahan mencapai titik *propotionality limit*.

Setelah itu pertambahan panjang yang terjadi sebagai akibat penambahan beban tidak lagi berbanding lurus, pertambahan beban yang sama akan menghasilkan penambahan panjang yang lebih besar dan suatu saat terjadi penambahan panjang tanpa ada penambahan beban, batang uji bertambah panjang dengan sendirinya. Hal ini dikatakan batang uji mengalami *yield* (luluh). Keadaan ini hanya berlangsung sesaat dan setelah itu akan naik lagi.

Kenaikan beban ini akan berlangsung hingga mencapai maksimum, untuk batang yang ulet beban mesin tarik akan turun lagi sampai akhirnya putus. Pada saat beban mencapai maksimum, batang uji mengalami pengecilan penampang setempat (*local necking*) dan penambahan panjang terjadi hanya disekitar *necking* tersebut. Pada batang getas tidak terjadi *necking* dan batang akan putus pada saat beban maksimum.

Kekuatan tarik merupakan kemampuan suatu bahan untuk menerima beban tarik tanpa mengalami kerusakan dan dinyatakan sebagai tegangan maksimal sebelum putus dalam kurva rekayasa tegangan-regangan (Callister, 2007). Nilai kekuatan tarik biasa dianggap data paling penting karena biasanya perhitungan-perhitungan nilai kekuatan berdasarkan nilai kekuatan tarik.

Tegangan tarik juga dapat diartikan beban tarik maksimal pada tiap luas permukaan. Tegangan tarik pada suatu material dapat dituliskan dengan persamaan berikut :

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} \text{ (N/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (2 - 7)$$

dengan :

σ_{max} = Tegangan tarik maksimum (N/m^2)

F_{max} = Beban tarik maksimum (N)

A = Luas penampang (m^2)

Regangan (pertambahan panjang) dapat dituliskan perumusan sebagai berikut

$$\epsilon = \frac{(L-L_0)}{L_0} \times 100\% \dots\dots\dots(2 - 8)$$

dengan :

ϵ = Regangan (%)

L_0 = Panjang benda uji mula-mula (m)

L = Panjang benda uji akhir (m)

2.10 Total Pemendekan

Dalam proses pengelasan gesek terjadi gesekan antara dua buah material yang akan dilas. Gesekan tersebut menimbulkan panas yang membuat sebagian material melunak dan membentuk *flash*. Hilangnya sebagian material akibat terbentuknya *flash* tersebut menyebabkan material mengalami pemendekan (Bhamji dkk, 2011). Total pemendekan material hasil pengelasan gesek dapat diukur dengan rumus :

$$\Delta L = L_{awal} - L_{akhir} \dots\dots\dots(2 - 9)$$

dengan :

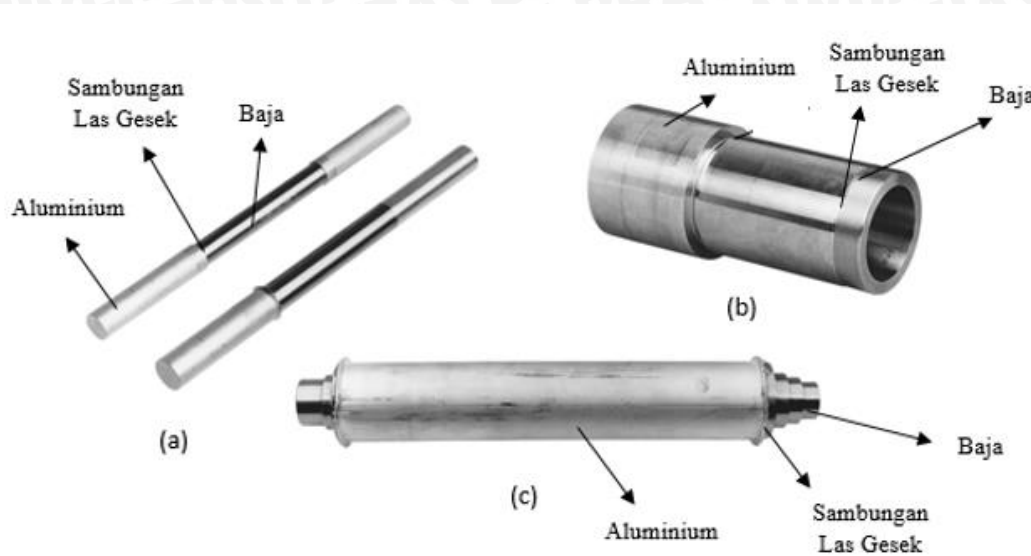
ΔL = Total pemendekan

L_{awal} = Total panjang material sebelum dilas

L_{akhir} = Total panjang material hasil pengelasan gesek

2.11 Aplikasi Friction Welding

Friction welding sudah mulai marak digunakan dalam proses penyambungan logam di bidang industri, seperti industri otomotif dan perkapalan. Beberapa contoh produk yang menggunakan proses *friction welding* antara lain seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.6 Aplikasi *friction welding* : (a) batangan sambungan Al-St, (b) sambungan pipa *cyrogenic*, (c) *copier fuser roller*
 Sumber : MTI Welding (2016)

2.12 Hipotesis

Dugaan sementara variasi tinggi kerucut satu sisi dan *burn-off length* mempengaruhi besarnya kekuatan tarik sambungan las gesek yang terbentuk. Dengan penggunaan *burn-off length* yang kecil pada spesimen dengan tinggi kerucut yang besar maka luas bidang kontak yang bergesekan dan total pemendekan spesimen yang terjadi akan semakin kecil. Akibat gesekan yang kecil, suhu pengelasan yang terjadi akan kecil sehingga menimbulkan *heat input* yang semakin kecil dan membuat sebagian dari material yang terpengaruhi panas akibat gesekan lebih sedikit. Hal ini menyebabkan kekuatan tarik sambungan las gesek semakin tinggi.