

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Hasegawa et.al (1997), pada penelitiannya yang berjudul “*Influence of Shot Peening on Fatigue Strength of Friction Welded Joint*” menggunakan 4 jenis baja karbon yaitu S25C, S35C, S45C, dan S55C. Metode pengelasan yang dipakai adalah metode *CDFW* dengan kecepatan putar sebesar 3600 rpm, tekanan gesek awal sebesar 51 MPa dan *upset pressure* sebesar 94 MPa. Kemudian spesimen diuji lelah dengan metode *rotating bending* dengan kecepatan putar sebesar 3500 rpm pada temperatur ruangan. Baja S50C dengan perlakuan *shot peening* memiliki nilai kekuatan lelah tertinggi pada siklus 2×10^6 sebesar 353 MPa sementara itu baja S25C tanpa perlakuan memiliki kekuatan lelah terendah yaitu 278 MPa. Hasil daripada penelitian ini adalah efek dari penambahan *shot peening*, menambah kekuatan lelah pada sambungan las gesek lebih besar dari material aslinya.

Yamamoto et.al (2007), dengan penelitiannya yang berjudul “*Fatigue Strength of Friction-Welded 6061 Aluminum Alloy Joints.*” menggunakan aluminium 6061-T6 dengan berbagai variasi tekanan gesek awal dan *upset pressure*. Pengujian kekuatan lelah yang dilakukan yaitu *rotating cantilever bending fatigue test*. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa kekuatan lelah Aluminium 6061 asli masih lebih tinggi dari pada hasil sambungan las gesek yaitu sebesar 127 MPa. kekuatan lelah terkecil sebesar 50 MPa ada pada spesimen variasi tekanan gesek awal 10 MPa dan *upset pressure* 30 MPa. Sementara itu kekuatan lelah sambungan las gesek terbesar yaitu 100 MPa pada variasi tekanan awal sebesar 25 MPa dan *upset pressure* 75 MPa. Pada penelitian ini menyimpulkan bahwa kekuatan lelah las gesek masih belum melebihi kekuatan material aslinya.

Santoso et.al (2012), meneliti tentang bagaimana sudut *chamfer* dan gaya tekan akhir mempengaruhi kekuatan tarik dan porositas sambungan las gesek pada paduan Al-Mg-Si. variasi sudut *chamfer* yang digunakan antara lain 15°, 30°, 45°, 60°, dan 75° dan gaya tekan akhir sebesar 157 kgf, 185 kgf, dan 213 kgf selama 120 detik. Metode pengelasan yang dipakai adalah pengelasan *CDFW* (*Continous Drive Friction Welding*) dengan kecepatan

putaran sebesar 1600 rpm. Hasil yang didapat adalah kekuatan tarik tertinggi pada spesimen variasi sudut *chamfer* 15° dengan gaya tekan 213 kgf dengan kekuatan tarik maksimum sebesar 140,45 MPa. Semakin kecilnya sudut *chamfer* dan semakin besarnya gaya tekan akhir, kekuatan tarik pada pengelasan gesek aluminium Al-Mg-Si akan meningkat serta porositas menurun dengan semakin bertambahnya sudut *chamfer* dan gaya tekan akhir.

Irawan et.al (2012), dalam penelitiannya yang berjudul “*Tensile Strength of Weld Joint Produced by Spinning Friction Welding of Round Aluminum A6061 with Various Chamfer Angles*” menyimpulkan bahwa sudut *chamfer* mempengaruhi kekuatan tarik sambungan las gesek. Sudut *chamfer* 30° menghasilkan kekuatan tarik maksimal. Dari analisa foto makrostruktur sambungan las didapat luas daerah HAZ yang kecil sehingga menyebabkan kekuatan tarik maksimal, porositas di sambungan las gesek yang minimal serta luas daerah *Fully Plasticized Zone* mempengaruhi kekuatan tariknya juga.

2.2 Aluminium dan Paduannya

Aluminium adalah logam ringan dengan massa jenis 2,7 g/cm³. Aluminium banyak digunakan karena kelebihan sifat - sifatnya dibanding logam lain. Karakteristik utama dari aluminium diantaranya :

1. Permukaan yang mengkilap
2. Memiliki kekuatan tinggi
3. Merupakan konduktor listrik yang baik
4. Titik lebur yang rendah
5. Kecepatan rambat panas tinggi
6. Aluminium semakin tangguh pada suhu yang rendah
7. Mudah dibentuk
8. Tidak beracun

2.2.1 Macam – Macam Paduan Aluminium serta Kode Penamaan

Pengkodean aluminium umumnya menggunakan 4 angka. Huruf pertama A adalah singkatan dari Aluminium. Angka pertama biasanya menunjukkan jenis paduannya. Berikut merupakan beberapa macam paduan aluminium tempa / pengerjaan:

1. Aluminium murni (1xxx)

Memiliki sifat mampu bentuk yang baik, konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, mampu mesin yang baik, tetapi memiliki kekurangan yaitu tidak dapat diperlakukan panas, kekuatannya rendah.

2. Paduan Al-Cu (2xxx)

Paduan aluminium seri 2000, biasanya terkenal dengan sebutan duraluminium atau super duraluminium. Memiliki sifat mampu diperlakukan-panaskan yang baik. Sifat mekanik paduan ini dapat menyamai sifat dari baja lunak. Kekurangan dari paduan ini adalah sifat mampu las yang kurang baik

3. Paduan Al-Mn (3xxx)

Paduan ini jenis seri 3000 dengan penambahan Mn sekitar 1,2% meningkatkan kekuatan 10% daripada aluminium murni dengan sifat mampu bentuk dan sifat mampu mesin yang sama dengan aluminium murni. Aplikasinya untuk peralatan dapur, panel.

4. Paduan Al-Si (4xxx)

Merupakan paduan aluminium dengan silikon. Salah satu karakteristiknya seperti titik lebur rendah dan umumnya tidak dapat diperlakukan panas.

5. Paduan Al-Mg (5xxx)

Paduan ini merupakan paduan aluminium seri 5000. A5005 yang memiliki Mg yang rendah digunakan untuk aksesoris. Sedangkan paduan yang memiliki Mg antara 2-5% digunakan untuk material konstruksi seperti A5052, A5056, A5083.

6. Paduan Al-Mg-Si (6xxx)

Merupakan paduan aluminium seri 6000. Paduan ini memiliki sifat tahan korosi dan kekuatan yang tinggi. Aplikasi untuk penggunaan material konstruksi dan bingkai arsitektur.

7. Paduan Al-Zn-Mg (7xxx)

Merupakan paduan aluminium seri 7000. Contohnya adalah A7075 memiliki kekuatan yang tinggi sehingga banyak digunakan untuk material konstruksi pesawat terbang.

Angka kedua penamaan menggunakan angka 0 - 9. 0 menunjukkan paduan dasar, sedangkan 1 - 9 menunjukkan perbaikan dari paduan. Pada paduan seri 1000, angka ketiga dan keempat merupakan jumlah minimum aluminium pada paduan. Misalnya, 1050

menunjukkan aluminium minimum sebesar 99,50% dan 1090 menunjukkan minimum aluminium 99,90%.

2.2.2 Sifat Mekanik Aluminium

Adapun sifat-sifat mekanik aluminium antara lain sebagai berikut:

a. Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik merupakan kemampuan bahan untuk menerima beban tarik yang diberikan tanpa mengalami kerusakan dan dinyatakan sebagai tegangan maksimum sebelum patah. Hasil pengujian tarik biasa ditampilkan dalam grafik tegangan-regangan. Diagram tegangan-regangan akan menunjukkan besarnya regangan dari spesimen saat diberikan tegangan tertentu. Semakin besar tegangan dan semakin kecil regangan maka spesimen tersebut memiliki kekuatan tarik yang baik karena spesimen tersebut tidak mengalami deformasi plastis akibat adanya beban yang diberikan

b. Kekerasan

Kekerasan adalah kemampuan material untuk menahan penetrasi gaya dari luar sehingga tidak mengalami kerusakan. Kekerasan pada logam juga didefinisikan sebagai ketahanan terhadap deformasi plastis atau permanen.

c. Kekuatan *Impact*

Kekuatan kejut (*impact*) adalah kemampuan suatu bahan untuk menahan beban dinamis atau mendadak yang dapat menyebabkan rusak atau patah.

d. Kekuatan Puntir

Kekuatan puntir adalah kemampuan suatu material untuk menerima gaya sejajar dan gaya rotasi tanpa terjadinya pergeseran.

e. Kekuatan Lelah

Kekuatan lelah adalah kemampuan suatu material untuk menerima gaya secara terus menerus hingga mengalami patah.

2.2.3 Sifat Mampu Las Aluminium

Paduan aluminium dalam pengelasan, mempunyai sifat yang kurang baik dibandingkan dengan baja. Sifat yang merugikan tersebut adalah:

- a. Daya hantar panas yang tinggi sehingga sulit untuk mencairkan sebagian kecil saja.

- b. Paduan aluminium mudah bereaksi dengan oksigen dan membentuk aluminium oksida yang mempunyai titik cair yang tinggi sehingga menyebabkan peleburan antara logam dasar dan logam las terhalang.
- c. Paduan aluminium mempunyai berat jenis yang rendah, karena itu banyak zat – zat lain yang terbentuk selama pengelasan akan tenggelam. Keadaan ini memudahkan terkandung zat – zat yang tidak diinginkan di dalamnya.

A6061 merupakan aluminium dengan paduan utama Mg dan Si. Aluminium jenis ini memiliki sifat mampu las baik, mampu bentuk baik, dan kekuatan lebih rendah dibanding paduan aluminium yang lain. Penggunaan material A6061 pada material konstruksi. Berikut ini merupakan tabel standar komposisi kimia serta sifat mekanik dari aluminium A6061.

Tabel 2.1
Standar Komposisi Kimia Aluminium A6061

No. Kode	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Lainnya
A6061	0,4-0,8	0-0,7	0,15-0,4	0-0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0-0,25	0-0,15	0-0,05

Sumber : *ASM Handbook Volume 02* (2000, p.403)

Tabel 2.2
Standar Sifat Mekanik Aluminium A6061

No. Kode	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekuatan Mulur (MPa)	Perpanjangan (%)	Kekuatan Geser (MPa)	Kekerasan Brinell
A6061	310	276	17	207	95

Sumber : *ASM Handbook Volume 2* (2000, p.404)

2.3 Baja

Baja merupakan logam paduan dengan komposisi besi (Fe) dan karbon dan unsur lainnya. Pada umumnya kadar karbon dalam baja berkisar antara 0,002% sampai 2,1% dari beratnya (Prawoto, 2013). Unsur paduan lain yang biasanya dimasukkan kedalam baja adalah mangan, silikon, kromium, molybdenum, boron, titanium, vanadium dan niobium. Unsur karbon pada baja memberikan sifat keras, mencegah terjadinya dislokasi. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan

kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun di sisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan keuletannya (*ductility*). Penggunaan baja saat ini sangat banyak misalnya pada rangka konstruksi. Pada penelitian ini lebih dibahas mengenai baja S50C.

2.3.1 Baja S50C

Baja karbon S50C adalah baja dengan kadar karbon sebanyak 0,5% di dalamnya. Dalam aplikasinya biasa digunakan untuk pegas, roda gigi, *tension bar*, *load spindle*. Baja S50C setara dengan baja SAE 1050, ASTM A 29. Berikut merupakan komposisi kimia baja S50C atau SAE 1050:

Tabel 2.3
Standar Komposisi Kimia Baja S50C

<i>SAE grade</i>	<i>JIS number</i>	C	Mn	P	S	Si
1050	S50C	0,47-0,53	0,60-0,90	0,030	0,035	0,15-0,35

Sumber : *ASM Metals HandBook Volume 1* (2000, p.462)

2.3.2 Sifat Mekanik Baja S50C

Sifat mekanik suatu material biasanya dilihat dari nilai kekuatan tarik, kekerasan, dll. Berikut tabel yang menjelaskan sifat mekanik baja S50C.

Tabel 2.4
Standar Sifat Mekanik Baja S50C

<i>Tensile Strength</i> (MPa)	<i>Yield Strength</i> (MPa)	<i>Elongation Ration</i> (%)	<i>Reduction of area</i> Psi(%)	<i>Impact merit</i> AKV (J)	<i>Resilient value</i> AKV(J/cm ²)	<i>Hardness</i>	<i>Annealed</i>
≥630	≥375	≥14	≥40	≥31	≥39	≤235HB	≤207HB

Sumber : www.astmsteel.com

2.4 Pengertian Las

2.4.1 Definisi Pengelasan

Pengelasan merupakan proses penyambungan dua logam dalam keadaan cair dengan menggunakan energi panas. Menurut *DIN Deutsche Industrie Normen*, las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan

lumer atau cair. Las adalah proses penyambungan antara logam atau non-logam yang menghasilkan satu bagian yang menyatu, dengan memanaskan material yang akan disambung sampai pada suhu pengelasan tertentu, dengan atau tanpa penekanan, dan dengan atau tanpa logam pengisi (Jeffus, 2012).

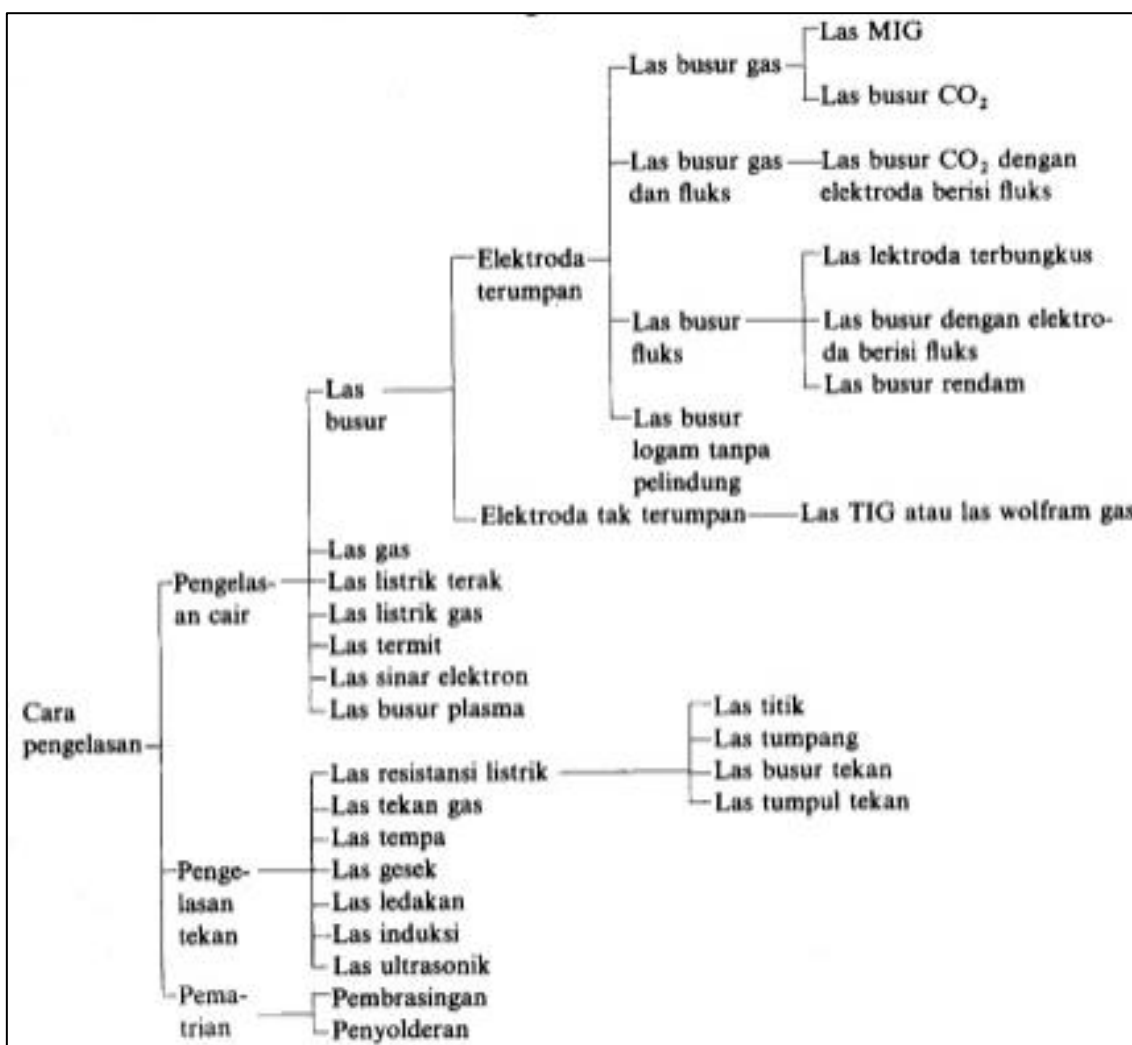
Pengelasan menurut temperatur pengelasan dapat dibagi menjadi dua yaitu :

1. *Fusion Welding*

Fusion Welding merupakan proses pengelasan logam yang melibatkan pencairan logam-logam yang akan digabungkan.

2. *Nonfusion Welding*

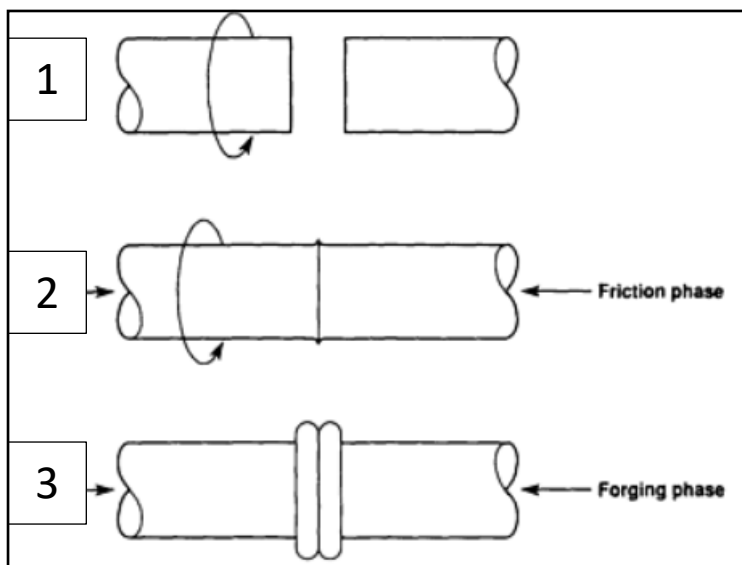
Nonfusion Welding merupakan proses pengelasan logam dimana logam tidak mencair dan pencairan logam tidak menjadi faktor utama dalam pengelasan. Dalam proses ini panas masih tetap terlibat untuk mengurangi tenaga yang dibutuhkan untuk terjadi deformasi plastis.



Gambar 2.1 Klasifikasi Pengelasan
Sumber : Wiryosumarto (2000, p.17)

2.4.2 Friction Welding

Friction Welding merupakan teknik pengelasan *solid-state* dua logam dengan jenis yang sama atau berbeda dengan cara dipanaskan sampai keadaan plastis dengan bantuan *upsetting force* atau gaya tekan sehingga atom dari material tersebut berpindah dan membentuk sambungan las (Martinsen,2015). Gesekan terjadi pada permukaan dua benda kerja yang berputar relatif satu dengan yang lain untuk meningkatkan suhu kedua permukaan benda kerja tersebut. Setelah mencapai suhu lebur, kedua benda kerja selanjutnya didekatkan dengan gaya yang pas untuk membentuk ikatan secara metalurgi. Urutan proses *friction welding* adalah sebagai berikut :



Gambar 2.2 Urutan proses *friction welding*

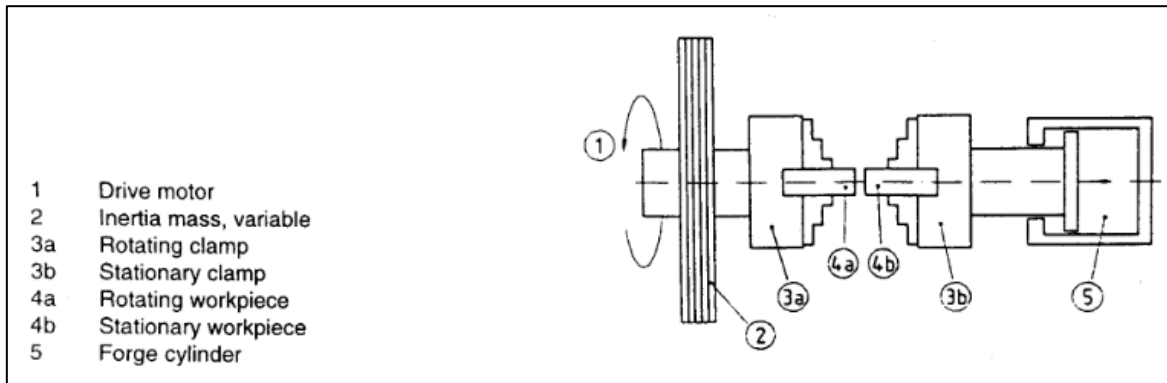
Sumber: *ASM Welding, Brazing and Soldering Handbook Volume 6* (2000)

1. Salah satu benda kerja berputar dengan kecepatan tinggi
2. Benda kerja yang diam melakukan kontak terhadap benda kerja yang berputar dengan memberikan gaya axial
3. Gaya axial meningkat, dan benda kerja yang berputar mulai berhenti, pada saat itu *flash* mulai terbentuk. setelah *upset length* atau jarak spesifik tercapai, maka pengelasan selesai.

2.4.3 Continuous Drive Friction Welding

Continuous Drive Friction Welding merupakan salah satu macam *friction welding* dimana gesekan terjadi antara benda kerja yang bergerak dan benda kerja yang diam. Benda

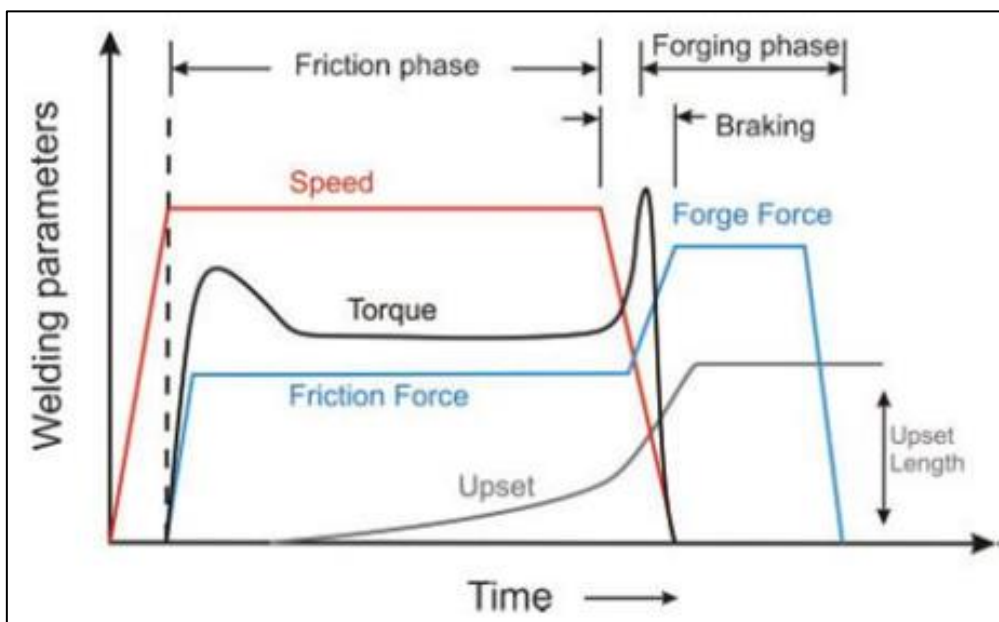
kerja yang bergerak secara *rotary* dengan kecepatan konstan, kecepatan rotasi benda kerja selama proses *continuous drive friction welding* dihasilkan oleh motor yang bekerja secara kontinu. Benda kerja yang diam melakukan kontak terhadap benda kerja yang berputar dengan memberi gaya axial.



Gambar 2.3 Skema *Continuous Drive Friction Welding*

Sumber: *Indian Standard Welding – Friction Welding of Metallic Materials* (2006, p.10)

Parameter-parameter pada *continuous drive friction welding* dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Parameter *Continuous Drive Friction Welding*

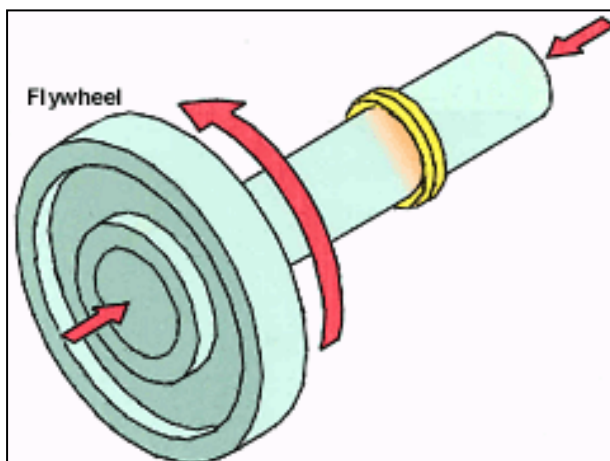
Sumber: Rombaut (2011)

Kualitas hasil pengelasan friction welding sangat tergantung pada parameter proses pengelasan. Parameter utama dalam *continous drive friction welding* adalah kecepatan

putaran, gaya aksial, waktu gesekan, waktu tempa, dan tekanan tempa. Parameter ini menentukan jumlah energi dalam daerah las dan laju pembangkitan panas pada permukaan. Saat pengelasan, perpendekan aksial (biasa disebut dengan *upset* atau *burn off*) dan torsi bervariasi (Rombaut, 2011).

2.4.4 *Inertia Friction Welding*

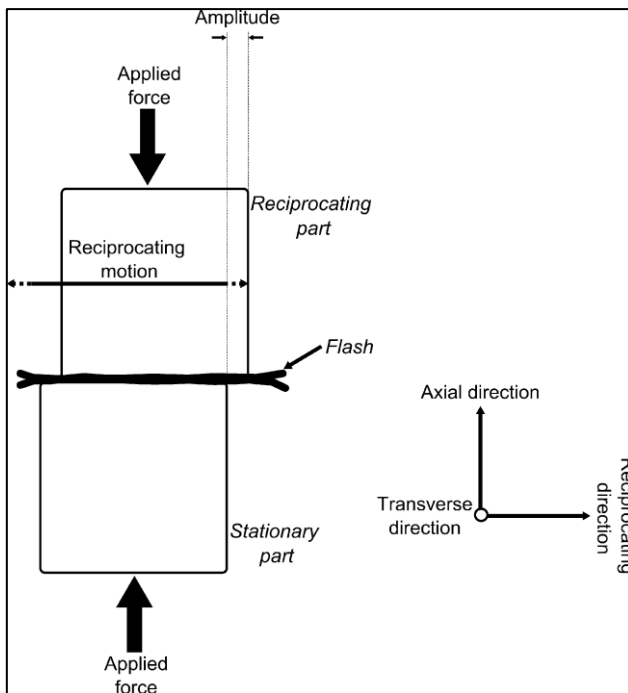
Inertia Friction Welding merupakan salah satu macam *friction welding* dimana gesekan terjadi antara benda kerja yang bergerak dan benda kerja yang diam. Benda kerja yang bergerak secara *rotary* dengan kecepatan konstan, pada bagian benda kerja yang berputar terpasang *flywheel* yang bertujuan untuk menyimpan energi. Ketika energi dan kecepatan yang dibutuhkan telah cukup maka *flywheel* akan melepaskan diri kemudian kedua benda kerja akan bertemu dengan penambahan gaya aksial.



Gambar 2.5 *Inertia Friction Welding*
Sumber: Kallee (1999)

2.4.5 *Linear Friction Welding*

Linear Friction Welding merupakan proses pengelasan dua buah benda padat dimana penggabungan diperoleh dari panas yang didapatkan dari gesekan antara benda kerja yang bergerak maju mundur secara linear dengan benda kerja yang tidak bergerak serta penambahan gaya yang disebut dengan "*upset*" untuk menggabungkan material.



Gambar 2.6 Linear Friction Welding
Sumber : Bhamji (2010)

2.4.6 Keuntungan dan Kelemahan *Friction Welding*

Keuntungan menggunakan proses penyambungan dengan pengelasan gesek antara lain :

- a. Kebersihan permukaan sambungan tidak diperlukan, karena selama proses pengelasan, permukaan akan terkelupas dan terdeformasi kebagian luar.
- b. Tidak memerlukan logam pengisi, pelindung flux dan gas pelindung selama proses
- c. Tidak terdapat cacat akibat penomema pencairan dan pembekuan.
- d. Dimungkinkan untuk menyambung dua material logam yang berbeda.
- e. Ongkos pengerjaan lebih ringan.

Namun pengelasan gesek memiliki keterbatasan yaitu ;

- a. Benda yang disambung harus simetris.
- b. Proses umumnya terbatas pada permukaan plat dan bentuk batang bulat.
- c. Salah satu material yang disambung harus memiliki sifat mampu terdeformasi secara plastis.

2.4.7 Aplikasi Pengelasan Gesek

Penerapan pengelasan gesek pada kehidupan sehari – hari diterapkan pada bidang otomotif, militer, pesawat, *electrical*. Salah satu contohnya yaitu pada konstruksi rangka, katup isap, *drive shafts*, dan sebagainya.



Electrical connectors



Pump shafts



Piston rods



Drive shafts



Air bag canisters



Gear levers



Stanley tools



Airbag component



Drill bits



Engine valves



Blisk



Large piston rod



Hydraulic cylinders

Gambar 2.7 Aplikasi Pengelasan Gesek Dalam Kehidupan Sehari – hari
Sumber : Mehmet (2010)

2.5 Daerah HAZ (*Heat Affected Zone*)

Daerah *Heat Affected Zone* adalah daerah yang terpengaruh panas pada proses pengelasan, hal ini membuat struktur mikro serta sifat-sifat mekaniknya berubah. Daerah *Heat Affected Zone* pada las gesek dibagi menjadi tiga bagian dimana ketiga bagian tersebut dapat kita amati dari foto makrostruktur. Bagian-bagian HAZ yaitu :

1. *Contact Zone* (i)

Pada bagian ini terjadinya gesekan antar logam dan perpindahan atom logam dari permukaan satu ke yang lainnya. Kondisi material pada zona ini mengalami deformasi plastis yang sangat hebat sehingga struktur butirannya sangat halus.

2. *Fully Plasticized Zone* (ii)

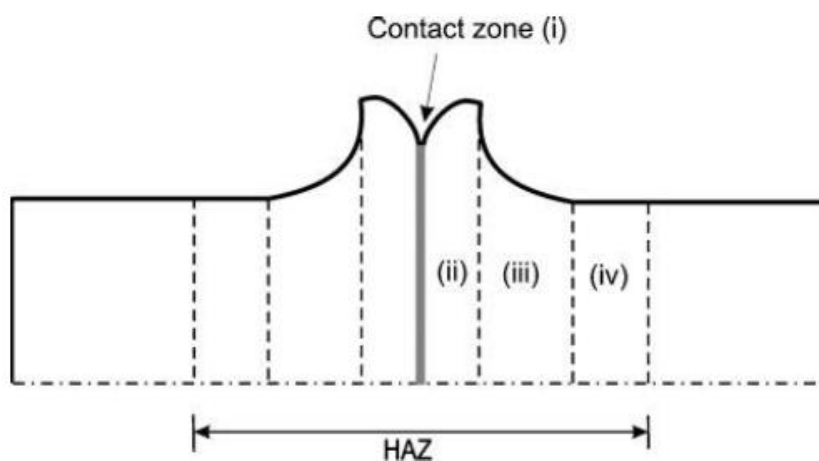
Fully Plasticized Zone merupakan bagian yang banyak mengalami deformasi plastis tetapi tidak bergesekan langsung. Karena pengaruh temperatur yang tinggi struktur butir material pada zona ini halus dan bulat.

3. *Partly Deformed Region* (iii)

Partly Deformed Region merupakan bagian dari *Heat Affected Zone* dimana pada bagian ini hanya terpengaruh panas sebagian.

4. *Undeformed Zone* (iv)

Undeformed Zone merupakan bagian dari *Heat Affected Zone* dimana pada bagian ini tidak terpengaruhi panas sama sekali saat proses pengelasan.

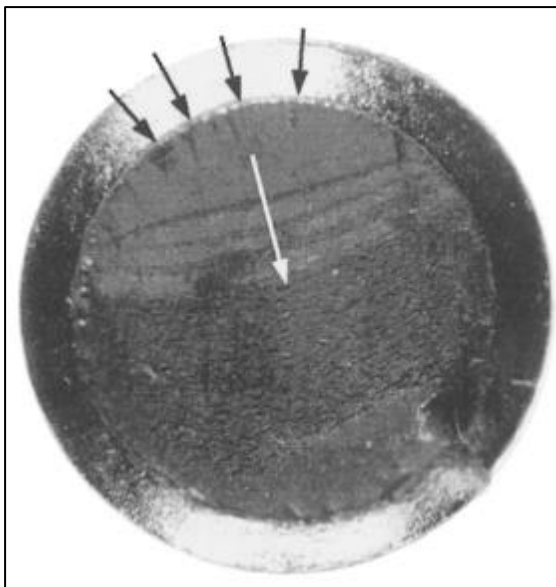


Gambar 2.8 Skema *Heat Affected Zone*
Sumber: Rombaut (2011)

2.6 Kelelahan

Kelelahan atau biasa dikenal dengan *fatigue* merupakan fenomena patahnya logam akibat pembebanan yang diberikan berulang dalam jumlah siklus tertentu. Menurut *American Society of Testing Material*, kelelahan diartikan sebagai proses perubahan yang progresif pada struktur secara permanen di lokasi tertentu atau terlokalisir yang disebabkan oleh siklus pebebanan berulang, dengan akumulasi dari perubahan ini akan mengakibatkan retak ataupun patahan. Ada tiga proses terjadinya kelelahan, yaitu :

1. Naiknya tegangan pada daerah retak yang dapat menimbulkan adanya konsentrasi tegangan yang kemudian akan terjadi bentukan plastis. Kemudian terjadi retak mikro pada daerah tersebut.
2. Retak mikro kemudian berkembang dan merambat bila terus diberikan pembebanan.
3. Jika retak merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang sisa yang belum retak dan akhirnya terjadi patahan.



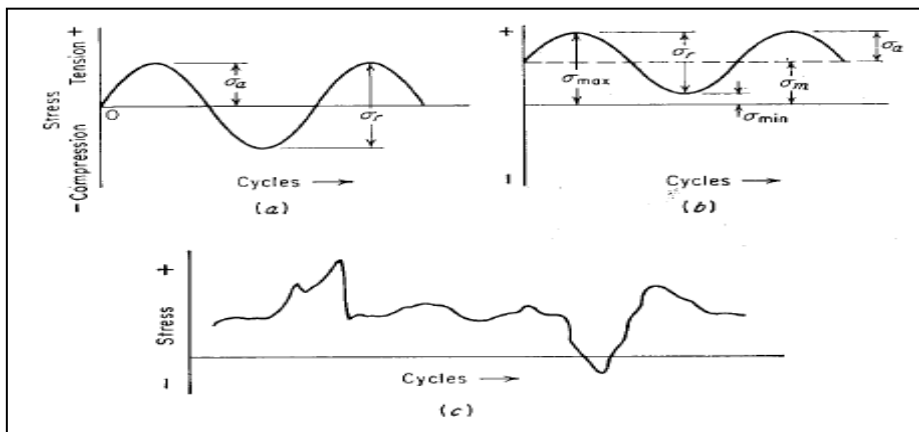
Gambar 2.9 Contoh Permukaan Patahan *Fatigue*
Sumber : Stephens (2001, p.48)

Pengamatan tentang kelelahan logam dilakukan sejak 1903 oleh Ewing dan Humparey yang mengarah pada lahirnya teori mekanisme patah lelah. Mekanisme ini dibagi menjadi 3 tahap kejadian yaitu :

1. Tahap awal terjadinya retakan (*crack inisiation*).
2. Tahap penjaran retakan (*crack propagation*).
3. Tahap akhir (*final fracture*).

Karakteristik kelelahan ada dua jenis yaitu karakteristik makro dan karakteristik mikro. Karakteristik makro merupakan ciri – ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (tanpa bantuan alat). Sedangkan karakteristik mikro hanya dapat diamati dengan menggunakan alat bantu pengelihatian berupa mikroskop. Terdapat dua jenis bentuk pada permukaan patah akibat kelelahan yaitu *fatigue fracture* dan *static fracture*. *Fatigue fracture* merupakan daerah patahan dimana terjadi perambatan retakan. Retakan merambat semakin dalam sehingga penampang yang tersisa tidak mampu lagi menahan tegangan yang bekerja dan akhirnya terjadi patah akhir yang disebut *static fracture*. Material yang memiliki sifat ulet menyebabkan material lebih tahan terhadap penjalaran retakan sedangkan sifat getas tahan terhadap pembentukan awal retak tetapi tidak pada penjalaran retakan.

Terdapat tiga siklus umum tegangan fluktuatif yang dapat menyebabkan *fatigue*, yaitu :



Gambar 2.10 Tiga Siklus Tegangan *Fatigue* (a) Tegangan Terbalik (b) Tegangan Berulang (c) Tegangan Acak

Sumber: Dieter (1986, p.377)

1. Tegangan Terbalik

Pada siklus tegangan ini nilai maksimum dan minimum tegangan adalah sama. Tegangan tarik dianggap positif dan tegangan tekan dianggap negatif.

2. Tegangan Berulang

Pada siklus tegangan berulang, tegangan maksimum σ_{max} dan tegangan minimum σ_{min} tidak sama. Pada gambar 2.8 (b) diatas diilustrasikan keduanya sebagai tegangan tarik, akan tetapi tidak menutup kemungkinan terjadi kesamaan pada tegangan tekan.

3. Tegangan Acak

Pada siklus ini bentuk dari tegangan berulang yang terjadi sangat tidak teratur, periode dan amplitudonya dapat berubah dengan waktu.

Pada suatu siklus tegangan berfluktuasi dapat dipertimbangkan memiliki dua komponen, yaitu tegangan rata-rata σ_m , serta amplitudo tegangan σ_a . Selain itu juga kita harus mempertimbangkan adanya *range of stress* atau jarak tegangan σ_r . Seperti yang terlihat pada gambar 2.12 (b), jarak tegangan dapat kita peroleh dari selisih antar tegangan maksimum dan tegangan minimum atau dalam rumus :

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \dots\dots\dots(2-1)$$

Sedangkan amplitudo tegangan didapatkan dari setengah jarak tegangan, dinyatakan dengan rumus :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max}}{2} - \frac{\sigma_{min}}{2} \dots\dots\dots(2-2)$$

Tegangan rata-rata merupakan rata-rata dari tegangan maksimum dan tegangan minimum, dinyatakan dengan rumus :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \dots\dots\dots(2-3)$$

Dua rasio yang digunakan dalam menunjukkan data *fatigue* yaitu :

- Rasio tegangan :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \dots\dots\dots(2-4)$$

- Rasio amplitudo :

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \dots\dots\dots(2-5)$$

dengan :

σ_r = Jarak tegangan (*Range of stress*)

σ_a = Amplitudo tegangan

σ_m = Tegangan rata-rata (*Mean stress*)

σ_{max} = Tegangan maksimum

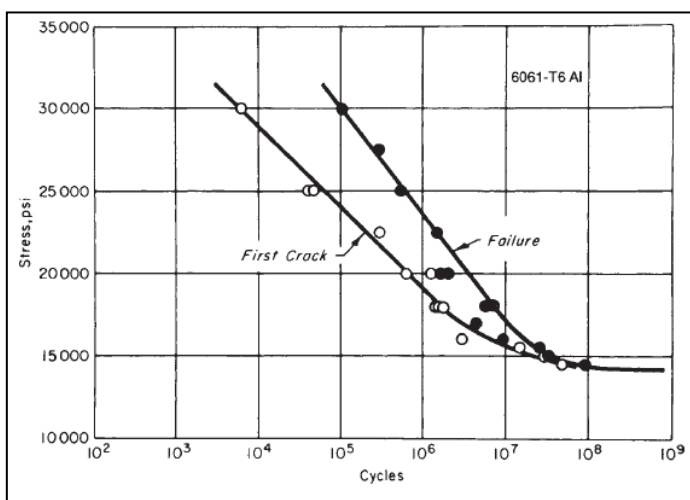
σ_{min} = Tegangan minimum

R = Rasio tegangan

A = Rasio amplitudo

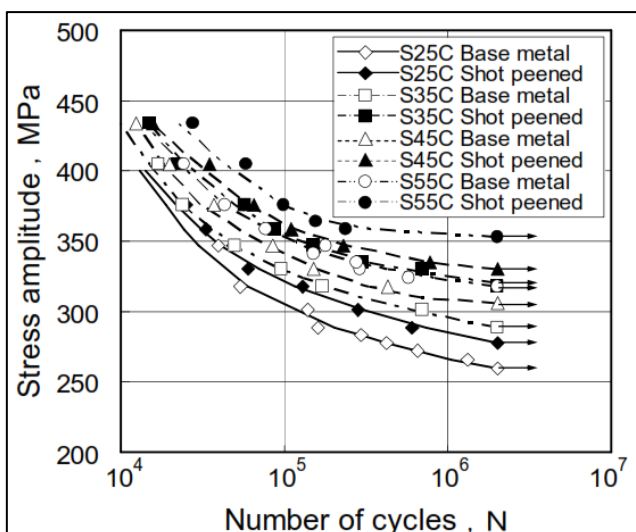
2.6.1 Kurva S-N

Metode pengujian *fatigue* melibatkan pengujian spesimen dalam berbagai macam tegangan, biasanya penggabungan antara tarik dan bending. Hasil pengujian disajikan dalam kurva yang disebut kurva S-N, dimana S merupakan amplitudo tegangan sedangkan N merupakan jumlah siklus. Amplitudo tegangan didefinisikan sebagai tegangan maksimum tekan dan tarik dari spesimen yang diujikan.



Gambar 2.11 Kurva S-N Aluminium 6061-T6 Aluminum Alloy

Sumber : Dowling (2012, p.439)



Gambar 2.12 Contoh kurva S-N pada baja

Sumber : Hasegawa (1997)

Pada beberapa material, kurva *S-N* menjadi horizontal pada tegangan rendah yang menunjukkan bahwa material tidak akan mengalami kegagalan *fatigue* dengan tegangan di bawah batas tersebut. Tegangan maksimum yang dapat diberikan kepada suatu material tanpa mengalami kegagalan *fatigue*, tanpa memperhatikan jumlah siklus disebut dengan *endurance limit* atau *fatigue limit*.

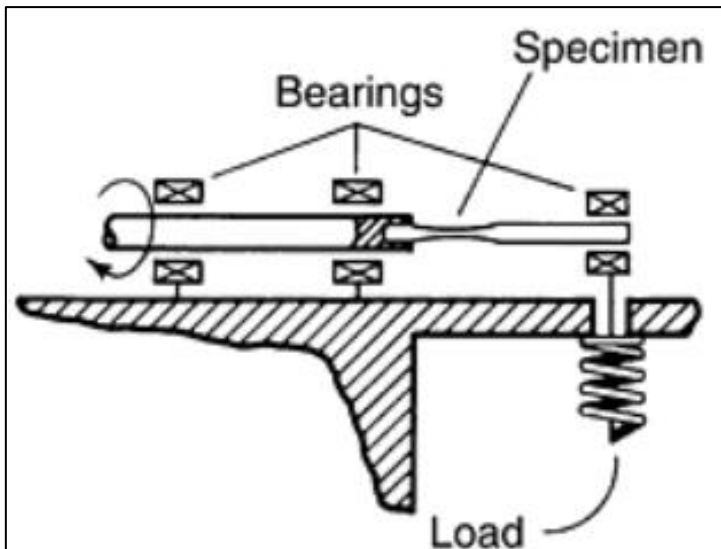
Walaupun banyak material, terutama baja, mempunyai *fatigue limit*, akan tetapi tidak dengan aluminium paduan. Pada aluminium paduan, tidak terdapat *fatigue limit* sehingga kurva *S-N* akan terus cenderung kebawah. *Fatigue limit* pada logam dapat dikaitkan dengan tegangan maksimum logam tersebut.

Prosedur untuk membuat kurva *S-N* adalah sebagai berikut :

1. Menguji spesimen pertama dengan tegangan tinggi dimana kegagalan diharapkan terjadi pada jumlah siklus yang pendek.
2. Kemudian tegangan pada pengujian dikurangi pada tiap spesimen sampai satu atau dua spesimen tidak mengalami kegagalan pada suatu siklus tertentu.
3. Tegangan tertinggi pada spesimen yang tidak mengalami kegagalan dianggap sebagai *fatigue limit*.
4. Untuk material yang tidak memiliki *fatigue limit* pengujian biasanya dibatasi untuk pertimbangan praktis pada tegangan yang rendah dengan usia berkisar antara 10^8 atau 5×10^8 .
5. Kurva *S-N* biasanya ditentukan dengan menggunakan 5 hingga 10 spesimen. Hal tersebut akan membuat persebaran pada hasilnya, walaupun dapat digambar sebuah kurva yang halus tanpa banyak kesulitan.

2.6.2 Rotating Cantilever Bending Fatigue Tester

Rotating cantilever bending fatigue tester merupakan alat uji kekuatan lelah yang mempunyai prinsip kerja pembebanan pada spesimen uji yang berputar. Pembebanan yang diberikan pada alat ini bervariasi tergantung pada nilai kekuatan tarik suatu spesimen pengujian. Putaran yang diberikan pada spesimen pengujian adalah konstan, sehingga gaya putar dan torsi yang dikenakan pada spesimen uji tidak mempengaruhi proses pembebanan.



Gambar 2.13 Skema Rotating Cantilever Bending Fatigue Testing Machine
 Sumber : ASM Handbook Mechanical Testing and Evaluation Volume 8 (2000)

2.7 Heat Input

Jumlah energi panas yang dihasilkan dari gesekan dua benda pada pengelasan las gesek adalah fungsi dari putaran yang digunakan, tekanan dan koefisien gesek. Nilai dari energi yang masuk ($d\dot{Q}$) didekati dengan persamaan akibat gaya gesek yang ditimbulkan sebagai berikut :

$$d\dot{Q} = \omega \cdot dT \quad (W) \dots\dots\dots (2-6)$$

ω adalah kecepatan sudut dan dT adalah perbedaan momen torsi pada radius. dT dapat diperoleh dengan :

$$dT = r \cdot dF_{friction} (Nm) \dots\dots\dots (2-7)$$

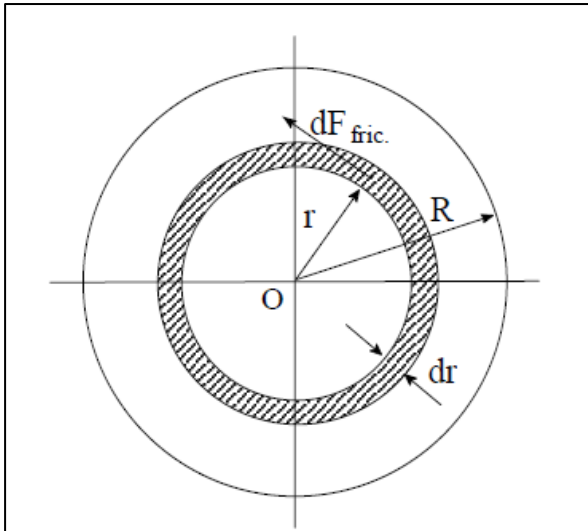
$dF_{friction}$ merupakan gaya gesek antara spesimen pada permukaan dr dan r adalah radius spesimen. Dapat diteruskan bahwa gaya gesekan $dF_{friction}$ sama dengan koefisien gesek dikalikan dengan gaya aksial dari tekanan P dari permukaan spesimen dengan radius dr dan dapat dirumuskan :

$$dF_{friction} = (\mu \cdot P \cdot 2\pi r \cdot dr) \dots\dots\dots (2-9)$$

Dari persamaan 2-7 dan 2-8 dapat kita substitusikan ke persamaan 2-6 menjadi :

$$d\dot{Q} = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \text{ (W)} \dots\dots\dots(2-9)$$

Diperoleh total energi dari permukaan yang bergesekan adalah panas yang timbul akibat permukaan spesimen r dan dr dari sumbu putar yang ditunjukkan seperti pada gambar.



Gambar 2.14 Skema Permukaan Spesimen yang Bergesekan
 Sumber : Can (2010)

$$\int_0^R d\dot{Q} = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \dots\dots\dots(2-10)$$

$$\dot{Q} = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot \frac{r^3}{3} \Big|_0^R \dots\dots\dots(2-11)$$

Sehingga untuk spesimen silinder pejal akan diperoleh persamaan :

$$\dot{Q} = \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \mu \cdot P \cdot R^3 \text{ (W)} \dots\dots\dots(2-12)$$

dengan :

\dot{Q} = energi pengelasan (W)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

μ = koefisien gesek aluminium

P = tekanan (N/m²)

R = radius spesimen (m)

2.8 Hipotesis

Hipotesa dalam penelitian ini adalah semakin kecil geometri tinggi kerucut baja, maka semakin tinggi juga nilai kekuatan lelah sambungan las geseknya. Dengan semakin kecilnya geometri kerucut baja maka tingkat deformasi plastis yang tinggi menyebabkan terjadinya dislokasi yang terpusat dan dengan penambahan tekanan tempa diduga menyebabkan bentuk butir menjadi lebih kecil dan lebih rapat sehingga mempengaruhi kekuatan *ultimate* yang dihasilkan menjadi meningkat dan nilai kekuatan lelahnya juga meningkat.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)