

Pengantar Teknologi Pengelasan

Amir Arifin

UNSRI PRESS

ISBN 978-623-399-173-5



9 786233 991735

Pengantar Teknologi Pengelasan

Amir Arifin

UPT. Penerbit dan Percetakan
Universitas Sriwijaya 2024
Kampus Unsri Palembang
Jalan Srijaya Negara, Bukit Besar Palembang 30139
Telp. 0711-360969
email : unsri.press@yahoo.com, penerbitunsri@gmail.com
website : www.unsri.unsripress.ac.id

Anggota APPTI No. 005.140.1.6.2021
Anggota IKAPI No. 001/SMS/96

84 halaman : 15.5 x 23 cm

Hak cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Hak Terbit Pada Unsri Press



ISBN 978-623-399-173-5



DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
PRAKATA	x
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Jenis Proses Pengelasan	2
1.2 Oxyfuel-gas welding.....	4
1.3 Las Busur	7
1.3.1 Arc-welding Process: Nonconsumable electrode	7
1.3.2 Arc-welding Processes: Consumable Electrode	10
BAB 2 PERPINDAHAN PANAS LAS.....	17
2.1 Sumber energi	17
2.2 Kerapatan energy (<i>energy density</i>) dan distribusi energy (<i>energy distribution</i>)	18
2.3 Masukan Panas (heat input)	18
2.4 Efek pengaruh variable pengelasan pada daerah penyebaran panas	24
2.5 Kerugian energy selama proses pengelasan.....	24
2.6 Siklus Thermal	25
2.7 Laju pendinginan (<i>Cooling Rates</i>)	27
2.8 Waktu pendinginan.....	28
BAB 3 TEGANGAN SISA.....	31
3.1 Analisis Residual Stress.....	34
BAB 4 CACAT LAS.....	36
4.1 Retak Panas (hot cracking).....	36
4.2 Cold Cracking.....	39
4.3 Distorsi	40
BAB 5 DASAR-DASAR METALURGI LAS	47
5.1 Fusion Zone	47
5.2 Weld interface	48
5.3 Heat affected zone	48
5.4 Unaffected base metal zone	49
5.5 Kemampuan Las Baja (<i>weldability of steels</i>).....	50
5.6 Dasar-Dasar Pembekuan Logam Cair	52
BAB 6 FILLER METAL.....	55
Elektroda pengelasan busur	58
BAB 7 FRICTION WELDING.....	61
1.1 Pengelasan Tekan (<i>Solid-State Welding</i>)	62
1.2 Pengelasan Gesek (<i>Friction Welding</i>).....	64

1.3	Pengelasan Gesek Rotasi (<i>Rotary Friction Welding</i>).....	64
1.4	Teknologi <i>Friction Welding</i>	66
1.4.1	Proses <i>Direct Drive Welding</i>	67
1.4.2	Proses <i>Inertia Drive Welding</i>	69
1.5	Kelebihan dan Kekurangan <i>Friction Welding</i>	70
1.5.1	Kelebihan	70
1.5.2	Kekurangan.....	71
1.6	Daerah <i>Heat Affected Zone</i> dan <i>Fusion Zone</i>	71
1.7	<i>Friction Welding</i> Untuk Material Sejenis (<i>Similar Metals</i>).....	74
1.8	Aplikasi <i>Friction Welding</i>	79
1.9	Kombinasi Material Pada <i>Friction Welding</i>	80
DAFTAR BAHAN BACAAN.....		83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Aplikasi Pengelasan ada tangki Penyimpanan Avtur	1
Gambar 2 . Komponen utama pengelasan busur	2
Gambar 3 Jenis nyala pada oxyacetylene-gas welding (a) neutral flame; (b) oxidizing flame; (c) carburizing, or reducing, flame dan (d) prinsip umum proses pengelasan oxyacetylene-gas welding	5
Gambar 4 Peralatan yang digunakan pada oxyacetylene-gas welding	6
Gambar 5 Pengaruh dari polaritas dan jenis arus (a) Arus DC dengan polaritas lurus; (b) Arus DC dengan polaritas terbalik dan (c) arus AC	8
Gambar 6. Skema pengelasan Gas tungsten-arc welding process yang juga dikenal sebagai pengelasan TIG	10
Gambar 7 Ilustrasi pengelasan SMAW	11
Gambar 8 Ilustrasi pengelasan submerged-arc welding (SAW) (a) proses pengelasan dan (b) daerah pengelasan	12
Gambar 9 Skema pengelasan gas metal-arc welding dikenal sebagai MIG (metal inert-gas) (b). Peralatan dasar dalam pengelasan MIG	13
Gambar 10 Skema pengelasan Flux-Core Arc Welding	14
Gambar 11 Peralatan yang digunakan pada pengelasan electroslag-welding ..	15
Gambar 12 Efisiensi sumber panas pada beberapa proses pengelasan	19
Gambar 13 Sistem koordinat (x,y,z) dengan sumber panas yang bergerak	21
Gambar 14 Kerugian energi pengelasan dari sumber energi ke benda kerja	25
Gambar 15. Tegangan Termal: (a) selama pemanasan; (b) selama pendinginan dan (c) tegangan sisa pada sambungan las	31
Gambar 16. Mekanisme tegangan sisa dari tiga batang	32
Gambar 17. Distribusi longitudinal (s_x) dan melintang (s_y) tekanan residual dalam butt weld	34
Gambar 18. Hasil pengukuran dan distribusi residual stress pengelasan butt joint dari Aluminium 5083	35
Gambar 22. Potongan melintang retak centerline	37
Gambar 23. Mekanisme retak Panas pada pengelasan Al-3%Si	37
Gambar 19. Distorsi pada struktur yang dilas. Dimodifikasi dari Welding Handbook	41
Gambar 20. Distorsi pada butt weld aluminium 5083 dengan ketebalan 6,4–38mm. Reprinted from Gibbs (6). Courtesy of American Welding Society.	41
Gambar 21. Pengurangan sudut distorsi dengan mengurangi volume logam las dengan menggunakan single-pass deep-penetration welding	41
Gambar 24. Pembagian Zona pada pengelasan Fusi	47
Gambar 25. Hubungan antara diagram fase Fe-Fe ₃ C dan struktur mikro di HAZ dari baja karbon	48
Gambar 26. Different zones in a steel weld VS Iron-Carbon equilibrium diagram	49
Gambar 27. Diagram Graville untuk baja	52
Gambar 28. Pembekuan epitaxial dalam pengelasan fusi	53

Gambar 29. Menunjukkan variasi dari mikrostruktur logam yang dipengaruhi gradient temperature dan growth rate.....	53
Gambar 30. Perbandingan geometri weld pool yang terbentuk terhadap kecepatan pengelasan; (a). lambat, (b) menengah dan (c) cepat. .	54
Gambar 31. Filler metal yang biasa digunakan pada proses pengelasan	55
Gambar 32. Jenis-jenis Solid-State Welding.....	63
Gambar 33. Jenis-jenis Friction Welding.....	64
Gambar 34. Proses rotary friction welding.....	65
Gambar 35. Skema proses direct drive welding	67
Gambar 36. Skema proses inertia drive welding.....	69
Gambar 37. Bagian – bagian material hasil friction welding	72
Gambar 38. Skematik pengaruh parameter pengelasan pada material sejenis (similar).....	73
Gambar 39. Friction welding antara aluminium dengan baja	76

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai energi spesifik untuk melebur material las per unit volume	9
Tabel 2. Sifat-sifat Termal beberapa jenis material	23
Tabel 3. Jenis-jenis Flux	56
Tabel 4. Parameter <i>inertia drive friction welding</i> dengan diameter benda kerja 1 inch (ASM Handbook)	75
Tabel 5. Parameter untuk <i>inertia drive friction welding</i> untuk material tidak sejenis pada diameter benda kerja 1 inch (ASM Handbook)	76

PRAKATA

Pengelasan merupakan metode penyambungan logam yang telah sangat umum digunakan dari Industri-industri kecil hingga industry berskala besar. Semakin berkembang pesatnya industri seperti maritim, penerbangan, kimia, dan automotif telah memberikan dampak dalam pada perkembangan dunia pengelasan.

Materi yang disajikan dalam buku Pengantar Teknologi Pengelasan ini berisi dasar-dasar pengetahuan tentang proses pengelasan seperti; Metode-metode pengelasan, perpindahan panas dalam proses pengelasan, metalurgi pengelasan dan cacat-cacat yang muncul setelah pengelasan.

Materi-materi yang disampaikan didalam buku ini diharapkan dapat menjadi pengetahuan dasar untuk mendalami bidang pengelasan yang telah berkembang pesat.

Akhir kata, semoga buku ini dapat mendatangkan manfaat bagi para mahasiswa dan pembaca lain. Penyusun sangat mengharapkan saran dari semua pihak demi penyempurnaan buku ini pada edisi berikutnya dan juga dalam membuat buku lanjutannya.

Palembang, 29 Nopember 2023

Penyusun,

BAB 1 PENDAHULUAN

Pengelasan dapat didefinisikan sebagai pencairan sebagian dua buah material dengan menggunakan panas dengan tujuan untuk melakukan penyambungan baik disertai dengan logam pengisi (*filler metal*) atau tidak selama proses pengelasan.

Pengelasan melibatkan perpaduan atau penyambungan sebagian permukaan dari dua bagian logam. Pengelasan banyak di aplikasikan pada berbagai bidang seperti;

- Kontruksi bangunan dan jembatan
- Jaringan perpipaan, *pressure vessel*, *boiler* dan tangki-tangki penyimpanan
- Industri galangan kapal
- Industri penerbangan dan dirgantara
- Industri otomotif dan perkeretaapian

Selain itu banyak lagi jenis industri dan pekerjaan yang melibatkan teknologi pengelasan, sebagian besar proses pengelasan banyak dilakukan di pabrik-pabrik namun ada beberapa metode pengelasan seperti *arc welding* and *oxyfuel gas welding* sering digunakan tidak hanya didalam pabrik tetapi juga pada site kontruksi, galangan kapal dan bengkel-bengkel perbaikan kendaraan otomotif. Gambar 1. Menunjukkan aplikasi proses pengelasan pada instalasi penyimpanan dan distribusi minyak.



Gambar 1. Tangki Penyimpanan Avtur yang dibangun dengan Proses pengelasan

Pengelasan biasanya dilakukan pada bagian yang terbuat dari logam yang sama, tetapi beberapa operasi pengelasan dapat digunakan untuk bergabung dengan logam yang berbeda.

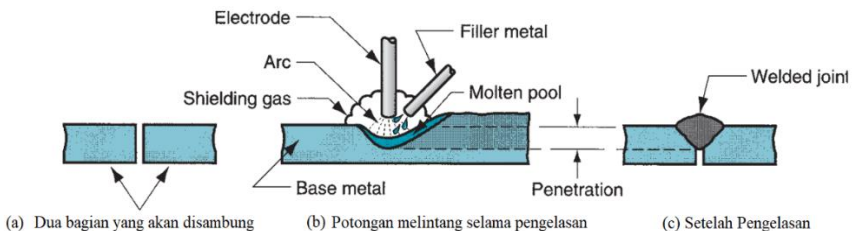
1.1 Jenis Proses Pengelasan

Sekitar 50 jenis operasi pengelasan yang berbeda telah di data oleh *American Welding Society*. Mereka menggunakan berbagai jenis atau kombinasi energi untuk menyediakan daya yang dibutuhkan. Kita dapat membagi proses pengelasan menjadi dua kelompok besar:

- (1) Pengelasan fusi (*fusion welding*)
- (2) Pengelasan solid-state (*solid-state welding*).

Proses pengelasan fusi menggunakan panas untuk mencairkan logam induk. Dalam banyak operasi pengelasan fusi, logam pengisi (*filler*) ditambahkan ke dalam *groove* untuk memfasilitasi proses dan memberikan kekuatan pada sambungan las. Operasi pengelasan fusi di mana tidak melibatkan logam pengisi yang ditambahkan disebut sebagai *autogenous weld*. Proses pengelasan fusi merupakan metode pengelasan yang paling banyak digunakan dan dapat dikategorikan menjadi berapa grup.

Arc welding (AW): Merupakan metode pengecoran dimana pemanasan dari logam berasal dari busur listrik. Dalam beberapa operasi pengelasan busur kadang kala disertai tekanan selama proses berlangsung.



Gambar 2 . Komponen utama pengelasan busur (Groover, 2007)

Resistance welding (RW), merupakan metode pengelasan dengan mengandalkan panas yang dibangkitkan dari tahanan listrik (*electrical*

resistance) yang dialirkan ke permukaan logam induk yang akan disambung.

Oxyfuel gas welding (OFW), proses penggabungan ini menggunakan gas oxyfuel, seperti campuran oksigen dan acetylene, untuk menghasilkan nyala panas untuk melelehkan logam dasar dan logam pengisi yang digunakan.

Solid-state welding, merupakan proses penyambungan yang dihasilkan baik dari penekanan maupun kombinasi dari panas dan tekanan. Jika panas digunakan, temperatur dalam proses harus berada dibawah *melting point* dari material yang akan dilas. Dalam proses pengelasan ini tidak menggunakan logam pengisi. *Solid-state welding* dapat di kategorikan menjadi;

Diffusion welding (DFW); Dua permukaan material yang akan disambung dipertemukan dan ditahan dibawah tekanan pada temperature tinggi kedua material akan mengalami difusi (*solid-state diffusion*). Proses pengelasan difusi berlangsung dimana material tidak mencapai titik lelehnya yang membedakannya dari metode pengelasan fusi. Karakteristik ini memungkinkan pengelasan difusi dapat diterapkan pada material dengan titik leleh tinggi atau yang rentan terhadap distorsi termal. Proses ini umumnya digunakan dalam industri di mana kekuatan tinggi dan sambungan performansi tinggi diperlukan, seperti pada aplikasi kedirgantaraan dan otomotif. Sambungan yang dihasilkan sering ditandai dengan distorsi termal yang minimal dan integrity yang tinggi.

Friction welding (FRW); Penyambungan dua material dicapai oleh panas gesekan antara dua permukaan yang akan disambung. Pengelasan gesekan adalah proses serbaguna yang digunakan untuk berbagai bahan, termasuk logam dan termoplastik, beberapa keuntungan FRW antara lain adalah: Prosesnya relatif cepat dan dapat menghasilkan sambungan las dalam hitungan detik.

Friction welding tidak memerlukan penggunaan bahan pengisi/filler, mengurangi risiko cacat dan kontaminasi. Kekuatan dan kualitas sambungan las sangat baik dan bebas cacat. Friction welding dapat juga digunakan pada material yang berbeda komposisi dan sifat thermalnya.

Pengelasan ini banyak dijumpai pada komponen automotive dan aerospace

Ultrasonic welding (USW); Tekanan moderat diterapkan diantara dua bagian dan gerakan berosilasi pada frekuensi ultrasonik digunakan dalam arah sejajar dengan permukaan yang bersentuhan. Kombinasi gaya normal dan getaran menghasilkan tekanan geser yang menghilangkan lapisan permukaan dan mencapai ikatan atomik permukaan.

1.2 Oxyfuel-gas welding

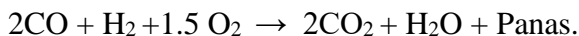
Oxyfuel-gas welding umumnya untuk menggambarkan proses pengelasan menggunakan fuel gas yang dicampur dengan oksigen untuk menghasilkan nyala api. Nyala adalah sumber panas yang digunakan untuk mencairkan metal pada sambungan. Umumnya proses pengelasan ini menggunakan gas acetylene dan biasa juga disebut sebagai oxyacetylene-gas welding.

Metode ini dikembangkan diawal tahun 1900 dimana panas dibangkitkan oleh pembakaran gas acetylene (C_2H_2) yang dicampur dengan oksigen. Reaksi proses pembakaran yang berlangsung terdiri dari dua zona adalah sebagai berikut:

1. Daerah pembakaran primer atau primary combustion yang menghasilkan $\frac{1}{3}$ dari total panas pembakaran sempurna yang merupakan *inner core* dari nyala



2. Daerah pembakaran sekunder yang terjadi setelah pembakaran primer berlangsung, reaksi pembakaran ini merupakan proses pembakaran hydrogen dan karbon monoksida yang menghasilkan $\frac{2}{3}$ dari total panas nyala.



Pada proses pengelasan oxyacetylene-gas welding ini temperature dapat dicapai hingga 3300 °C. Dalam proses pengelasan ini sifat nyala api dapat dibagi menjadi;

1. Netral (*neutral flame*)

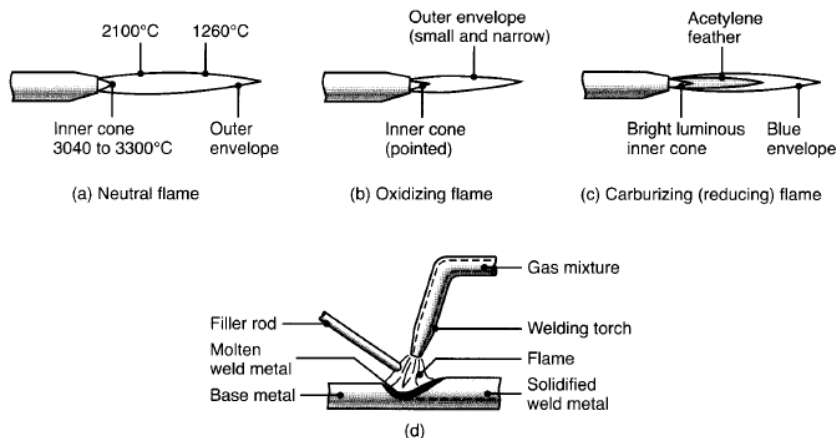
Nyala ini terjadi jika jumlah gas C_2H_2 dan O_2 bereaksi sesuai dengan perbandingan stoichiometri yaitu dengan rasio 1:1.

2. Reduksi (*reducing flame*)

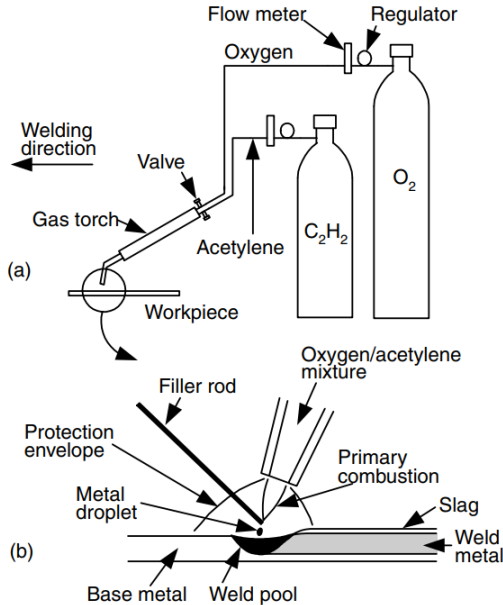
Nyala ini terjadi kelebihan C_2H_2 sehingga pembakaran menjadi tidak sempurna. Nyala api ini biasanya digunakan untuk pengelasan alumunium, magnesium dan juga digunakan untuk mencegah terjadinya lepasnya karbon dari baja (*decarburation*).

3. Oksidasi (*oxidixing flame*)

Nyala ini terjadi jika kelebihan oksigen sehingga terjadi pembakaran yang tidak sempurna. Penggunaan nyala ini biasa diaplikasikan pada pengelasan material yang mempunyai unsur-unsur yang mudah menguap seperti zinc atau kuningan



Gambar 3, Jenis nyala pada oxyacetylene-gas welding (a) neutral flame; (b) oxidizing flame; (c) carburizing, or reducing, flame dan (d) prinsip umum proses pengelasan oxyacetylene-gas welding



Gambar 4. Peralatan yang digunakan pada oxyacetylene-gas welding (Sumber: Welding Metallurgy)

Pada pengelasan ini mempunyai kelebihan pada peralatan yang sederhana, murah serta mudah dipindahkan sehingga banyak digunakan untuk tujuan pemeliharaan dan reparasi. Sedangkan kekurangan dalam metode ini masukan panas (*heat input*) dan kecepatan pengelesan yang rendah sedangkan q/v tinggi maka daerah terpengaruh panas atau *heat affected zone* (HAZ) menjadi lebar dan mudah terjadi penyimpangan (distorsi) pada sambungan. Selain gas acetylene, gas hydrogen dan methylacetylene propadine juga digunakan pada pengelasan ini. Namun temperatur yang dicapai tidak setinggi apabila menggunakan acetylene sehingga cocok untuk pengelasan pada material yang mempunyai temperatur cair yang rendah atau pada bagian yang tipis atau kecil.

1.3 Las Busur

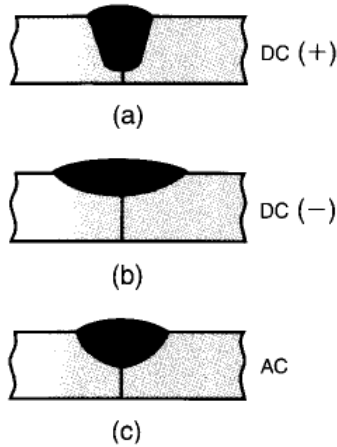
1.3.1 Arc-welding Process: Nonconsumable electrode

Pengelasan busur dikembangkan pada pertengahan tahun 1800, panas yang dibangkitkan pada pengelasan ini di dapat dari energy listrik. Pada proses ini melibatkan dua jenis elektroda consumable dan nonconsumable. Temperatur yang dapat dicapai dengan metode ini dapat mencapai sekitar 30,000°C.

Proses pengelasan busur nonconsumable electrode biasanya menggunakan tungsten electrode karena melibatkan temperature yang tinggi sehingga memerlukan gas pelindung (shielding gas) untuk mencegah oksidasi.

Sumber arus yang digunakan dapat berupa AC atau DC, untuk sumber arus searah (DC) ada 2 jenis polaritas yaitu;

1. Polaritas lurus atau *direct current straight polarity* (DCSP), jika logam induk dihubungkan dengan kutub positif sumber daya (*power supply*). Polaritas ini dinamakan juga *direct current electrode negative* (DCEN). Electron dari elektroda ini mengalir ke benda kerja dengan kecepatan tinggi sehingga menghasilkan panas tinggi pada benda kerja. Hal ini menyebabkan penetrasi yang dalam pada kolam las cair (weld pool), seperti ditunjukkan pada Gambar 5.
2. Polaritas balik atau *direct current reverse polarity* (DCRP), jika logam induk dihubungkan dengan kutub negative power supply atau disebut juga *direct current electrode positive* (DCEP). Polaritas balik menyebabkan kolam las cair menjadi lebar dan dangkal. Metode ini biasanya digunakan untuk pengelasan logam yang mudah teroksidasi seperti Al dan Mg.



Gambar 5 Pengaruh dari polaritas dan jenis arus (a) Arus DC dengan polaritas lurus; (b) Arus DC dengan polaritas terbalik dan (c) arus AC

Arus bolak balik (AC) banyak digunakan pada *power supply* yang modern dengan kemampuan membentuk gelombang square-wave AC dan wave balancing. Keuntungan pemakaian arus bolak balik gelombang persegi adalah untuk menghindari terjadinya arus nol pada daerah transisi (+) dan (-) sehingga busur akan lebih stabil.

Perpindahan panas pada Pengelasan busur.

Heat input atau masukan panas pada pengelasan busur dapat di deskripsikan sebagai

$$\frac{H}{l} = e \frac{VI}{v}$$

Dimana

H = Heat input (J atau BTU)

l = Panjang pengelasan

V = Voltase

I = Arus

e = efisiensi dari proses ($\pm 70\%$ untuk shielded metal-arc welding, $\pm 90\%$ untuk gas metal metal arc welding dan submerged-arc welding)

sedangkan heat input H untuk mencairkan material yang dilebur dapat diekspresikan sebagai:

$$H = u V_m = u Al$$

Dimana

- u = Energi spesifik (table 1)
 V_m = volume material yang melebur
 A = penampang melintang sambungan las

Sedangkan untuk menghitung kecepatan pengelasan adalah :

$$v = e \frac{VI}{uA}$$

Tabel 1. Nilai energi spesifik untuk melebur material las per unit volume

Jenis Material	Energi spesifik, u (J/mm ³)
Aluminum and its alloys	2.9
Cast irons	7.8
Copper	6.1
Bronze (90Cu-10Sn)	4.2
Magnesium	2.9
Nickel	9.8
Steels	9.1-10.3
Stainless steels	9.3-9.6
Titanium	14.3

Sebuah proses pengelasan akan dijalankan dengan parameter proses $V = 20$ volts, $I = 200$ A dan mempunyai potongan melintang sambungan las 30 mm^2 . Hitunglah kecepatan pengelasan jika benda kerja dan elektroda terbuat dari Aluminium. Gunakan efisiensi pengelasan 75%.

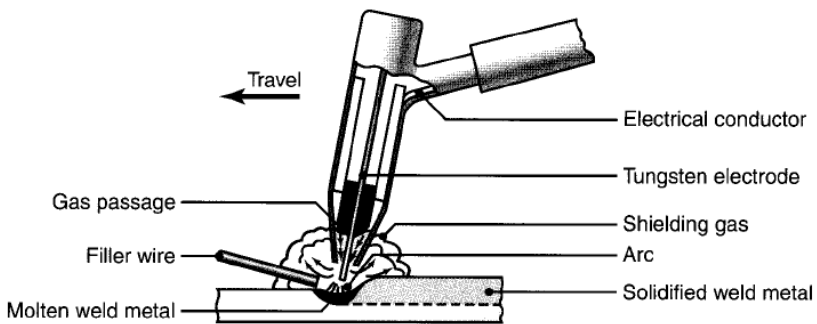
Penyelesaian;

Berdasarkan Tabel 1 energi specific aluminium adalah 2.9 J/mm^3 :

$$v = e \frac{VI}{uA}$$
$$v = (0.75) \frac{(20)(200)}{(2.9)(30)} = 34.5 \text{ mm/s}$$

Gas Tungsten-arc Welding.

Gas Tungsten-arc Welding (GTAW) dikenal juga dengan sebagai pengelasan TIG (*tungsten inert gas*) logam pengisi disuplai dari kawat filler yang mempunyai komposisi yang sama dengan material yang akan dilas. Sedang elektroda tungsten sendiri tidak di konsumsi selama proses pengelasan. Dalam pengelasan ini flux tidak digunakan sedangkan gas pelindung yang digunakan adalah argon atau helium. Pengelasan GTAW kadangkala filler tidak digunakan apabila melakukan pengelasan terhadap celah yang sempit.



Gambar 6. Skema pengelasan Gas tungsten-arc welding process yang juga dikenal sebagai pengelasan TIG

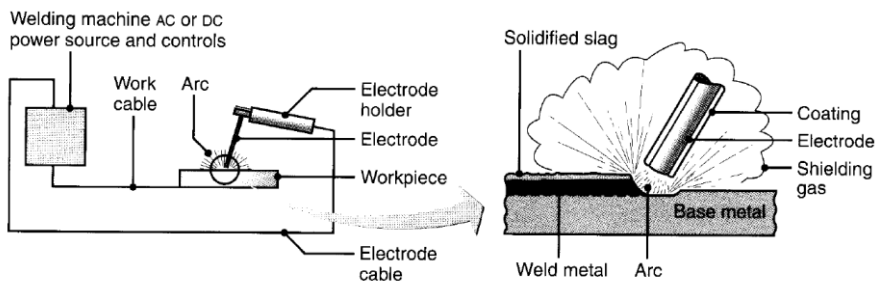
Sumber tenaga yang dipakai pada pengelasan ini menggunakan arus DC pada 200 A atau AC pada 500 A. Umumnya arus AC digunakan untuk melakukan pengelasan alumunium dan magnesium karena dapat berfungsi membersihkan oksida dan meningkatkan kualitas sambungan las. Pengelasan GTAW telah digunakan secara luas pada berbagai aplikasi metal seperti pada alumunium, magnesium, titanium dan logam refraktori. Pengelasan ini juga sangat sesuai untuk pengelasan logam-logam yang tipis. Penggunaan gas inert pada proses ini membuat proses ini relative cukup mahal dibandingkan pengelasan SMAW tetapi dapat menghasilkan sambungan las dengan kualitas tinggi.

1.3.2 Arc-welding Processes: Consumable Electrode

Pengelasan busur yang menggunakan elektroda konsumable ada beberapa jenis :

Shielded metal-arc welding (SMAW)

Shielded metal-arc welding (SMAW) tergolong jenis pengelasan yang paling tua, simple dan paling banyak digunakan pada berbagai macam aplikasi. Busur listrik dibangkitkan dengan menyentuhkan ujung dari elektroda terbungkus dengan benda kerja dan menariknya untuk sebuah jarak yang ideal untuk menghasilkan busur. Elektroda berbentuk batang kawat pengelasan ini juga dikenal sebagai *stick welding*



Gambar 7 Ilustrasi pengelasan SMAW

Pengelasan SMAW mempunyai beberapa kelebihan antara lain peralatan relative sederhana dan penggunaan bermacam-macam jenis elektroda yang lebih kecil. Peralatan umumnya terdiri atas; power supply, kabel, dan pemegang elektroda. Pengelasan SMAW umumnya digunakan pada aplikasi kontruksi secara umum, pembangunan kapal, jalur pipa dan pekerjaan-pekerjaan perbaikan. SMAW secara umum sesuai digunakan pada benda kerja yang mempunyai ketebalan 3 sampai dengan 19 mm, walaupun begitu pengelasan dengan ketebalan diluar itu dapat dilakukan dengan skill operator mulalui teknik multiple-pass.

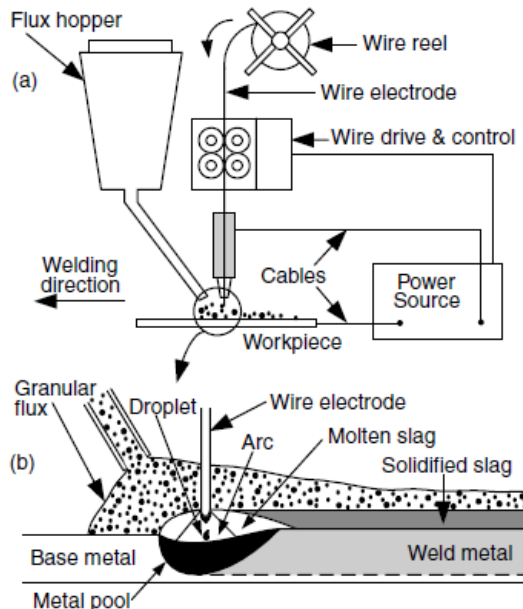
Submerged-arc Welding

Submerged-arc welding (SAW) merupakan pengelasan busur dengan pelindung yang terdiri atas lime, silica, manganese oxide, calcium fluoride dan lainnya. Flux tersebut dialirkan kedalam daerah pengelasan (weld zone) dari sebuah hopper dengan aliran gravitasi dengan sebuah nozzle. Seperti ditunjukkan pada Gambar 8.

Flux tersebut akan membuat lapisan terhadap logam cair, selain sebagai pelindung butiran-butiran logam cair (droplet) yang berasal dari ujung elektroda yang mencair dan jatuh ketempat sambungan. flux juga berfungsi sebagai isolator panas sehingga meningkatkan penetrasi panas dari pengelasan ke benda kerja.

Elektroda konsumabel adalah sebuah koil dengan gulungan kawat dengan diameter 1.5 sampai 10 mm. arus listrik yang digunakan antara 300 hingga 2000 A dengan tegangan yang digunakan dapat mencapai 440 V. Kecepatan pengelasan SAW sendiri dapat mencapai hingga 5 m/min dengan kualitas sambungan lasan yang sangat baik dari segi ketangguhan, keuletan dan keseragaman sifat.

Karena flux pada SAS mengalir menggunakan gaya gravitasi sehingga pengelasan dibatasi pada posisi datar atau posisi horizontal. Dari segi produktifitas, SAW dapat digolongkan sebagai pengelasan yang mempunyai produktifitas yang tinggi.

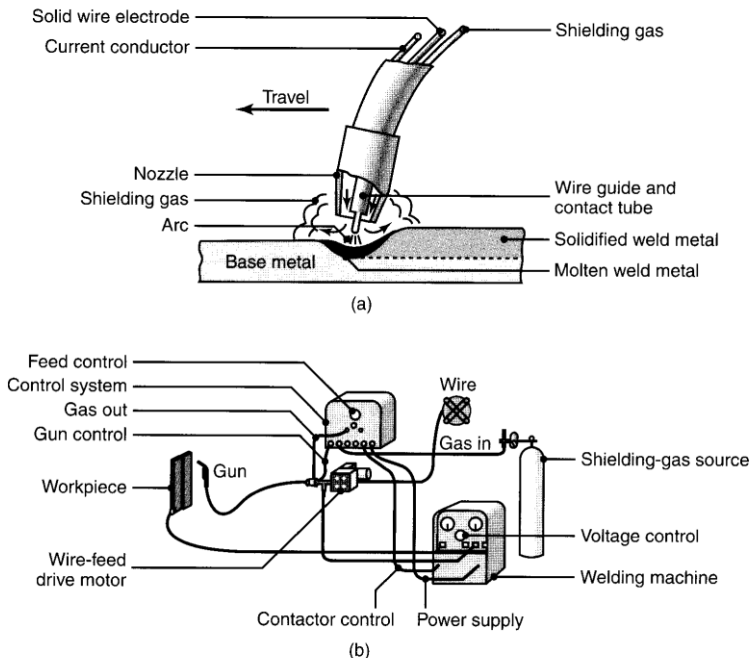


Gambar 8 Ilustrasi pengelasan submerged-arc welding (SAW) (a) proses pengelasan dan (b) daerah pengelasan

Gas Metal-arc Welding

Gas metal-arc welding (GMAW), dikembangkan pada tahun 1950 dan dikenal sebagai pengelasan “MIG” (*metal inert-gas*). Daerah pengelasan dilindungi oleh gas inert yaitu argon, helium, carbon dioxide, atau campuran gas lainnya. Kawat konsumabel di masukkan otomatis melalui nozel kedalam busur las dengan menggunakan motor penggerak.

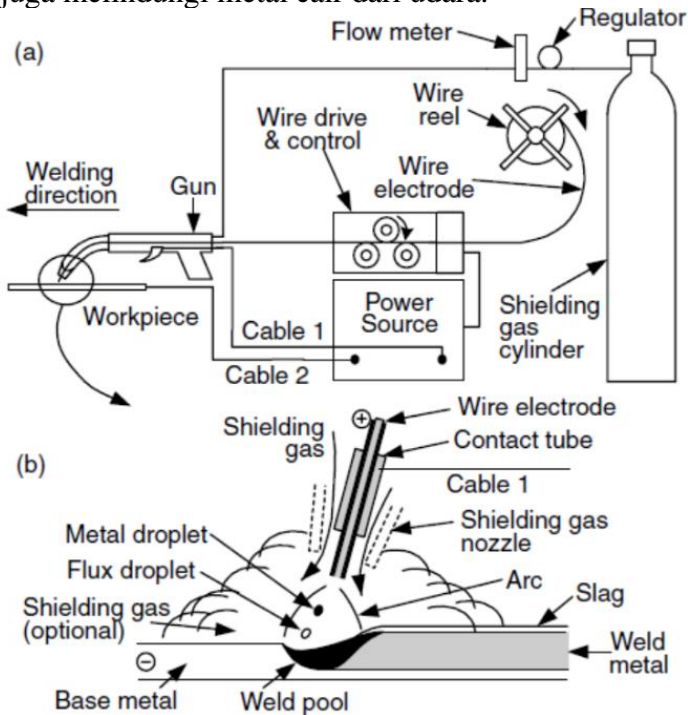
Temperatur yang dibangkitkan oleh Pengelasan GMAW cenderung relative rendah sehingga sesuai untuk melakukan pengelasan pada lembaran-lembaran tipis (*sheets*) kurang dari 6 mm. Pengelasan ini sangat banyak digunakan untuk melakukan pengelasan paduan aluminium.



Gambar 9 Skema pengelasan gas metal-arc welding dikenal sebagai MIG (metal inert-gas) (b). Peralatan dasar dalam pengelasan MIG.

Flux-Core Arc Welding

Flux-Core Arc Welding (FCAW) hampir serupa dengan GMAW seperti ditunjukkan pada kawat elektroda berintikan flux dimana elektroda adalah tabung logam dengan flux pelapis. Fungsi flux sendiri adalah sama dengan pelindung elektroda pada pengelasan SMAW termasuk juga melindungi metal cair dari udara.



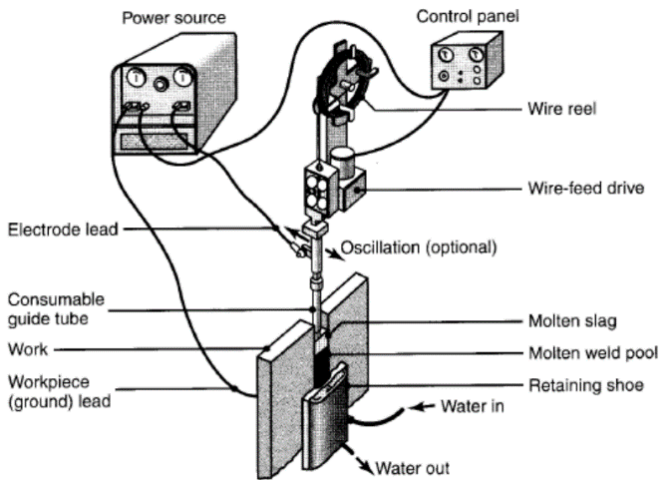
Gambar 10 Skema pengelasan Flux-Core Arc Welding

Electroslag welding (ESW)

Electroslag welding adalah proses pengelasan dimana energy panas yang diperlukan untuk melelehkan logam induk dan filler (elektroda terumpan) berasal dari terak cair yang mempunyai tahanan listrik tinggi ketika arus listrik mengalir. Pada awal pengelasan diperlukan busur listrik untuk melelehkan, selanjutnya filler dan logam induk akan meleleh didalam sepatu yang didinginkan dengan air (*water-cooled shoes*)

ESW dapat digunakan untuk melakukan pengelasan pelat dengan ketebalan dari 50 mm sampai lebih dari 900 mm dan pengelasan. Arus yang digunakan pada pengelasan ini berkisaran 600 A pada tegangan 40-50 V sedangkan kecepatan pengelasan berkisar 12 sampai 36 mm/min dengan kualitas yang baik. Pengelasan ESW digunakan pada

sambungan struktur-struktur besar seperti; mesin berat, jembatan, rig, kapal dan *nuclear-reactor vessel*.



Gambar 11 Peralatan yang digunakan pada pengelasan electroslag-welding

BAB 2 PERPINDAHAN PANAS LAS

Perpindahan panas selama proses pengelasan mempunyai peranan yang sangat vital karena dapat mempengaruhi transformasi fasa selama pengelasan berlangsung. Hal ini juga dapat berpengaruh kepada mikrostruktur dan sifat mekanik dari sambungan las. Selain itu juga perpindahan panas selama pengelasan juga dapat mempengaruhi tegangan sisa (*residual stress*) yang mengakibatkan distorsi pada sambungan las.

2.1 Sumber energi

Proses pengelasan memerlukan dua energi yang penting yaitu:

1. Energi thermal/panas
2. Energi mekanik berupa tekanan.

Sumber energy panas dapat diperoleh dari energy kimia (pembakaran gas dengan oksigen) dan energy listrik (misalnya busur listrik dan sinar intensitas tinggi).

Besarnya energi (Q) yang terkandung dalam sumber panas dinamakan tingkat energy atau kapasitas energy (*energy capacity*)

Energi pengelasan acetylene:

$$Q(w) = (48 \text{ kJ/l}_{\text{asetilene}}) \times V_{\text{asetilene}} \times (h/3600s)$$

Dimana;

$V_{\text{asetilene}}$	= debit aliran gas asetilene (1/h)
Panas Pembakaran asetilene	= 48kJ/l pada 1 atm dan 25 °C
H	= waktu dalam jam

Energi pada busur listrik

$$Q(w) = \eta \cdot E \cdot I$$

Dimana:

$$E = \text{potensial listrik}$$

I = arus listrik

η = Efisiensi sumber panas

$\eta = \frac{\text{Energi yang ditransfer benda kerja (workpiece)}}{\text{Energi yang dibangkitkan sumber panas}}$

2.2 Kerapatan energy (*energy density*) dan distribusi energy (*energy distribution*)

Kerapatan energy adalah besarnya energy yang berpindah/mengalir tiap satuan luas permukaan kontak antara sumber panas dan logam induk. Kerapatan energi dinyatakan dalam satuan Watt/m².

Distribusi energy dalam sumber panas (nyala api, busur listrik, plasma, sinar electron dan laser) tidak merata, mencapai maksimum pada pusatnya dan berkurang pada jarak yang semakin jauh dengan pusatnya sehingga menyerupai distribusi gauss

2.3 Masukan Panas (*heat input*)

Masukan panas adalah besarnya energy panas tiap satuan panjang las ketika sumber panas (yang berupa nyala api, busur listrik, plasma atau cahaya energy tinggi) bergerak.

Masukan panas: $H = P/v = EI/v$

Dimana: H = masukan panas (J/mm)

P = tenaga input (Watt)

v = kecepatan pengelasan (mm/s)

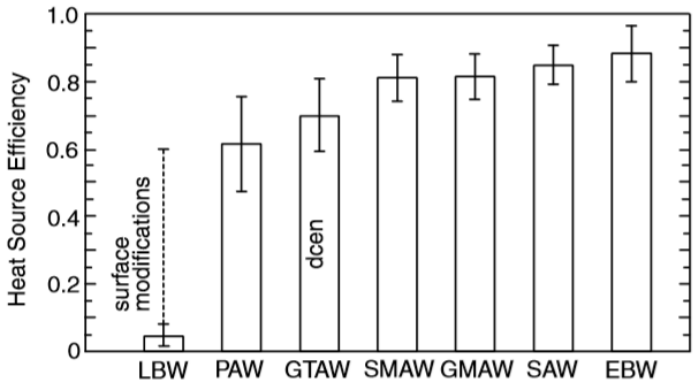
E = potensial listrik (volt)

I = arus listrik (ampere)

Pada kenyataannya, perpindahan panas dari sumber panas ke benda kerja berjalan tidak sempurna ditanadai dengan adanya panas yang hilang ke lingkungan. Besarnya panas yang hilang ini menentukan efisiensi perpindahan panas sehingga persamaan menjadi

$$H = \eta P/v = \eta EI/v$$

Dimana η adalah efisiensi perpindahan panas yang nilainya 0 dan 1 seperti ditunjukkan pada Gambar 12



Gambar 12 Efisiensi sumber panas pada beberapa proses pengelasan

Pengelasan dengan sumber panas sesaat pada kondisi tunak steady state Sumber panas sesaat pada keadaan steady state merupakan penyederhanaan pada pengelasan dimana waktu pemanasan dan pendinginan berlangsung pada waktu yang pendek seperti pada pengelasan titik. Model perpindahan panas bias dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

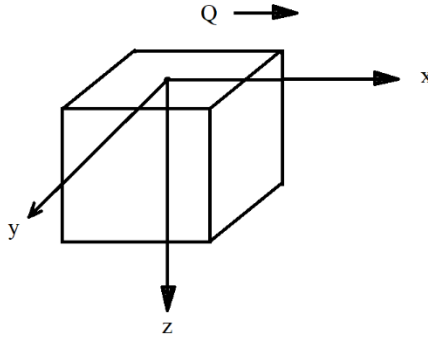
Dimana α = difusivitas
 $\alpha = k / (\rho c)$

Persamaan ini berlaku pada beberapa kasus

Sumber Panas Titik

Sumber panas Q dianggap sebagai titik yang bekerja pada permukaan benda yang ukurannya tak terbatas (infinite) dan panas mengalir pada arah x,y,z (3 dimensi)

Untuk kasus ini persamaan yang digunakan untuk distribusi suhu adalah:



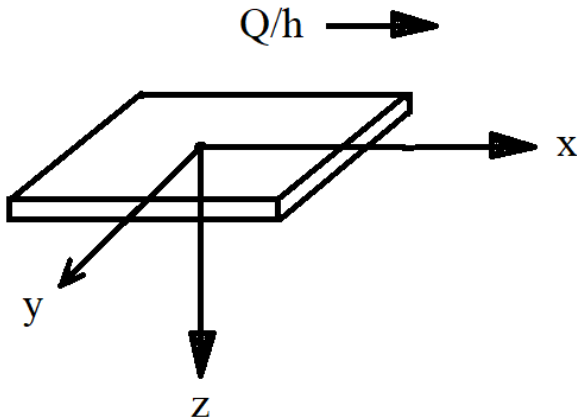
$$T - T_o = \frac{2Q}{\rho c (4\pi t)^{3/2}} e^{\frac{-R^2}{4\pi t}}$$

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

Dengan

Sumber panas berbentuk garis (*line source*)

Jika sumber panas bekerja pada plat tipis yang tak hingga (*infinite plate*) dengan ketebalan pada arah z, maka panas akan bergerak dalam 2 dimensi (X dan Z). Sumber panas garis dinyatakan dengan Q/h (energy panas tiap satuan panjang)

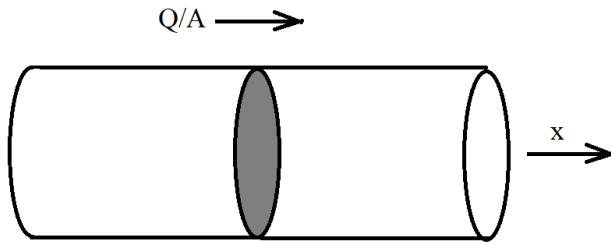


$$T - T_o = \frac{Q}{\rho h c (4\pi t)^{3/2}} e^{\frac{-r^2}{4\pi t}}$$

Dengan nilai $r^2 = x^2 + y^2$

Sumber panas bidang (*area source*)

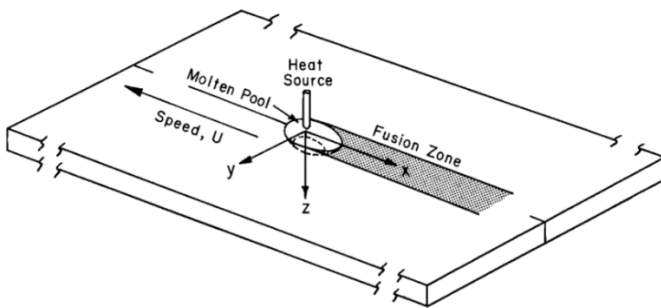
Jika sumber panas bekerja pada batang (rod) maka panas akan mengalir pada satu arah (satu dimensi). Besarnya energy panas tiap satuan luas Q/A adalah



$$T - T_o = \frac{2Q}{\rho c A (4\pi t)^{1/2}} e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}}$$

Pengelasan dengan sumber panas bergerak

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{v}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$



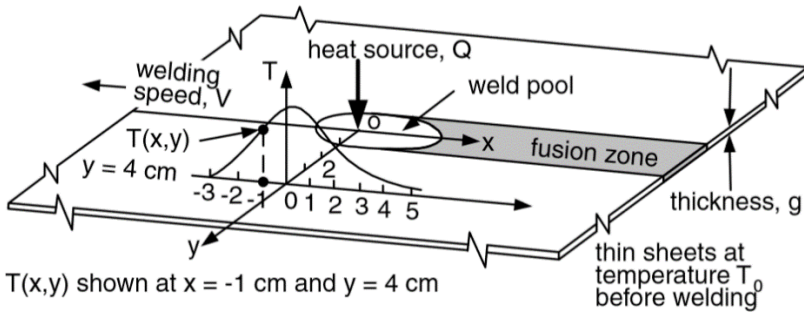
Gambar 13 Sistem koordinat (x,y,z) dengan sumber panas yang bergerak

Gambar system koordinat (x,y,z) skema pengelasan sebuah benda kerja dengan sumber panas yang mempunyai kecepatan V konstan dalam arah -x. Rosenthal telah membuat model matematika tentang aliran panas selama proses pengelasan dengan asumsi sebagai berikut:

1. Aliran panas steady state
2. Sumber panas berupa titik

3. Mengabaikan panas dari fusi
4. Sifat thermal yang konstan
5. Tidak ada panas yang terbangung dari permukaan benda kerja
6. Tidak ada konveksi pada weld pool.

Persamaan Rosenthal dua dimensi



Two-dimensional heat flow during welding of thin workpiece

Aliran panas dua dimensi

$$\frac{2\pi (T - T_0)kg}{Q} = \exp\left(\frac{Vx}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{Vr}{2\alpha}\right)$$

Dimana:

T = temperatur

T_0 = temperatur benda kerja sebelum pengelasan

k = Konduktifitas thermal benda kerja

g = ketebalan benda kerja

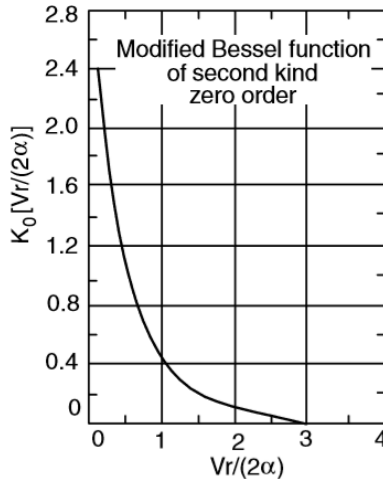
Q = perpindahan panas dari sumber panas ke benda kerja.

V = kecepatan pengelasan

α = thermal diffusivity benda kerja, yaitu; k/rC
dimana r = density dan C panas spesifik

K_0 = Fungsi Bessel

r = jarak radial, $(x^2 + y^2)^{1/2}$



Modified Bessel function of second kind and zero order

Tabel 2. Sifat-sifat Termal beberapa jenis material

Material	Thermal diffusivity, α (m ² /s)	Volume thermal capacity, ρC_s (J/m ³ K)	Thermal Conductivity, k (J/m.s.K)	Melting Point (K)
Aluminium	8.5×10^{-5}	2.7×10^6	229.0	933
Carbon steel	9.1×10^{-6}	4.5×10^6	41.0	1800
9% Ni steel	1.1×10^{-5}	3.2×10^6	35.0	1673
Austenitic stainless steel	5.3×10^{-6}	4.7×10^6	24.9	1773
Inconel 600	4.7×10^{-6}	3.9×10^6	18.3	1673
Ti alloy	9.0×10^{-6}	3.0×10^6	27.0	1923
Copper	9.6×10^{-5}	4.0×10^6	384.0	1336
Monel 400	8.0×10^{-6}	4.4×10^6	35.2	1573

Sumber : Gray et al.

Persamaan diatas dapat digunakan untuk menghitung $T(x,y)$ pada setiap lokasi pada bidang (x,y) dengan sumber panas yang bergerak pada posisi $x = 1\text{cm}$ and $y = 4\text{ cm}$ seperti pada gambar. Selain itu temperatur pada posisi lain sepanjang $y = 4\text{ cm}$ dapat dihitung.

Persamaan Rosenthal tiga dimensi

$$\frac{2\pi (T - T_0)kR}{Q} = \exp\left(\frac{-V(R - x)}{2\alpha}\right)$$

$$R = \text{Jarak radial, } (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$$

Persamaan diatas dapat menghitung temperatur dalam keadaan steady state $T(x, y, z)$, dimana sumber panas bergerak pada 'posisi benda kerja (x,y,z) dimana $x = 1$ cm, $y = 4$ cm dan $z = 0$ cm

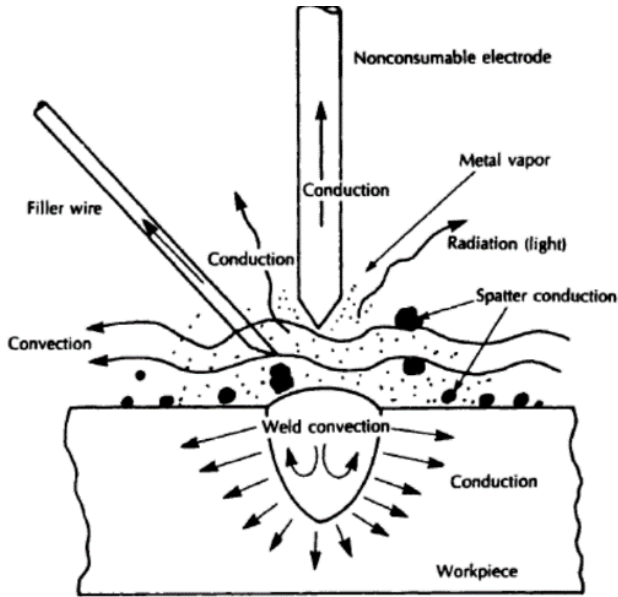
2.4 Efek pengaruh variable pengelasan pada daerah penyebaran panas

Luas daerah yang mengalami pemanasan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor:

- Peningkatan kecepatan v pada panas masukan q konstan menyebabkan daerah yang terpengaruh panas menjadi mengecil di mana garis-garis isothermis menyempit pada arah tegak lurus arah las dan memendek pada arah pengelasan.
- Kenaikan panas masukan q pada kecepatan konstan v memperluas daerah terpengaruh panas di mana garis-garis isothermis melebar pada arah tegak lurus las dan memanjang pada arah las.
- Kenaikan masukan panas q dan kecepatan v pada harga masukan panas (q/v) konstan memperluas daerah terpengaruh panas sebanding dengan panas masukan dan kecepatan.
- Kenaikan suhu preheat T_o pada masukan panas dan kecepatan konstan memperluas daerah terpengaruh panas.
- Konduktivitas termal (k) sangat mempengaruhi daerah terpengaruh panas. Jika nilai k kecil panas masukan (q) yang diperlukan saat pengelasan kecil. Sebagai akibatnya baja tahan karat austenite Cr-Ni dapat dilas dengan masukan panas yang kecil sedangkan aluminium dan tembaga membutuhkan masukan panas yang besar.

2.5 Kerugian energy selama proses pengelasan

Ketika energy ditransfer dari sumber energy ke benda kerja sewaktu pengelasan dilakukan pada kenyataannya tidak sampai secara sempurna. Ada banyak celah dimana energi akan lepas dari sumber energy ke benda kerja seperti ditunjukkan pada Gambar 14;



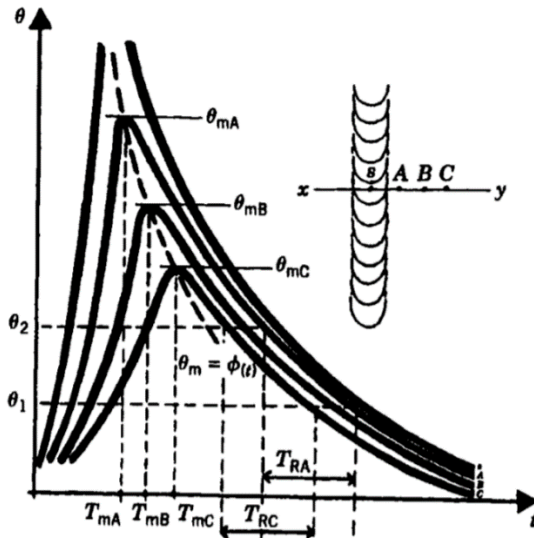
Gambar 14 Kerugian energi pengelasan dari sumber energi ke benda kerja

Energi dapat lepas melalui benda kerja itu sendiri, terjadi konveksi ke udara bebas, melalui kawat filler, radiasi, konduksi dengan elektoda itu sendiri.

2.6 Siklus Thermal

Selama proses pengelasan, kecepatan busur listrik (sumber panas) lebih besar daripada kecepatan perpindahan panas. Selain itu, kecepatan aliran panas searah dengan gerakan busur listrik lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan pada arah tegak lurus gerakan busur listrik.

Daerah disekitar las mengalami siklus termal berupa pemanasan sampai suhu maksimum pengelasan tercapai kemudian diikuti dengan proses pendinginan, seperti ditunjukkan pada Gambar 15. Bagian terpenting yang memainkan peran penting adalah pada saat masa pendinginan karena sangat mempengaruhi transformasi fasa yang akan membentuk struktur mikro pada logam las dan daerah terpengaruh panas



Gambar 15. Siklus termal proses pengelasan

2.7 Suhu Temperatur (Peak Temperature)

Untuk memprediksi atau menginterpretasikan transformasi metalurgi yang terjadi berkaitan dengan masalah; peleburan, pembentukan austenite (*austenitization*), rekristalisasi dan lainnya pada daerah dimana posisi wilayah material padat terdekat dengan wilayah lasan. Memerlukan informasi seperti; temperature maksimum pada lokasi tertentu. Suhu maksimum ini dapat dihitung dengan persamaan berikut ini;

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{(2\pi e)^{0.5} \rho c h y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_o}$$

Dimana:

T_p = suhu maksimum (K)

T_o = suhu awal las (K)

e = bilangan natural

ρ = masa jenis (g/mm^3)

c = panas jenis logam induk ($J/(gK)$)

h = tebal logam induk (mm)

y = sama dengan nol pada batas las, dimana $T_p = T_o$

T_m = suhu cair logam induk (K)

H_{net} = masukan panas (J/mm)

Dimana $H_{net} = q/v$ (J/m)

Sedangkan panas atau energi untuk sebuah las busur adalah

$$Q = \eta EI$$

Selain dari itu lebar dari daerah terpengaruh panas (*heat-affected zone*) akibat proses pengelasan dapat dihitung menggunakan persamaan tersebut.

2.7 Laju pendinginan (*Cooling Rates*)

Struktur akhir metallurgi las dari sambungan las sangat dipengaruhi laju pendinginan dari suhu maksimum selama proses pengelasan. Laju pendinginan akan mempengaruhi kekasaran, kehalusan dan keseragaman dari struktur mikro. Kecepatan pembekuan yang terlalu cepat pada baja akan menyebabkan terbentuknya struktur mikro martensit yang bersifat keras dan getas. Selain itu juga mempengaruhi pembentukan dan sebaran fasa penyusun dari mikrostruktur *fusion zone* (FZ) dan *heat affected zone* (HAZ). Dengan mengetahui laju pendinginan maka dapat menentukan struktur mikro yang diinginkan atau yang akan dihindari. Laju pendinginan pada pelat yang tebal dapat dihitung dengan persamaan berikut;

$$R = \frac{2\pi k(T_c - T_o)^2}{H_{net}}$$

R = Laju pendinginan pada posisi tengah logam las (K/s)

k = konduktivitas termal dari material (J/mm s⁻¹K⁻¹)

T_o = Temperatur awal plat (K)

T_c = temperature dimana laju pendinginan dihitung (K)

$H_{net} = q/v$

$Q = \eta EI$

Jika pelat mempunyai ketebalan yang tipis maka;

$$R = 2\pi k\rho C \left(\frac{h}{H_{net}}\right)^2 (T_c - T_o)^3$$

Dimana h = ketebalan material induk (mm)

ρ = densitas dari material induk (g/mm³)

c = Panas spesifik dari material induk ($J/g.K^{-1}$)
 ρc = Panas spesifik volume (J/mm^3K^{-1})

Peningkatan temperatur awal (T_o) akan menurunkan laju pendinginan

2.8 Waktu pendinginan

Pada umumnya waktu pendinginan (cooling time) antara suhu 800-500°C dipakai acuan pada pengelasan baja karbon rendah karena pada interval suhu tersebut terjadi transformasi fasa dari austenite menjadi ferit, bainit atau martensite, tergantung dengan kecepatan pendinginannya.

Biasanya waktu pendinginan dinyatakan dalam notasi $\Delta t_{8/5}$ dan besarnya biasa dihitung dengan persamaan berikut:

$$\Delta t_{8/5} = \frac{q}{2\pi k} \left(\frac{1}{500-T_o} - \frac{1}{800-T_o} \right) \quad \text{untuk } semi\text{-infinite solid (tebal)}$$

$$\Delta t_{8/5} = \frac{\left(\frac{q}{v}\right)^2}{4\pi k \rho c h^2} \left[\left(\frac{1}{500-T_o}\right)^2 - \left(\frac{1}{800-T_o}\right)^2 \right] \quad \text{untuk plat tak hingga (tipis)}$$

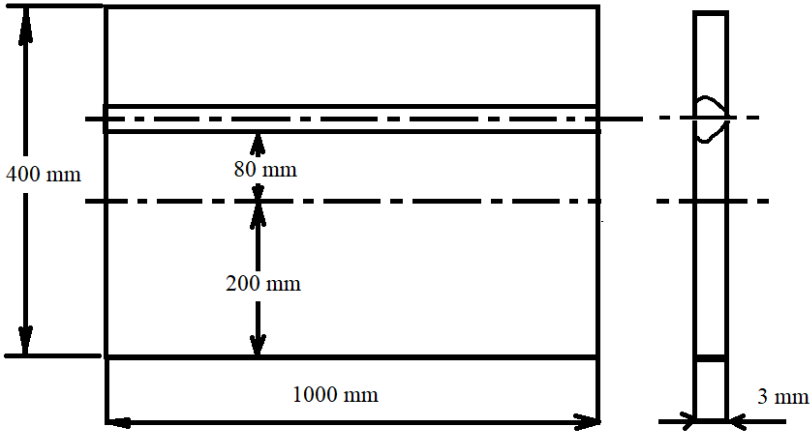
Tebal kritis suatu pelat dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$h_c = \left[\frac{q}{2\rho c} \left(\frac{1}{500-T_o} - \frac{1}{800-T_o} \right) \right]^{1/2}$$

Pelat dikategorikan tebal jika $h > h_c$ dan tipis apabila $h < h_c$

Contoh soal

Suatu pelat baja ST 37 dengan sambungan tumpul (butt joint) di las dengan las busur elektroda terbungkus. Ketebalan pelat 3 mm dan sebelum pengelasan, pelat dipanasi dulu (preheat) pada suhu 100°C. Jarak garis las dengan sumbu simetri pelat (eksentris) sebesar 80 mm seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini. Pengelasan dilakukan dengan menggunakan kuat arus 170 A, tegangan listrik 20 V, kecepatan pengelasan 2 mm/s dan efisiensi 70 %.



Diketahui sifat-sifat thermal baja sebagai berikut;

Konduktifitas panas (k)	= $0.04 \text{ Jmm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{°C}^{-1}$
Hasil kali (ρc)	= $5.0 \times 10^{-3} \text{ Jmm}^{-3} \text{°C}^{-1}$
Koefisien muai panas (α_T)	= $14 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$
Modulus elastisitas (E)	= 207 GPa
Factor kekakuan longitudinal (μ_1)	= 0.335
Factor kekakuan Transversal (μ_2)	= 0.850
Titik lebur T_m	= 1500 °C

Dari informasi di atas, jawablah pertanyaan-pertanyaan dibawah ini:

- Hitunglah waktu pendinginan ($\Delta t_{8/5}$) selama proses pengelasan berlangsung:
- Hitunglah suhu maksimum (T_p) pada jarak 5 mm dari garis las
- Hitunglah penyusutan transversal yang terjadi

Solusi:

Heat Input :

$$q = \eta E I$$

$$= 0.7 \times 20 \times 170 = 2380 \text{ watt}$$

$$H_{net} = q/v = 1190 \text{ J/mm}$$

Tebal kritis pelat adalah

$$h_c = \left[\frac{q}{2\rho c} \left(\frac{1}{500 - T_o} - \frac{1}{800 - T_o} \right) \right]^{1/2}$$

$hc = 21.623$ mm dikategorikan sebagai pelat tipis (tebal pelat $< hc$) maka waktu pendinginan adalah:

$$\Delta t_{\frac{8}{5}} = \frac{\left(\frac{q}{v}\right)^2}{4\pi k\rho ch^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_o}\right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_o}\right)^2 \right]$$

$$\Delta t_{\frac{8}{5}} = 1.138 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

Suhu maksimum (T_p) pada jarak 5 mm dari garis las adalah:

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{(2\pi e)^{0.5} \rho ch y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_o}$$

$$T_p = 879.9^\circ\text{C}$$

Penyusutan transversal adalah

$$\Delta_{tr} = \mu_1 \frac{2\alpha_T \left(\frac{q}{v}\right)}{c\rho h}$$

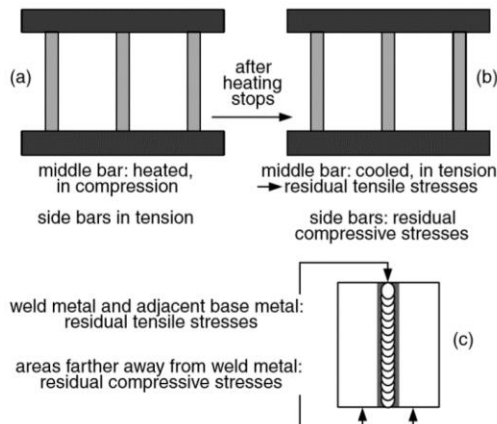
$$\Delta_{tr} = 1.888$$

BAB 3 TEGANGAN SISA

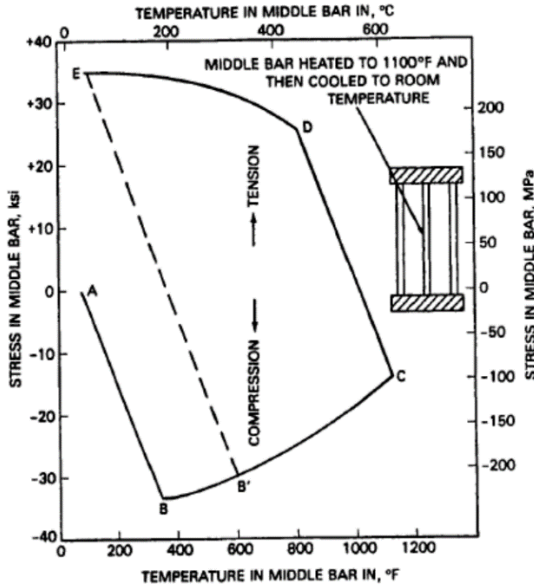
Tegangan sisa adalah tegangan yang ada pada sebuah benda jika seluruh beban yang ada dilepaskan kadangkala sering disebut juga dengan tegangan internal. Selain dari itu tegangan sisa dapat bersumber dari panas (thermal) dikenal di tegangan termal (*thermal stress*). Tegangan sisa akibat thermal stress dapat ditemukan pada sambungan-sambungan las. Tegangan sisa ini merupakan masalah klasik yang ditemukan pada proses pengelasan yang sangat berkaitan dengan penyimpangan (distorsi) hasil pengelasan.

Penyebab terjadinya tegangan sisa antara lain:

1. Tegangan sisa sebagai akibat dari tegangan thermal seperti pada pengelasan dan perlakuan panas (heat treatment)
2. Tegangan sisa yang disebabkan karena transformasi fasa seperti pada baja karbon
3. Tegangan sisa karena deformasi plastis yang tidak merata yang disebabkan gaya-gaya mekanisme seperti pada pengerjaan dingin selama pengeloran, penempaan, pembentukan logam atau pengerjaan lain yang dilakukan dengan mesin.



Gambar 16. Tegangan Termal: (a) selama pemanasan; (b) selama pendinginan dan (c) tegangan sisa pada sambungan las.

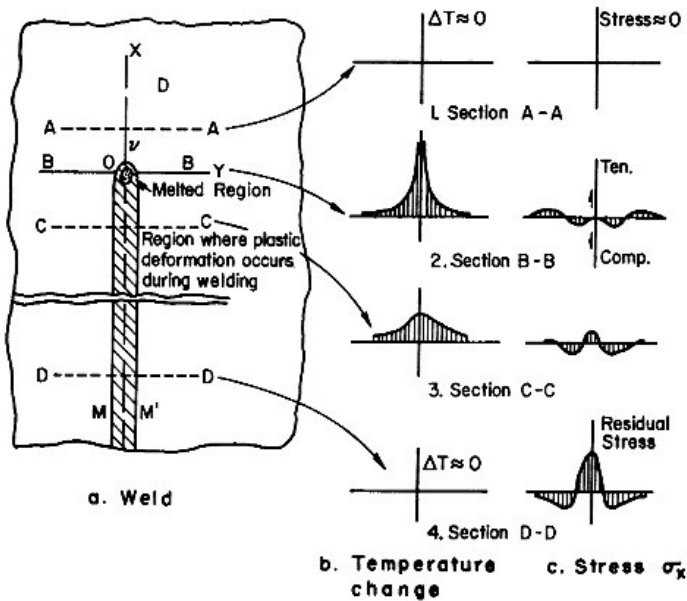


Gambar 17. Mekanisme tegangan sisa dari tiga batang

Mekanisme munculnya tegangan sisa yang disebabkan oleh tegangan thermal dapat dilihat pada Gambar 17.

- A – B Kenaikan suhu menyebabkan peningkatan tegangan tekan. Hal ini disebabkan oleh tertahannya penambahan panjang akibat pemanasan. Hal ini terjadi sampai suhu 340 °F (170°C) yaitu pada titik B dimana tegangan luluh (yield stress) tekan tercapai.
- B – C Pada pemanasan selanjutnya, tegangan tekan turun dan pemanasan dihentikan pada titik C yaitu pada 1100°F (595°C).
- C – D Ketika suhu turun dari titik C, tegangan tekan turun dengan cepat dan berubah menjadi tegangan tarik sampai tegangan luluh Tarik tercapai pada titik D.
- D – E Pada penurunan suhu selanjutnya, besar tegangan Tarik terbatas pada tegangan luluh dan tegangan sisa terbentuk.
- E – B Jika pemanasan dilakukan pada interval BC kemudian didinginkan sampai suhu kamar, tegangan Tarik elastis akan terjadi sepanjang garis sejajar dengan garis E-B sampai tegangan luluh garis tercapai pada garis DE dan tegangan sisa yang terjadi akan sama seperti sebelumnya.

Tegangan sisa pada sambungan las dapat dianalogikan sebagai mekanisme tiga batang yang tersusun mengalami pemanasan dan pendinginaan.



Gambar 18. Perubahan temperature dan tegangan selama pengelasan
 Sumber: Welding Handbook, American Welding Society.

Potongan A - A :

Tidak ada perubahan suhu ($\Delta T = 0$) sehingga tak ada tegangan thermal

Potongan B – B :

Suhu sangat tinggi karena potongan B –B melalui las cair. Tegangan thermal dekat sumber panas mendekati nol karena logam cair tak bisa menahan gaya/beban. Pada daerah HAZ terdapat tegangan tekan karena pemuaiannya HAZ terhalang oleh logam di sekitarnya.

Potongan C – C :

Daerahh dimana pendinginan terjadi. Logam las dan HAZ menyusut sehingga terjadi tegangan Tarik. Tegangan Tarik ini diimbangi tegangan tekan pada logam induk.

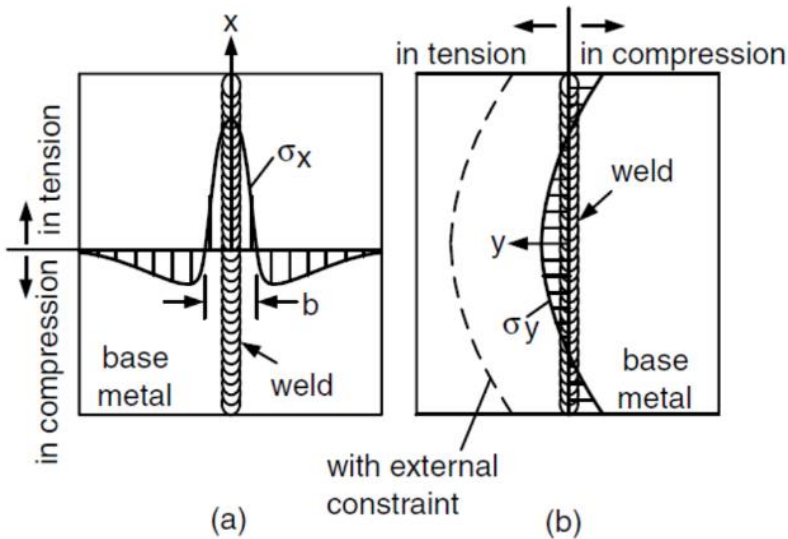
Potongan D – D :

Tegangan akhir yang stabil terbentuk, tegangan Tarik pada logam las dan HAZ sementara tegangan tekan terjadi pada logam induk.

3.1 Analisis Residual Stress

Gambar dibawah merupakan jenis distribusi tegangan pada butt weld. Distribusi dari tegangan sisa longitudinal σ_x dapat dihitung dengan persamaan berikut ini;

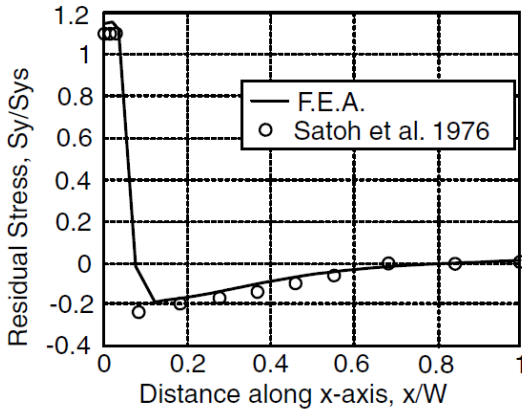
$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{1}{2} - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right]$$



Gambar 19. Distribusi longitudinal (σ_x) dan melintang (σ_y) tekanan residual dalam butt weld.

Sumber; Welding Handbook (2).

Dimana σ_m adalah tegangan sisa maksimum dari kekuatan logam las, sedangkan parameter b adalah lebar dari zona tarikan dari σ_x . Sedangkan distribusi tegangan sisa transversal σ_y adalah sepanjang panjang lasan. tegangan tarik yang ada relative rendah dibagian tengah lasan dimana kontraksi termal dalam arah transversal tertahan oleh logam dasar yang lebih dingin lebih jauh dari lasan.

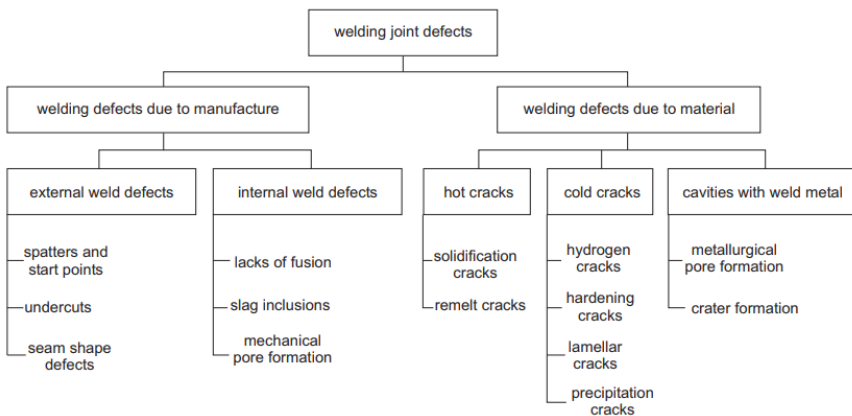


Gambar 20. Hasil pengukuran dan distribusi residual stress pengelasan butt joint dari Alumunium 5083

Gambar 20. menunjukkan hasil pengukuran dan perhitungan distribusi menggunakan Finite element method dari residual stress σ_x dalam sambungan butt joint dari dua pelat alumunium 5083 (panjang 60 cm, lebar 27.5 cm dan tebal 1 cm) yang dilas dengan GMAW. Residual stress dapat menyebabkan retak yang disebabkan serangan hydrogen, stress corrosion cracking. *Postweld heatreatment* biasanya digunakan untuk mengurangi residual stress yang muncul

BAB 4 CACAT LAS

Cacat dalam proses pengelasan dapat di kategorikan menjadi dua kategori, yaitu cacat yang timbul karena proses manufaktur (proses pengelasan) dan cacat yang timbul karena disebabkan oleh material. Cacat las yang disebabkan oleh manufaktur dapat dibagi menjadi cacat eksternal dan cacat internal. Sedangkan cacat yang disebabkan oleh material dapat dibagi menjadi *hot cracking*, *cold cracking* dan rongga (*cavities*) dalam logam las.

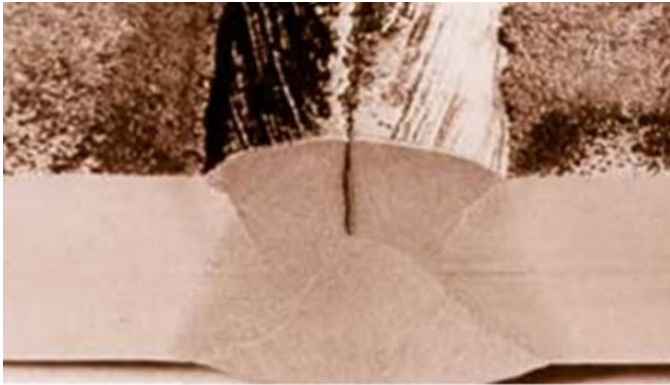


Retakan terjadi pada lasan dan logam las terjadi ketika tegangan yang ada melebihi nilai kekuatan atau ketangguhan material. Retakan ini dapat dalam arah memanjang atau melintang dengan sumbu las dan umumnya dibagi menjadi dua kategori: yaitu *hot cracking* dan *cold cracking*

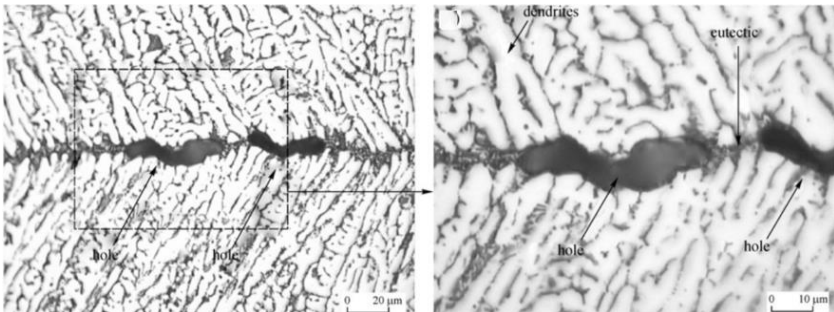
4.1 Retak Panas (hot cracking)

Hot cracking muncul pada temperature tinggi biasanya muncul selama proses pembekuan dari logam las (weld metal).

Retak panas atau *hot cracking* karena proses pembekuan bersifat (1) intergranular yaitu retak terjadi sepanjang batas butir, (2) terjadi pada akhir pembekuan dan (3) retak panas mudah terjadi jika ketebalan las meningkat.



Gambar 21. Potongan melintang retak centerline



Gambar 22. Mekanisme retak Panas pada pengelasan Al-3%Si

Karena kelarutan unsur-unsur paduan pada zat padat lebih rendah disbanding zat cair, maka selama proses pembekuan berlangsung. Unsur-unsur paduan tersebut akan terbuang ke zat cair dekat interface atau pada batas butir columnar dan menyebabkan terjadinya pemisahan (*segregation*).

Proses pemisahan ini akan menyebabkan terjadinya fasa baru dengan titik cair yang rendah atau fasa eutectic dan menghasilkan lapisan zat cair di sekitar batas butir. Lapisan ini memperlemah struktur mikro sehingga ketika terjadi tegangan sisa saat pendinginan berlangsung, retak akan timbul sepanjang batas butir tersebut.

Unsur-unsur pengotor (*impurity*) yang menyebabkan terjadinya retak biasanya mempunyai sifat-sifat berikut:

- ✓ Nilai koefisien partition, k_o yang rendah

- ✓ Mudah bereaksi dengan logam dan membentuk senyawa baru yang titik cairnya rendah.
- ✓ Mempunyai sudut kontak yang kecil saat nucleation sehingga mempunyai kemampuan untuk menyebar sepanjang batas butir.

Hot cracking dapat dihindari dengan pengaturan yang tepat pada :

1. Komposisi logam gas yang sesuai

Komposisi logam las ditentukan oleh komposisi logam induk, filler dan fluks. Pengontrolan komposisi tergantung jenis logam yang dilas. Berikut contoh pengendalian komposisi logam las.

- ✓ Cu pada logam paduan Al digunakan untuk mengatur pendinginan dan jumlah cairan eutectic.
- ✓ Pengurangan kandungan unsur-unsur yang tak diinginkan (impurity) seperti S dan P pada baja atau paduan Ni.
- ✓ Pemberian Mn pada baja untuk menurunkan kandungan senyawa bertitik lebur rendah seperti FeS yang berada pada batas butir karena pemisahan (*segregation*).
- ✓ Pengurangan kandungan C pada Baja untuk mencegah terjadinya martensite.

2. Pengendalian Struktur Pembekuan

Hot cracking atau retak panas dapat dihindari dengan (1) mengatur model pembekuan melalui pengaturan G/R, (2) pengaturan ukuran butir melalui kecepatan pendinginan. Butiran yang halus akan menghalangi terjadinya segregation dan dapat mengurangi fasa/senyawa bertitik lebur rendah pada batas butir sehingga menghindari terjadinya retak.

3. Kondisi Pengelasan

Retak panas juga dapat dihindari melalui kondisi pengelasan yang tepat.

Penggunaan las energy tinggi seperti electron beam welding (EBW).

Untuk bahan yang membentuk fasa getas, pemanasan awal atau preheating sangat diperlukan untuk mengurangi tegangan dan kecepatan pendinginan.

Pengaturan profil las dan bentuk bead. Logam las dengan permukaan berbentuk cekung (*concave*) ketika membeku bisa menyebabkan terjadinya tegangan tekan sehingga retak mudah

terbentuk sedangkan permukaan las berbentuk cembung (*convex*) lebih tahan terhadap retak. Selain itu ratio antara lebar dan kedalaman logam las sangat menentukan terjadinya retak. Dengan rasio yang tepat maka retak dapat dihindari.

4.2 Cold Cracking

Cold cracking dapat jauh lebih berbahaya dibanding dengan *Hot Cracking*. Hal ini karena retak dingin muncul setelah beberapa jam sampai berhari-hari setelah pengelasan hal ini berarti bahwa mungkin struktur yang dilas telah selesai dan mungkin sedang digunakan.

Retak dingin, Cold cracks atau “*delayed*” crack muncul setelah pembekuan dari zona fusi sebagai hasil residual stress. Retak dingin biasanya muncul dibawah temperature 200°F (90°C), Waktu munculnya retak tergantung dari jenis logam, residual stress yang timbul, hydrogen yang terkandung dan *Heat-affected zone* (HAZ).

Delayed cracking biasanya muncul karena terlarutnya hydrogen dan dapat muncul dalam logam las. Biasanya ketika filler metal yang digunakan mempunyai yield strength yang tinggi atau muncul pada HAZ dari logam induk karena difusi dari hydrogen selama proses pengelasan berlangsung.

Cold cracking memulai retak dari logam induk bukan dari logam lasan sebagaimana kasus pada hot cracking. Kadang disebut retak pada daerah HAZ atau retak karena serangan hydrogen. Cold cracking dapat muncul karena tiga kondisi yang hadir:

- Material yang di las sensitive.
- Tingkat level hydrogen
- Tegangan sisa yang besar.

Biasanya *residual stress* atau tegangan sisa sangat susah dikendalikan maka pengendalian biasanya difokuskan pada dua variable yang lain. Laju pendinginan yang cepat dan material dengan kandungan karbon yang tinggi sangat rentan dengan cold cracking. Semakin tinggi laju pendinginan maka semakin rentan terjadinya cold cracking. Ketebalan yang besar dari bahan yang akan dilas, rendahnya heat input dan

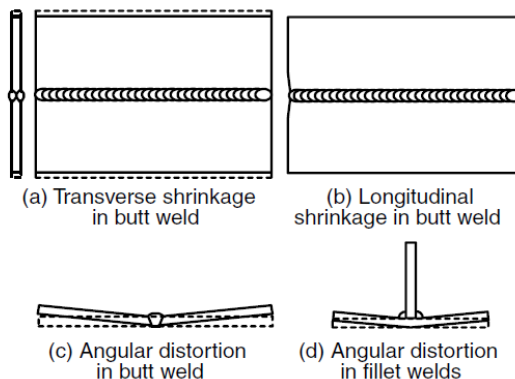
temperature logam induk yang rendah akan meningkatkan laju pendinginan (cooling rate). Laju pendinginan yang tinggi akan menghasilkan fasa martensite pada daerah HAZ yang bersifat keras, getas dan mempunyai keuletan yang rendah.

Beberapa usaha yang dapat dilakukan untuk menghindari retak dingin.

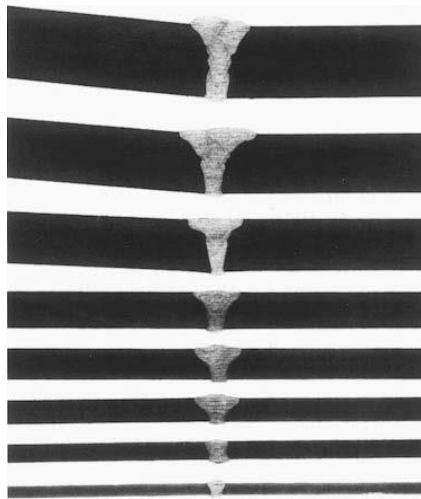
1. Melakukan *Preheat* terhadap logam induk untuk memperlambat laju pendinginan - ini juga mendifusikan hidrogen dan akan memungkinkan logam las dan bahan dasar berkontraksi pada tingkat yang sama saat pendinginan.
2. Jalankan prosedur dengan heat input yang lebih tinggi jika preheating bukan pilihan
3. Pilih logam pengisi (*filler*) dengan hidrogen rendah (biasanya dengan kode H2, H4 atau H8)
4. Lakukan perlakuan panas *post welding*
5. Kurangi laju pendinginan dengan menggunakan selimut panas (*heat blankets*)

4.3 Distorsi

Distorsi pada hasil pengelasan muncul karena adanya penyusutan dari pembekuan dan kontraksi termal dari logam las selama proses pengelasan berlangsung. Gambar dibawah ini menunjukkan beberapa jenis distorsi yang muncul dari hasil pengelasan. Peningkatan sudut distorsi muncul karena logam las yang diatas lebih lebar dari pada yang dibawah sehingga menyebabkan penyusutan dan kontraksi termal lebih besar pada bagian atas.

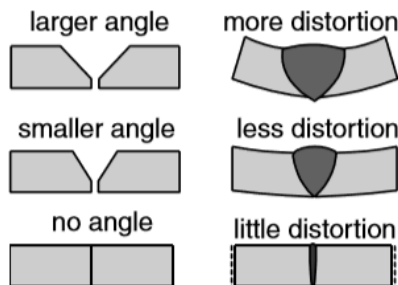


Gambar 23. Distorsi pada struktur yang dilas. Dimodifikasi dari Welding Handbook



Gambar 24. Distorsi pada butt weld aluminium 5083 dengan ketebalan 6,4–38mm. Reprinted from Gibbs (6). Courtesy of American Welding Society.

Gambar diatas menunjukkan distorsi pada pengelasan alumunium 5083 dengan variasi ketebalan pelat. Sudut distorsi meningkat seiring dengan peningkatan ketebalan pelat yang dilas karena adanya penambahan jumlah volume logam las sehingga meningkatkan penyusutan pembekuan logam las dan kontraksi termal. Seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 25. Pengurangan sudut distorsi dengan mengurangi volume logam las dengan menggunakan single-pass deep-penetration welding

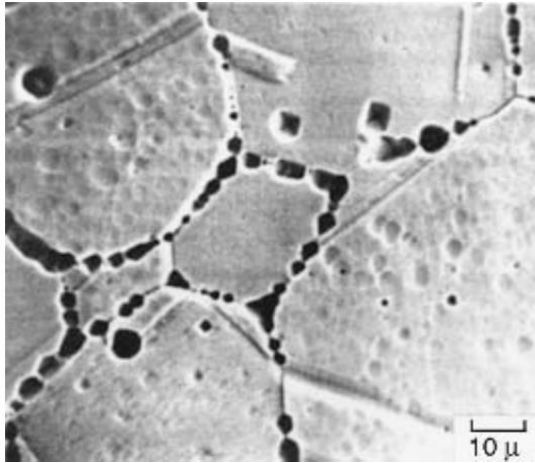
4.4 Weld Decay

Weld decay atau penguraian pengelasan adalah fenomena yang terjadi pada logam, khususnya logam tipe stainless steel, selama proses pengelasan. fenomena ini sering dikaitkan dengan terbentuknya senyawa karbida di sekitar batas butir kristal.

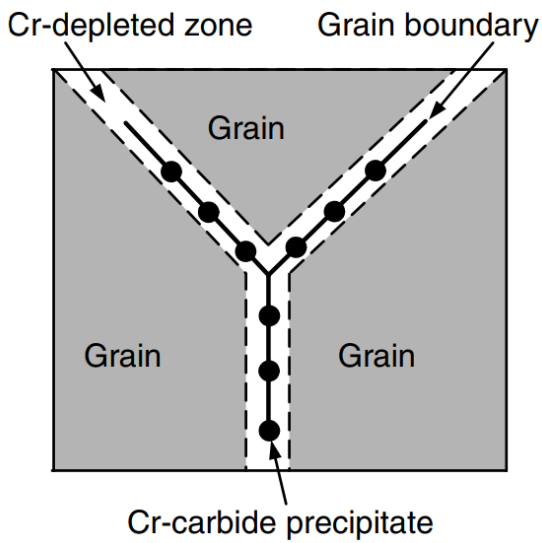
Logam tipe stainless steel biasanya memiliki struktur kristal austenitik pada suhu kamar. Struktur ini melibatkan kisi kristal yang relatif homogen dari atom kromium, nikel, dan unsur logam lainnya.

Selama proses pengelasan, zona panas pengelasan mengalami pemanasan yang signifikan. Pemanasan ini dapat menyebabkan perubahan struktur mikro logam. Pada suhu tinggi selama pengelasan, atom-atom logam menjadi lebih aktif dan bergerak lebih bebas. Hal ini memungkinkan terjadinya reaksi kimia antara unsur-unsur dalam logam.

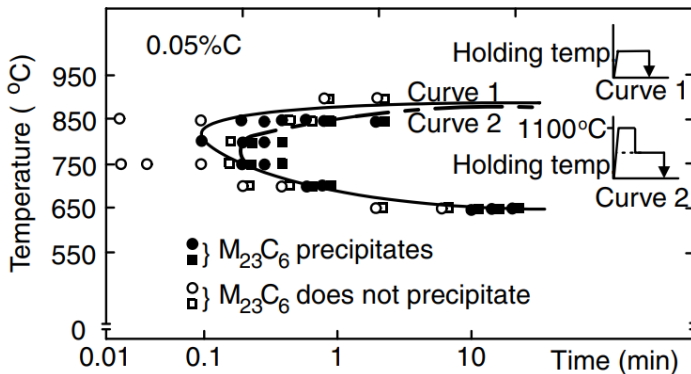
Fenomena utama dalam weld decay adalah terbentuknya presipitasi Cr karbida pada batas butir yang disebut sensititasi (sensitization). Biasanya terbentuk $M_{23}C_6$ dimana M merepresentasikan Cr dan sejumlah kecil dari Fe. Dalam daerah temperature sensititasi atom karbon dengan cepat berdifusi ke batas butir dimana berkombinasi dengan Cr dan membentuk Cr karbida. Gambar 26 menunjukkan fenomena serangan korosi disepanjang batas butir pada daerah HAZ of a 0.05% C 304 austenitic. Karena presipitasi Cr karbida pada batas butir, maka daerah tersebut yang berdekatan dengan batas butir kehabisan Cr, seperti ditunjukkan secara skematis pada Gambar 27.



Gambar 26. Korosi Intergranular pada daerah HAZ pada SS304



Gambar 27. Mikrostruktur batas butir pada sensititasi stainless steel



Gambar 28. Kurva presipitasi Isothermal Cr₂₃C₆ pada SS 304 (Welding Metallurgy)

Gambar 28 menunjukkan presipitasi isothermal atau kurva time-temperature-sensitization (TTS) pada stainless steel 304 dengan kandungan 0.05%C dimana temperature sensitisasi Cr carbide pada range 600 - 850°C.

Pembentukan Cr karbida menyebabkan pengurangan jumlah kromium di sekitar batas butir kristal, dan ini berakibat mengurangi kemampuan logam untuk membentuk lapisan pasif pelindung yang membuat stainless steel tahan terhadap korosi.

Senyawa karbida yang terbentuk di batas butir kristal dapat merusak integritas mikro struktural logam, mengurangi kekuatan dan ketahanan terhadap korosi, terutama korosi intergranular.

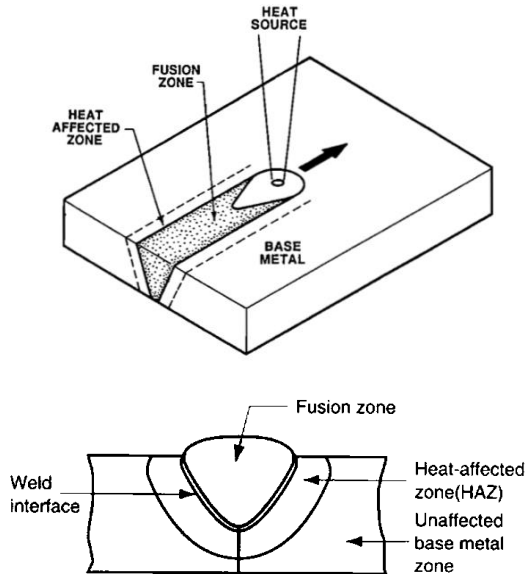
Logam yang mengalami weld decay cenderung lebih mudah terurai oleh korosi di sekitar batas butir, dan ini dapat menjadi masalah serius dalam aplikasi di lingkungan yang menuntut ketahanan terhadap korosi.

Untuk mencegah atau mengurangi efek fenomena *weld decay*, perlakuan panas pasca-pengelasan sering digunakan. Perlakuan panas ini dapat mengembalikan keseimbangan kimia dan struktural dalam

logam, membantu mengurangi kandungan senyawa karbida dan mengembalikan ketahanan terhadap korosi. Kontrol suhu pengelasan dan kecepatan pendinginan juga penting untuk mencegah terbentuknya senyawa karbida.

BAB 5 DASAR-DASAR METALURGI LAS

Penyambungan dua bagian logam yang melalui pengelasan Fusi akan melibatkan penggunaan panas sampai melewati titik cair logam tersebut kemudian terjadi proses pendinginan. Maka dapat dikatakan logam yang dilas akan mengalami siklus panas yang bervariasi tergantung dari zona atau jarak pusat pengelasan. Secara umum zona yang ada dalam sambungan fusi dapat dibagi menjadi 4 bagian yaitu; *fusion zone (FZ)*, *weld interface (mushy zone)*, *heat affected zone (HAZ)* dan *unaffected base metal zone* seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 29. Pembagian Zona pada pengelasan Fusi.

5.1 Fusion Zone

Fusion Zone, Zona fusi (disebut sebagai FZ) adalah campuran logam dasar yang sepenuhnya cair dan logam pengisi (*filler*) jika elektroda konsumabel yang digunakan. FZ mempunyai tingkat homogenitas yang tinggi karena pencampuran didorong oleh konveksi pada weld pool. Gaya penggerak utama untuk perpindahan panas dan pencampuran logam cair dalam weld pool adalah: (1) gaya apung, (2) gaya gradien tegangan permukaan, (3) gaya elektromagnetik, (4) gaya gesek.

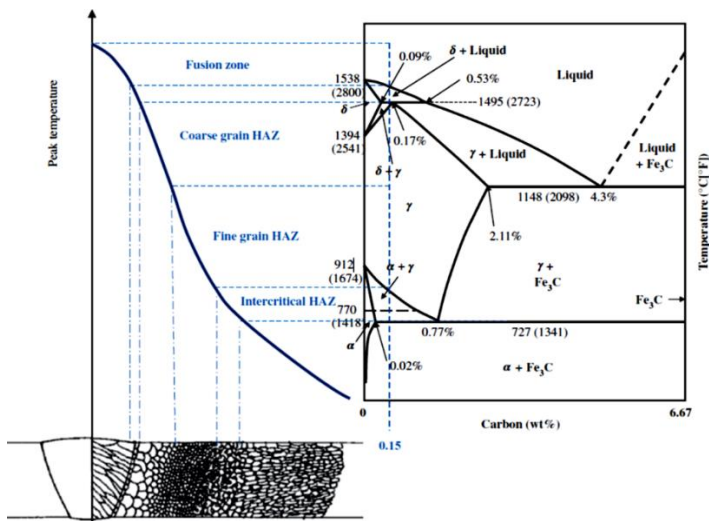
5.2 Weld interface

Weld interface juga kadang dikenal sebagai mushy zone adalah zona sempit yang terdiri dari logam induk yang mencair sebagian dimana tidak dapat bercampur. Zona ini membagi antara *fusion zone* dan *Heat affected zone (HAZ)*.

5.3 Heat affected zone

Heat affected zone (HAZ) adalah zona yang terpapar peak temperatur dimana masih dibawah solidus temperature yang dapat merubah struktur mikro dari material. Perubahan jumlah struktur mikro pada HAZ tergantung dengan Heat input, temperature peak, waktu serta laju pendinginan. Perubahan mikrostruktur ini akan berpengaruh pada sifat mekanik dari hasil lasan. Reaksi pada HAZ sangat kompleks, dibawah ini beberapa fenomena yang terjadi pada HAZ :

- *Recrystallization*
- *Grain growth*
- *Phase transformations*
- *Dissolution/overaging of precipitates*
- *Precipitate formation*
- *Residual stress and stress relaxation*



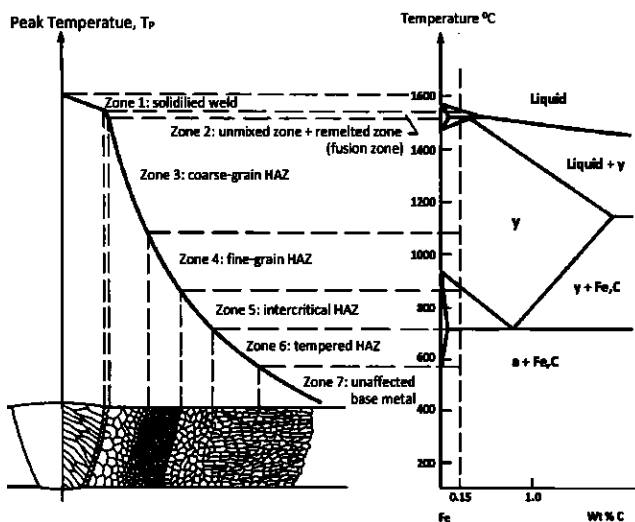
Gambar 30. Hubungan antara diagram fase Fe-Fe₃C dan struktur mikro di HAZ dari baja karbon.

5.4 Unaffected base metal zone

Unaffected base metal zone adalah zona yang tidak terpengaruh panas yang mengelilingi daerah HAZ. Zona ini cenderung berada dalam kondisi tegangan sisa yang tinggi, karena penyusutan di zona fusi. Namun, zona ini tidak mengalami perubahan mikro.

Fusion zone dan *Heat affected zone (HAZ)* dari sambungan yang dilas dapat menunjukkan sifat mekanis yang sangat berbeda dari logam dasar yang tidak terpengaruh serta di antara keduanya.

Sebagai contoh, fusion zone menunjukkan struktur cor yang khas sedangkan *Heat affected zone* akan memperlihatkan struktur yang dipanaskan dengan melibatkan transformasi fase, rekristalisasi dan pertumbuhan butiran. Sebaliknya, logam dasar yang tidak terpengaruh panas akan menunjukkan struktur bulat dengan sedikit pertumbuhan butiran. Gambar dibawah menunjukkan bagaimana zona yang berbeda dari lasan baja seperti ditunjukkan pada diagram kesetimbangan besi-karbon.



Gambar 31. Different zones in a steel weld VS Iron-Carbon equilibrium diagram

Perubahan mikrostruktur sangat berkaitan erat dengan sifat-sifat mekanik logam lasan.

5.5 Kemampuan Las Baja (*weldability of steels*)

Weldability adalah kemampuan suatu logam atau material untuk dihubungkan atau dilas dengan logam atau material lainnya dengan proses pengelasan. Dalam pengelasan salah satu persyaratan penting pada pengelasan logam adalah sifat mampu las yang baik (*weldability*). Beberapa faktor yang mempengaruhi weldability termasuk:

Komposisi Kimia:

Kandungan unsur-unsur tertentu dalam logam dapat mempengaruhi sifat-sifat pengelasan. Beberapa unsur dapat meningkatkan atau mengurangi kemampuan material untuk membentuk sambungan las yang kuat.

Struktur Mikro:

Struktur mikro material, seperti butiran butir dan ukuran butir, dapat memainkan peran penting dalam menentukan kemampuan pengelasan. Struktur mikro yang baik dapat mendukung pembentukan sambungan las yang kuat.

Sifat Mekanis:

Kekuatan, keuletan, dan ketangguhan material memengaruhi sejauh mana material dapat menahan tegangan dan deformasi selama proses pengelasan serta dalam layanan pasca-pengelasan.

Karakteristik Termal:

Kemampuan material untuk menahan perubahan suhu yang cepat selama pengelasan dapat mempengaruhi pembentukan sambungan las tanpa adanya cacat seperti retak atau deformasi yang tidak diinginkan.

Pemrosesan Panas Sebelumnya:

Pengaruh dari perlakuan panas sebelumnya pada material dapat berdampak pada struktur dan sifat-sifat pengelasan. Misalnya,

perlakuan panas tertentu dapat mengubah struktur mikro logam dan mempengaruhi sifat-sifat pengelasan.

Ketebalan Material:

Ketebalan material dapat mempengaruhi kecepatan pendinginan selama pengelasan, yang pada gilirannya dapat memengaruhi sifat-sifat metalurgi dan kualitas sambungan las.

Proses Pengelasan:

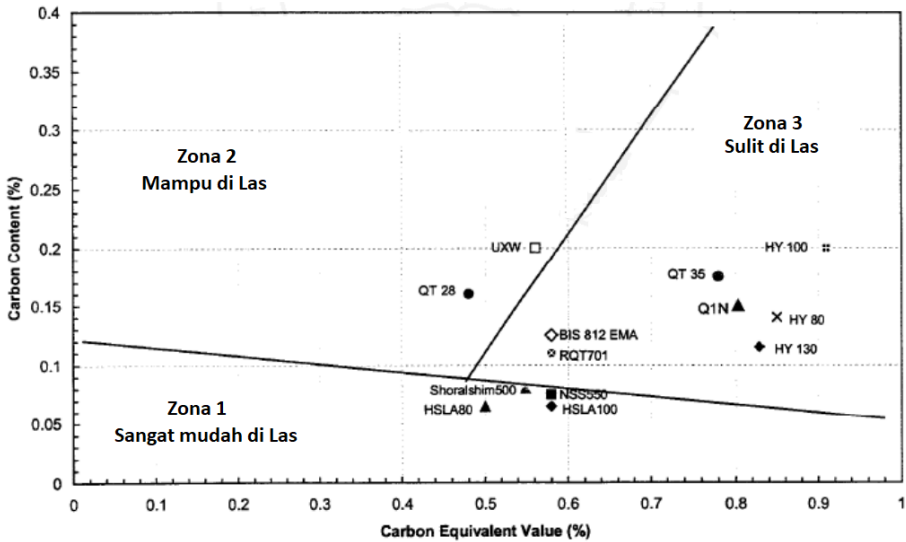
Jenis proses pengelasan yang digunakan, seperti TIG (*Tungsten Inert Gas*), MIG (*Metal Inert Gas*), atau SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), dapat mempengaruhi hasil sambungan las. Setiap proses memiliki karakteristik dan kondisi pengelasan yang berbeda.

Memahami faktor-faktor ini dan mempertimbangkan mereka saat merencanakan proses pengelasan dapat membantu dalam mencapai sambungan las yang kuat dan memuaskan.

Pada Baja kemampuan las dapat dinyatakan dengan tingkat karbon equivalent (*carbon equivalent*). Secara umum baja mempunyai nilai equivalent kurang dari 0.4 adalah baja-baja yang mempunyai mampu las yang baik.

Kemampuan las bahan baja dapat dipelajari dalam diagram Graville khas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 32. Diagram Graville menyajikan kerentanan keretakan yang diinduksi hidrogen dari berbagai jenis baja berdasarkan pada kandungan karbon dan carbon equivalent (C.E) yang sesuai. Persamaan carbon equivalent (C.E) adalah:

$$C.E = \%C + \frac{(\%Mn + \%Si)}{6} + \frac{(\%Ni + \%Cu)}{15} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5}$$



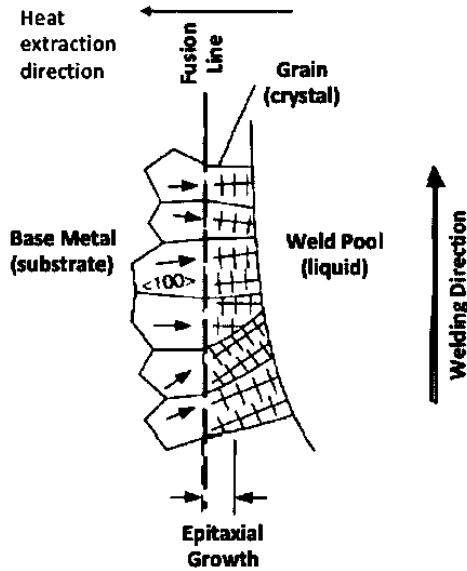
Gambar 32. Diagram Graville untuk baja

Gambar 32, Zona 1 pada Diagram Graville baja karbon mempunyai kandungan karbon yang rendah dan nilai kekerasan yang rendah. Sebaliknya pada Zona 3 mempunyai kandungan karbon dan nilai kekerasan yang tinggi yang cenderung rentan menimbulkan retak selama proses pengelasan. Zona 2 mempunyai level karbon yang tinggi dengan kekerasan yang lebih rendah. Kerentanan retak karena induksi hidrogen pada baja dapat dihindari selama pengelasan dapat dikendalikan dengan laju pendinginan pada HAZ melalui pengontrolan Heat Input.

5.6 Dasar-Dasar Pembekuan Logam Cair

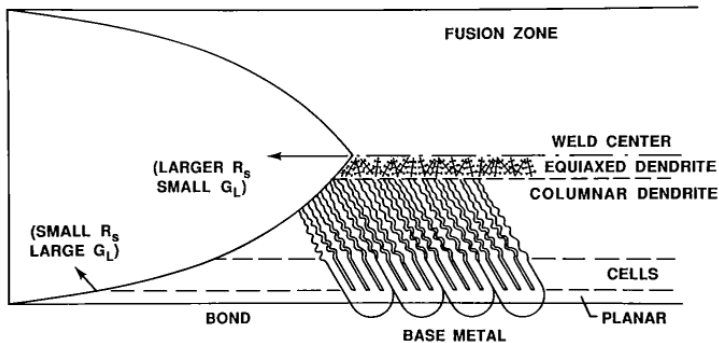
Integriti dan kehandalan sambungan pengelasan ditentukan oleh pembekuan dari logam las (*fusion zone*). Fusion zone mengontrol menentukan mikrostruktur logam las, struktur butir, distribusi inklusi, porositas, perilaku hot cracking dan sifat mekanik logam las.

Dalam mekanisme pembekuan beberapa parameter penting yang mempengaruhi mikrostruktur adalah; gradient temperatur (G), growth rate (R), *undercooling* (ΔT) dan komposisi paduan (C_0). Dalam *weld pool*, G , R dan ΔT .



Gambar 33. Pembekuan epitaxial dalam pengelasan fusi

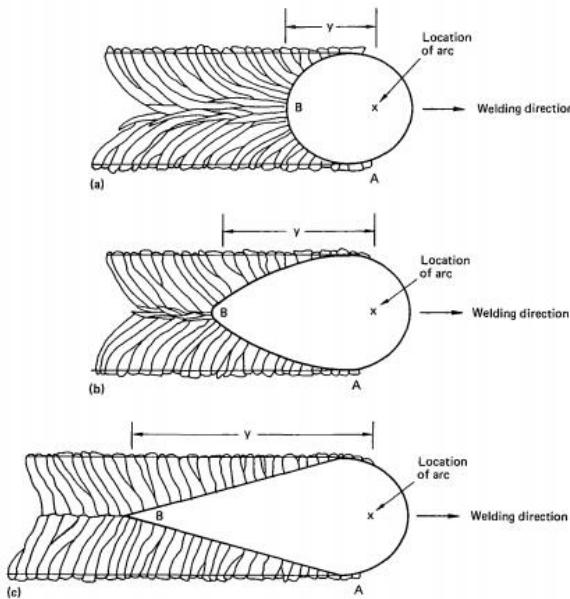
Dalam pengelasan fusi, keberadaan butir logam induk pada garis fusi (fusion line) bertindak sebagai substrate bagi nukleasi dari kristal selama proses pembekuan dari zona fusi. Kristal atau butir atom yang tersusun mengikuti susunan butir pada logam induk tanpa menukar orientasi Kristal. Hal ini dikenal sebagai pembekuan epitaxial (*epitaxial solidification*) yang biasa terjadi pada proses pengelasan.



Gambar 34. Menunjukkan variasi dari mikrostruktur logam yang dipengaruhi gradient temperature dan growth rate

Pada fusion zone terdapat beberapa jenis mikrostruktur yang terbentuk, pada struktur kolumnar yang kasar rentan terjadinya *hot cracking* sedangkan pada struktur yang lebih halus atau struktur equiaxed lebih tahan terhadap *hot cracking*. Mikrostruktur ini sangat menentukan sifat mekanik dari sambungan las. Untuk meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan terhadap hot cracking beberapa usaha dilaksanakan antara lain; memperhalus struktur butir fusion zone.

Bentuk makro dari sambungan las (*weld*) juga mempunyai peran penting terhadap integrity dan ukuran butir yang terbentuk dari fusion zone. Geometri *weld-pool* mempunyai peranan penting dalam menentukan kondisi termal di dalam dan disekitar weld pool serta juga mempengaruhi aliran fluida yang terbentuk. Secara umum volume dari weld-pool dikontrol oleh parameter pengelasan seperti Heat input dan kecepatan pengelasan.



Gambar 35. Perbandingan geometri weld pool yang terbentuk terhadap kecepatan pengelasan; (a). lambat, (b) menengah dan (c) cepat.

BAB 6 FILLER METAL

Filler metal kadang dikenal dengan bahan tambah, elektroda atau consumable sangat menentukan pada mutu dan kualitas sambungan las. Filler metal yang digunakan sangat menentukan terhadap sifat mekanik sambungan las seperti kekuatan Tarik, kekerasan, ketangguhan serta juga mempengaruhi keberadaan cacat las.



Gambar 36. Filler metal yang biasa digunakan pada proses pengelasan

Filler metal adalah logam yang ditambahkan selama proses pengelasan selain itu juga ditambahkan komponen material seperti Tungsten, Thorium, Cerium, Zirconium dan lain sebagainya.

Klasifikasi filler metal dapat dikelompokkan menjadi 31 kelompok material. Berdasarkan standar AWS filler metal dapat dikelompokkan menjadi 4 kategori yaitu;

- Elektroda terbungkus
- Elektroda kawat atau batang pejal
- Elektroda kawat batang tabung berinti flux
- Flux pengelasan.

1. Elektroda Terbungkus

Elektroda terbungkus biasanya dipergunakan dalam pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Elektroda ini terdiri atas kawat

inti dan pembungkus (flux). Ukuran diameter elektroda las berkisar antara 2.5 mm sampai dengan 8 mm dan memiliki panjang berkisar 200 mm sampai 450 mm. Sedangkan pada ujung elektroda tanpa flux adalah sepanjang 25-30 mm.

Elektroda las yang digunakan pada baja karbon berdasarkan American Welding Society (AWS) dinyatakan dengan kode Exxxx.

1
2
3
4
E x x x x

E menyatakan Elektroda, Digit ke 1 dan ke 2 menyatakan nilai kekuatan tarik deposit las (x 1000 psi).

Digit ke 3 menyatakan posisi pengelasan,

0 = semua posisi

1= semua posisi kecuali vertical kebawah

2= datar dan sudut horizontal

3= hanya posisi datar

4= posisi datar dan vertical ke bawah

Digit ke 4 menyatakan jenis lapisan pembungkus elektroda dan jenis arus yang dapat digunakan.

Contoh : E 6013 , mempunyai kekuatan tarik 60.000 psi posisi pengelasan adalah semua posisi dan jenis flux potassium rutile dengan menggunakan arus bolak-balik (AC) dan arus searah (DC).

Dibawah ini beberapa macam jenis flux yang biasa digunakan, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Jenis-jenis Flux

No	Kode	Jenis Flux	Polaritas
1	Exxx0	Selulosa/Natrium tinggi	DC+
2	Exxx1	Selulosa/Potasium tinggi	AC, DC±
3	Exxx2	Rutile/Natrium tinggi	AC, DC±
4	Exxx3	Rutile/Potasium	AC, DC±

5	Exxx4	Rutile/Serbuk besi	AC, DC±
6	Exxx5	Hydrogen rendah/Natrium	DC+
7	Exxx6	Hydrogen rendah/Natrium	AC, DC±
8	Exxx7	Serbuk besi	AC, DC±
9	Exxx8	Hydrogen rendah/ Serbuk besi	AC, DC±

Fungsi flux pada elektroda adalah;

- ✓ Meningkatkan stabilitas busur dan memperlancar pemindahan butir-butir (droplet).
- ✓ Sumber terak (slag) yang berfungsi melindungi logam cair terhadap udara sekeliling.
- ✓ Sumber penambah unsur
- ✓ Mengikat gas-gas yang ada di logam cair
- ✓ Mengikat kotoran yang ada pada logam cair.

Sifat dan karakter material Fluks :

- a. Oksida Titan (TiO_2 atau rutile)
 - Busur tidak terlalu kuat
 - Penetrasinya dangkal
 - Manik las halus
 - Sesuai untuk pengelasan pelat tipis atau finishing pada pengelasan pelat tebal
- b. Titania kapur
 - Menghasilkan sifat mekanik yang baik
 - Cocok untuk semua posisi pengelasan.
- c. Ilmenit (FeTiO_3)
 - Busur lebih kuat
 - Penetrasi cukup dalam
 - Menghasilkan sifat mekanik yang sangat baik
 - Elektroda serba guna
- d. low hydrogen electrodes (hydrogen rendah)

- menghasilkan sambungan dengan kadar hydrogen yang rendah
 - Kerentanan sambungan terhadap retak sangat rendah
 - Ketangguhan sambungan sangat baik
 - Busur kurang stabil
- e. Selulosa (terdiri \pm 30% zat organik)
- Menghasilkan gas dalam volume besar
 - Busur kuat
 - Penetrasi dalam
 - Terak yang dihasilkan sedikit, sehingga cocok untuk pengelasan yang menurun
 - Percikan banyak terjadi, sehingga manik las kurang bagus
- f. Oksida besi
- Busur yang dihasilkan terpusat dan penetrasi dalam
 - Baik untuk pengelasan sudut horizontal
- g. Serbuk besi oksida (15-50% silikat dan serbuk besi)
- Pemindahan butir cairan berupa semburan halus
 - Tidak banyak percikan (spatter)
 - Kecepatan pengisian tinggi (efisiensi tinggi)

Elektroda pengelasan busur

Elektroda terumpan bagi pengelasan busur dapat diklasifikasikan berdasarkan :

- Kekuatan dari deposit metal las
- Arus (AC atau DC)
- Jenis pelapis (coating)

Elektroda dapat identifikasi berdasarkan nomor dan huruf atau kode warna. Jenis elektroda terbungkus mempunyai dimensi panjang antara 150 sampai 460 dan diameter antara 1.5 hingga 8 mm.

Spesifikasi untuk elektroda dan metal filler termasuk dalam hal dimensi toleransi, prosedur quality control dan proses telah ditetapkan oleh *American Welding Society (AWS)* dan *American National Standards Institute (ANSI)*.

Penulisan kode pada electrode terbungkus

Awalan "E" menunjuk elektroda las busur. Dua digit pertama dari empat digit angka dan tiga digit pertama dari lima digit angka menunjukkan kekuatan tarik minimum.

E60XX	60,000 psi
E70XX	70,000 psi
E110XX	110,000 psi
Digit berikutnya hingga terakhir menunjukkan posisi:	
EXX1X	Seluruh posisi
EXX2X	Posisi datar dan fillet horizontal

Dua digit terakhir bersama-sama menunjukkan jenis cover dan arus yang akan digunakan. Akhiran (Contoh: EXXXX-A1) menunjukkan paduan dalam deposit lasan.

-A1	0.5% Mo
-B1	0.5% Cr, 0.5% Mo
-B2	1.25% Cr, 0.5% Mo
-B3	2.25% Cr, 1% Mo
-B4	2% Cr, 0.5% Mo
-B5	0.5% Cr, 1% Mo
-C1	2.5% Ni
-C2	3.25% Ni
-C3	1% Ni, 0.35% Mo, 0.15% Cr
-D1 dan D2	0.25 – 0.45% Mo, 1.75% Mn
-G	0.5% min. Ni, 0.3% min. Cr, 0.2% min. Mo, 0.1% min. V, 1% min. Mn (hanya satu elemen yang dibutuhkan)

Penyimpanan Elektroda

Elektroda harus dijaga tetap kering karena kelembapan dapat merusak karakteristik lapisannya dan dapat menyebabkan percikan yang berlebihan. Hal ini dapat menyebabkan porositas dan berkembangnya retakan pada zona pengelasan. Setelah elektroda terkena lingkungan lembab selama lebih dari 2-3 jam, disarankan untuk memanaskannya hingga kering dalam oven yang sesuai selama minimal 2 jam pada suhu 500 °F.

Setelah keluar dari oven, sebaiknya disimpan dalam wadah tahan lembab. Jangan sekali-kali membengkokkan elektroda karena dapat merusak lapisan dan mengekspos kawat inti. Kita sebaiknya tidak menggunakan elektroda dengan kawat terbuka untuk pengelasan. Elektroda yang dilengkapi dengan akhiran R memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap kelembapan. Gambar 37 menunjukkan tempat penyimpanan elektroda yang mencegah dari kelembaban.



Gambar 37. Penyimpanan elektroda untuk melindungi dari kelembaban

BAB 7 FRICTION WELDING

Teknik pengelasan secara sederhana telah ditemukan dalam rentang waktu antara 4000 sampai 3000 SM. Setelah energi listrik dipergunakan dengan mudah, pengembangan teknologi pengelasan semakin maju dengan pesatnya sehingga menjadi suatu teknik penyambungan yang mutakhir. Dewasa ini jenis pengelasan semakin banyak dengan adanya kemajuan teknologi, baik proses pengelasan yang menggunakan bahan tambah (*filler*) maupun yang tanpa menggunakan bahan tambah. Proses pengelasan yang menggunakan putaran yang kemudian digesekan dan menimbulkan panas yang tinggi, sehingga dapat digunakan untuk proses pengelasan yang biasanya disebut dengan las gesek (*friction welding*). Berdasarkan jenis atau klasifikasi cara kerja pengelasan dapat dibagi dalam tiga yaitu (ASM Handbook, 1993):

- Pengelasan cair (*Liquid State Welding*)
Proses pengelasan yang dilakukan dengan cara memanaskan bagian yang akan disambung hingga mencair dengan sumber panas dari energi listrik atau api dari pembakaran gas dengan menggunakan bahan tambah (*filler*) atau tanpa menggunakan bahan tambah. Beberapa contoh pengelasan cair yaitu las busur, las gas, las termit, las listrik gas, las listrik terak, las busur plasma, dan lain-lain.
- Pengelasan tekan (*Solid State Welding*)
Proses pengelasan dimana benda yang akan disambungkan dipanaskan terlebih dahulu, kemudian ditekan hingga berdempet setelah itu jika benda tersebut telah dingin maka akan menyambung. Beberapa contoh pengelasan tekan yaitu las resistansi listrik, las tempa, las gesek, las induksi, las *ultrasonic*, dan lain-lain.
- Pematrian (*Solid Liquid State Welding*)
Proses pengelasan dimana logam pada sambungannya diberi logam (*filler*) yang mempunyai titik cair yang lebih rendah dari

logam yang akan disambung, sehingga logam induk yang akan disambung tidak mencair. Contoh pematrian yaitu *brazing* dan solder.

Untuk keperluan penyambungan dua logam yang berbeda (*dissimilar metal*), yang tidak mungkin dilakukan dengan pengelasan cair karena tidak semua logam dapat menyatu dengan baik dalam keadaan cair, apalagi perbedaan temperatur titik cair yang sangat jauh. Untuk keperluan itu dapat dilakukan dengan proses *brazing*, namun hasil sambungannya tidak memiliki kekuatan yang baik. Untuk memperoleh kekuatan sambungan yang baik pada logam yang berbeda maka dipilih penyambungan dengan pengelasan tekan atau *solid-state welding*.

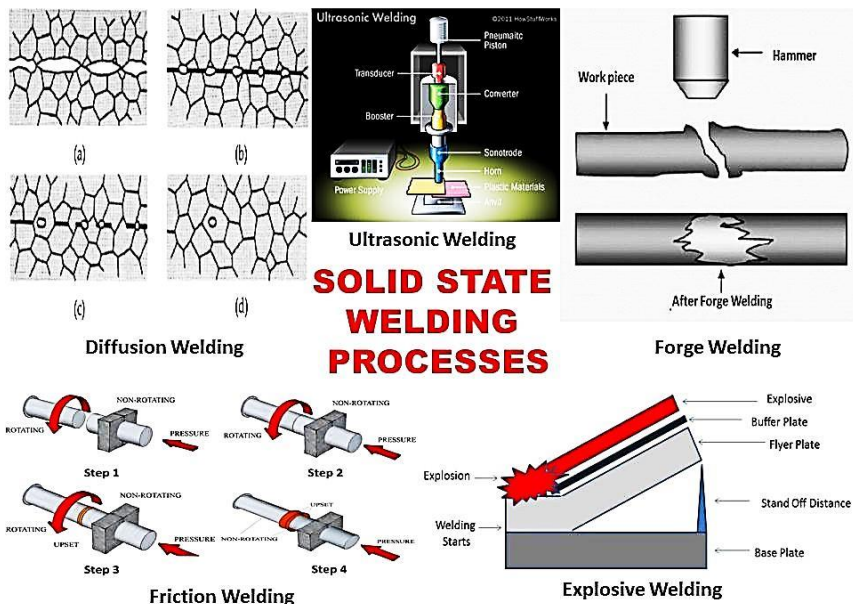
1.1 Pengelasan Tekan (*Solid-State Welding*)

Solid-state welding (pengelasan fasa padat) adalah termasuk dari klasifikasi pengelasan tekan, dimana penggabungan diperoleh dari pemberian tekanan saja atau pemberian panas yang diikuti dengan tekanan pada kedua benda kerja yang akan disambung. *Solid-state welding* memerlukan tekanan karena apabila hanya menggunakan panas lalu ditempelkan, tentu akan sulit untuk terjadi penyambungan yang baik. Proses *solid-state welding* tidak menggunakan logam pengisi (*filler*), penyambungan terjadi melalui proses deformasi dan proses difusi, atau gabungan deformasi dan difusi. Deformasi pada *solid-state welding* diperlukan untuk menjamin kerapatan material yang disambung. Proses difusi terjadi pada dua permukaan kontak dan dipacu oleh adanya kenaikan temperature (ASM Handbook, 1993).

Pemilihan *solid state welding* dalam proses penyambungan biasanya dilihat dari sifat-sifat material yang akan disambung terutama melihat diagram fasanya. Jika dilihat dari diagram fasa material sulit disambung dalam keadaan cair maka jalan yang ditempuh adalah penyambungan dengan *solid-state welding*. Karena dalam *solid-state welding*, penyambungan terjadi dalam keadaan padat tanpa

pencairan, sehingga tidak ada proses pencampuran logam. Penyambungan terjadi karena proses difusi atom. Sebagai contoh pada baja yang memiliki kadar karbon tinggi, bila dilakukan pengelasan dengan proses pencairan maka pada daerah sambungannya rentan terjadi retakan selama pembekuan atau pendinginan.

Proses *solid-state welding* memiliki beberapa kelebihan, diantaranya adalah dapat menyambung dua buah material atau lebih yang tidak sama titik cairnya, prosesnya cepat, presisi, dan hampir tidak memiliki daerah terpengaruh panas (*heat affected zone / HAZ*). Namun demikian *solid-state welding* juga mempunyai kelemahan yaitu persiapan sambungan dan prosesnya rumit, sehingga dibutuhkan ketelitian sangat tinggi. Yang termasuk dalam *Solid-State Welding* diantaranya *Diffusion Welding*, *Forge Welding*, *Cold Welding*, *Friction Welding*, *Explosive Welding*, *Ultrasonic Welding*, dan lain lain seperti terlihat pada Gambar 1.

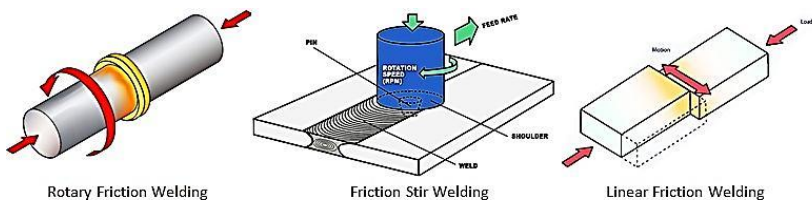


Gambar 38. Jenis-jenis solid-state welding

1.2 Pengelasan Gesek (*Friction Welding*)

Friction welding atau pengelasan gesek merupakan proses *solid-state welding* dimana penyambungan logam dengan memanfaatkan energi panas yang diakibatkan karena adanya gesekan dari dua material yang akan disambung. Pengelasan ini tidak memerlukan sumber panas dari listrik atau pembakaran, tetapi konversi langsung dari energi mekanik ke energi panas. Panas yang dihasilkan dari proses gesekan antar *interface* yang menaikkan temperatur benda dengan jarak yang relatif sangat pendek. Penyambungan terjadi ketika permukaan *interface* mencapai temperatur dibawah temperatur cair. Pengelasan terjadi akibat pengaruh tekanan pada pencampuran logam plastis dan mekanisme difusi. Terdapat tiga jenis *friction welding* yang umum digunakan seperti terlihat pada Gambar 39. yaitu (Sahin,2003):

- Rotary Friction Welding
- *Friction Stir Welding*
- *Linear Friction Welding*

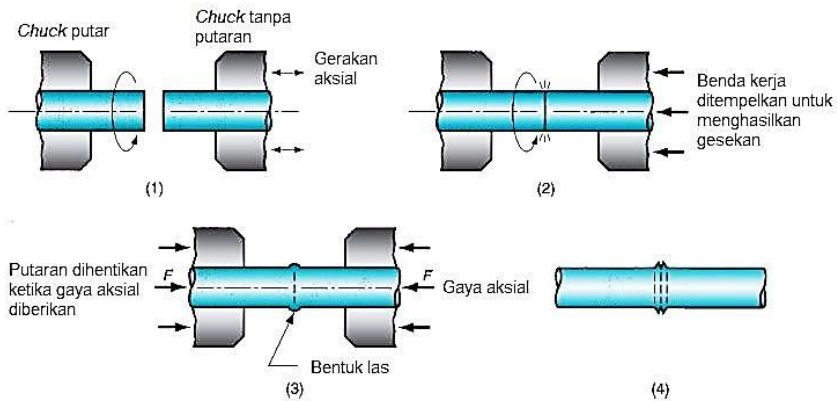


Gambar 39. Jenis-jenis Friction Welding

1.3 Pengelasan Gesek Rotasi (*Rotary Friction Welding*)

Rotary friction welding bekerja dengan mengandalkan panas dari gesekan akibat perputaran benda kerja yang satu terhadap lainnya. Konsep kerjanya, benda dijepit kemudian digesekkan dengan kecepatan dan tekanan tertentu sehingga menimbulkan panas. Karena

panas akibat gesekan, material logam tersebut akan meleleh dan menyatu setelah melalui proses pendinginan. Saat proses pencairan logam dengan gesekan terjadi, penekanan arah aksial diberikan (ASM Handbook, 1993).



Gambar 40. Proses rotary friction welding

Pada Gambar 40. dapat dilihat proses *rotary friction welding* yaitu :

1. Salah satu *chuck* beserta benda kerjanya berputar dan *chuck* satunya bergerak aksial setelah setup mesin dan benda kerja.
2. Benda kerja ditempelkan dengan tekanan tertentu untuk menghasilkan gesekan dan panas. Peningkatan temperatur terjadi karena adanya sumber panas yaitu gesekan *interface* antara dua benda kerja.
3. Putaran dihentikan dan gaya aksial (tempa) diberikan supaya terjadi sambungan dengan durasi waktu secepat mungkin supaya panas yang terjadi tidak hilang.
4. Sambungan las terbentuk, dan yang harus diperhatikan adalah panjang benda kerja akan berkurang karena deformasi plastis yang terjadi.

Keberhasilan *friction welding* dipengaruhi oleh beberapa faktor yang berhubungan dengan sifat material dan kondisi kerja, yaitu :

1. Kondisi Kerja :
 - Kecepatan relatif antar permukaan.
 - Tekanan yang dikenakan.
 - Panas yang terbentuk pada permukaan.

2. Sifat Material :

- Sifat *bulk* dari material.
- Kondisi permukaan dan kehadiran lapisan tipis pada permukaan.

Pada proses *friction welding* timbulnya panas dipermukaan dikontrol oleh kecepatan relatif antar permukaan, tekanan yang diberikan dan durasi penekanan. Panas yang dihasilkan pada permukaan merupakan parameter yang kritis untuk menghasilkan sambungan yang baik. Dan hal tersebut tergantung dari kondisi proses dan material yang disambung. Sifat *bulk* material dan kondisi permukaan mempengaruhi karakteristik gaya gesek dan tekan dari material yang disambung. Untuk mendapatkan hasil yang baik diperlukan dua persyaratan yaitu :

- Material yang disambung harus memiliki sifat mampu tempa (*forgeability*) yang baik.
- Mampu menimbulkan gesekan pada *interface*.

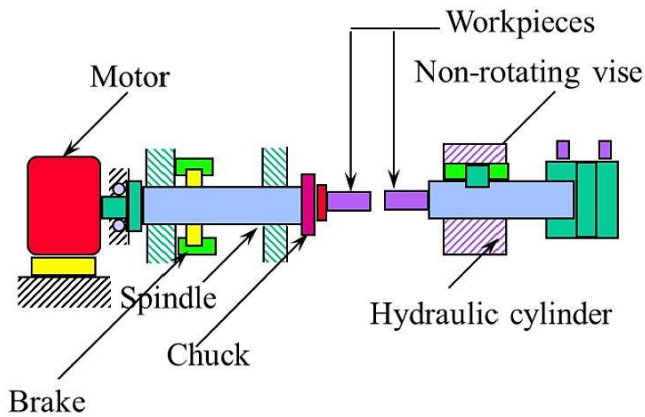
Oleh karena itu material yang disambung tidak boleh yang memiliki sifat getas dan memiliki *dry lubrication* seperti besi tuang, keramik dan bahan karbida. Kemudahan material untuk disambung menggunakan *friction welding* berkaitan dengan kecocokan pada sifat *interface*-nya. Jika kedua sifat material yang akan disambung cocok, maka panas akan didistribusikan secara seragam pada kedua bagian yang akan disambung. Karakteristik deformasi yang identik akan mempermudah proses penyambungan atau penyatuan *interface*. Hal ini akan menghasilkan lasan yang seragam dan hasil sifat lasanya baik. Untuk mekanisme penyambungan pada logam yang tidak sejenis lebih kompleks dan dipengaruhi oleh beberapa faktor yang meliputi sifat fisis dan mekanis, struktur kristal, kelarutan serta senyawa antar logam.

1.4 Teknologi *Friction Welding*

Ada dua kategori pada proses *friction welding*, yaitu *direct drive welding* dan *inertia drive welding*. *Direct drive welding* atau sering

disebut sebagai konvensional *friction welding*, menggunakan motor yang memiliki kecepatan konstan sebagai energi masukannya. Sedangkan *inertia drive welding* atau sering juga disebut dengan *flywheel friction welding* menggunakan energi yang tersimpan dalam *flywheel* sebagai energi masukan dalam proses penyambungan. Kedua teknologi ini menghasilkan efek metalurgi yang sangat berbeda pada *interface*. Kedua teknologi ini dapat diterapkan melalui berbagai jenis gerak relatif untuk menghasilkan gesekan yang diperlukan untuk pengelasan. Geometri paling umum yaitu satu komponen silinder diam dan yang lainnya diputar. Namun metode lain juga bisa diterapkan, yaitu kedua komponen diputar berlawanan arah.

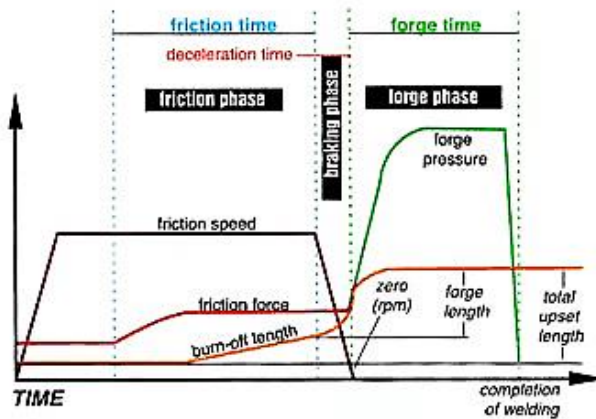
1.4.1 Proses *Direct Drive Welding*



Gambar 41. Skema proses *direct drive welding*

Pada proses *direct drive welding*, mesin atau peralatannya menyerupai mesin bubut yang dilengkapi dengan kopling dan rem. Perlengkapan lain berupa penekan aksial yang dapat dikontrol, dan pencatat waktu (*timer*) selama proses pengelasan. Pengoperasian proses *direct drive welding* dimulai dari tahap gesekan dimana panas dibangkitkan (*heat generated*), tahap pemberhentian (*brake*) dimana putaran dihentikan dan tahap tempa (*forging*) dimana tekanan lanjut diberikan pada *interface* sambungan. Sehubungan dengan tahapan selama proses *friction welding*, dapat dilihat dari Gambar 41. dimana

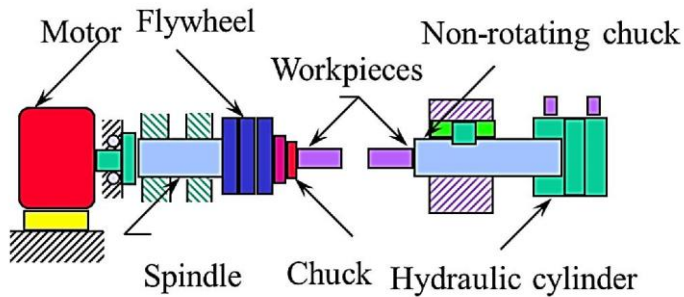
menunjukkan hubungan kecepatan putar dan penekanan terhadap fungsi waktu. Waktu dimana proses *friction* harus berhenti merupakan faktor yang penting, karena memiliki efek pada temperatur dan saat penekanan lanjut. Penekanan lanjut (*forge pressure*) dilakukan seketika dimana tekanan tinggi dikenakan pada saat penyambungan. Jadi penekanan berlangsung pada saat putaran mulai berhenti. Tekanan yang tinggi dapat secara tidak langsung memberhentikan putaran seperti pada Gambar 42, yang menggambarkan proses penekanan lanjut pada saat putaran berhenti. Untuk itu perlu diperhitungkan waktu yang tepat dalam pemberhentian putaran dan pemberian tekanan lanjut.



Gambar 42. Grafik tahapan proses *direct-drive welding*

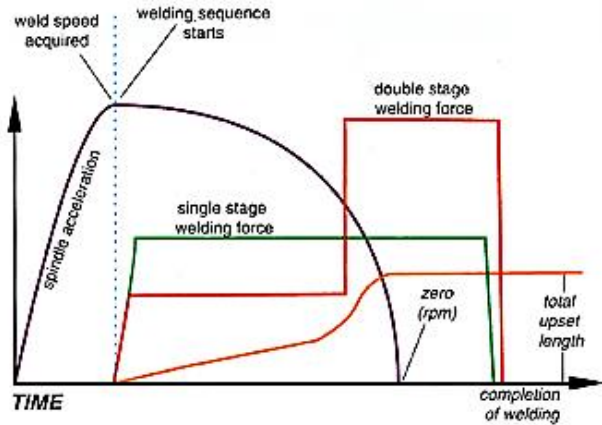
Kecepatan putaran merupakan variabel yang sensitif dalam menentukan lamanya waktu gesekan dan besarnya penekanan arah aksial. Untuk baja direkomendasikan menggunakan kecepatan putaran antara 1000-1800 rpm. Umumnya putaran yang lebih tinggi berhubungan dengan *heat input* yang rendah dan digunakan untuk material yang sensitif terhadap panas seperti baja yang mampu dikeraskan (*hardenable steels*). *Friction force* digunakan untuk membantu kontak awal yang lebih baik. Untuk material baja karbon memiliki *friction force* yang direkomendasikan sekitar 70 MPa antar permukaan benda kerja untuk mendapatkan kualitas sambungan yang baik. Ketika putaran diberhentikan seketika itu pula *forge pressure* diberikan untuk menyempurnakan proses penyambungan. Gaya penekanan lanjut untuk baja direkomendasikan sekitar 140 MPa untuk menghasilkan sambungan yang baik (ASM Handbook, 1993).

1.4.2 Proses *Inertia Drive Welding*



Gambar 43. Skema proses inertia drive welding

Pada proses *inertia drive welding* menggunakan mesin serupa kecuali pada *spindle* yang diberi *flywheel* sebagai penyimpan tenaga seperti terlihat pada Gambar 43. *Flywheel* pada proses ini digunakan sebagai pengontrol *heat input* pada daerah sambungan. Untuk itu momen inersia *flywheel* sangat penting untuk diperhitungkan. Untuk itu *flywheel* dirancang agar dapat ditambah atau dikurangi masanya. Jumlah energi yang tersimpan dalam *flywheel* dikontrol oleh kecepatannya. Setelah *spindel* berada pada kecepatan yang diinginkan, sistem *drive* dilepas, meninggalkan *flywheel* yang berputar. Kemudian tekanan aksial diberikan secara konstan selama proses pengelasan. Tekanan yang diberikan menghasilkan penurunan kecepatan putaran (*deceleration*). Ketika spindel hampir berhenti atau berhenti total, *forge pressure* yang lebih tinggi berikan. Gambar 42 menunjukkan grafik tahapan pada proses *inertia drive welding*. Perbedaan utama dengan *direct drive welding* yaitu pada *friction speed*. Pada *inertia drive welding*, *friction speed* secara *continue* menurun saat gesekan berlangsung. Sedangkan pada *direct drive welding*, *friction speed* konstan dan diberhentikan secara tiba-tiba oleh kopling dan rem (ASM Handbook, 1993).



Gambar 43. Grafik tahapan proses *inertia-drive welding*

1.5 Kelebihan dan kekurangan *friction welding*

1.5.1 Kelebihan

Gesekan yang digunakan pada *friction welding* adalah sebagai sumber panas yang sangat efisien, selain itu gesekan juga memberikan tindakan pembersihan yang efektif. Berbagai inklusi asing seperti pengotor (oksidasi pada permukaan) dan lapisan-lapisan yang menghalangi pembentukan sambungan akan terabrasi dan terdeformasi kebagian luar oleh abrasi yang dihasilkan oleh gesekan. Oleh karena itu hasil pengelasan menjadi lebih kuat. Berikut ini daftar lebih lanjut beberapa kelebihan *friction welding* yaitu :

1. Memungkinkan penyambungan berbeda material (*dissimilar metals*) yang biasanya tidak kompatibel untuk pengelasan dengan metode lainnya.
2. Tidak memerlukan logam pengisi (*filler*), pelindung (*flux*) dan gas pelindung selama proses pengelasan.

3. Kebersihan permukaan sambungan tidak diperlukan, karena selama proses gesekan permukaan akan terabrasi dan terdeformasi kebagian luar.
4. Daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) yang kecil dan sempit karena waktu pengelasan yang cepat dan panas langsung pada *interface*.
5. Hanya melibatkan pemanasan lokal, tidak ada proses peleburan yang membuat *material propertis* hampir tidak terpengaruh.
6. Proses yang aman dan ramah lingkungan karena tidak ada gas, asap atau percikan api yang dihasilkan dan meminimalkan kebutuhan untuk membersihkan residu setelah pengelasan.
7. Proses solid state - tidak ada kemungkinan inklusi porositas atau terak.
8. Pengelasan permukaan penuh memberi kekuatan lasan yang lebih baik di area kritis.
9. Proses cepat dan efektif sehingga pengerjaan lebih ekonomis.

1.5.2 Kekurangan

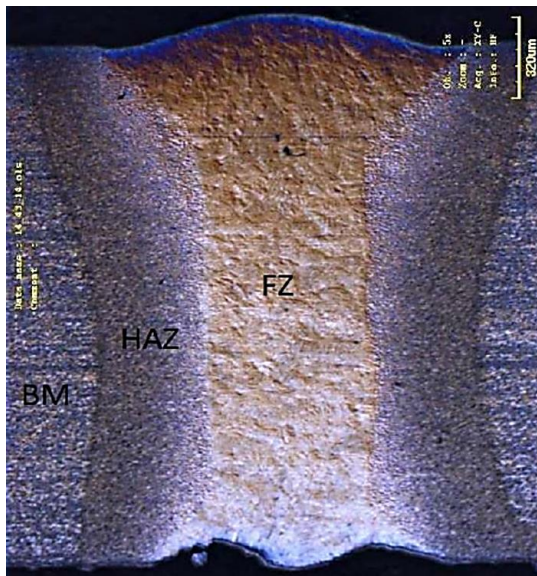
Sedangkan beberapa kekurangan dari *friction welding* yaitu :

1. Desain sambungan yang terbatas pada permukaan plat dan bentuk batang bulat.
2. Biaya persiapan mesin tinggi.
3. Persiapan benda kerja lebih penting daripada membuat lasan.
4. Salah satu material yang disambung harus memiliki sifat mampu dideformasi secara plastis (*forgeable*).
5. Benda yang akan disambung harus simetris.

1.6 Daerah *Heat Affected Zone* dan *Fusion Zone*

Sebagaimana diketahui bahwa logam pada hasil *friction welding* dapat dikategorikan menjadi 3 bagian, yaitu : *base metal* (benda kerja awal), *heat affected zone* (HAZ) merupakan daerah yang terpengaruh

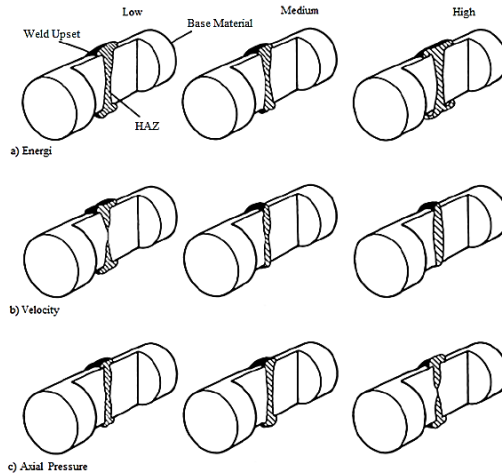
panas serta *fusion zone* (FZ) merupakan daerah sambungan *interface*). *Base metal* adalah bagian logam dasar dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan struktur maupun sifat pada logam tersebut. *Heat affected zone* (HAZ) adalah logam dasar yang bersebelahan dengan daerah sambungan las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan sehingga daerah ini menjadi daerah yang paling kritis dari sambungan las. *Fusion zone* adalah bagian dari material yang tersambung antar *interface* setelah mengalami difusi dan deformasi plastis dalam jumlah yang cukup besar. *Fusion zone* dimulai dan berakhir pada bagian-bagian material yang telah bersatu atau tersambung, dan akan memiliki komposisi kimia yang merupakan campuran dari substrat yang dilas bersama (Setyawan, 2014).



Gambar 44. Zona-zona yang terbentuk hasil friction welding

Struktur logam pada sambungan akan berubah secara berangsur dari struktur logam induk menuju ke daerah HAZ, kemudian menuju ke struktur *fusion zone*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 44. Pada daerah HAZ yang dekat dengan garis *fusion zone*, kristalnya akan mengalami pertumbuhan dengan cepat pada saat proses pengelasan berlangsung sehingga membentuk butir-butir kasar. Pembesaran butir dan struktur berubah sesuai dengan siklus termal yang terjadi saat pengelasan dilakukan. Perubahan struktur mikro dan ketangguhan akan

saling terkait pada logam hasil pengelasan. Butir-butir kasar yang terjadi pada daerah HAZ akan menyebabkan material menjadi getas, penggetasan juga dapat disebabkan karena konsentrasi tegangan. Pembentukan daerah HAZ pada *friction welding* dipengaruhi oleh variasi tekanan aksial dan variasi kecepatan putaran. Tekanan yang berlebihan akan menghasilkan sambungan lasan yang memiliki kualitas buruk.



Gambar 45. Skematik pengaruh parameter pengelasan pada material sejenis (similar)

Momen inersia *flywheel* ditentukan untuk menghasilkan jumlah energi kinetik yang diinginkan. Variasi energi yang terjadi pada *flywheel* dikombinasikan dengan tekanan aksial, menghasilkan *welding force*. *Welding force* dimulai pada beberapa kecepatan kritis, jumlah *welding force* tergantung pada jumlah energi yang tersisa pada *flywheel*. Meskipun energi *flywheel* kecil, sedang, dan besar akan menghasilkan pola pemanasan yang sama, jumlah energi sangat mempengaruhi ukuran dan bentuk sambungan las, seperti ditunjukkan pada Gambar 45 (a) untuk sambungan logam sejenis (*similar*).

Pada variasi kecepatan putaran untuk pengelasan baja dengan baja, kecepatan putaran yang disarankan berkisar antara 1000-1800 rpm. Gambar 45 (b) menunjukkan efek dari variasi kecepatan putaran pada bentuk sambungan untuk lasan logam sejenis (baja – baja).

Pada variasi tekanan aksial yang diberikan, dapat dilihat efek pemberian tekanan aksial yang berlebihan menghasilkan sambungan yang memiliki kualitas buruk di bagian tengah dan memiliki hasil lasan yang jelek, mirip dengan hasil sambungan yang dibuat dengan variasi kecepatan putaran rendah, terlihat pada Gambar 45 (c).

1.7 Friction Welding untuk material sejenis (*similar metals*)

Terdapat dua persyaratan umum pada *friction welding* untuk mendapatkan hasil yang baik. Pertama, bahwa material harus memiliki sifat mampu dideformasi secara plastis (*forgeable*) dan kedua, bahwa material dapat mampu menghasilkan gesekan *interface*. Persyaratan pertama mengeliminasi dari material yang bersifat rapuh seperti *ceramics*, *cast irons*, dan *cemented carbides*. Tetapi material yang disyaratkan ini kadang-kadang bisa menyatu dengan material tersebut (yang bersifat rapuh). Persyaratan kedua menghilangkan material yang mengandung paduan yang memberikan pelumasan kering. Paduan tersebut biasanya yang mengandung grafit seperti pada besi tuang. Hampir semua paduan logam dapat dilas menggunakan dengan metode *friction welding*. Beberapa sambungan umum untuk material sejenis yang dibuat menggunakan metode *inertia drive welding* dapat dilihat pada Tabel 4. Paduan logam yang dapat membentuk sambungan las berkualitas baik yaitu paduan dengan dasar material: aluminium, tembaga (tembaga-nikel, kuning, perunggu), baja (baja paduan rendah, baja perkakas, baja tahan karat), nikel, titanium, dan banyak lainnya.

Sifat material yang sama membuat panas didistribusikan secara merata pada *interface*, dan karakteristik deformasi identik pada kedua sisi sambungan. Sehingga menghasilkan lasan simetris dengan sifat yang baik. Umumnya, variasi proses pengelasan tidak berbeda secara signifikan untuk paduan yang berbeda pada material tertentu.

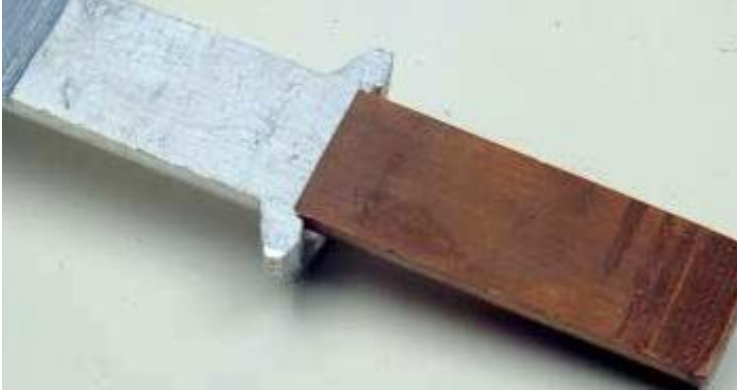
Karena *friction welding* menghasilkan pemanasan lokal pada *interface*, HAZ muncul pada proses pendinginan karena terjadi perpindahan panas menuju logam induk. Pendinginan ini mengubah sifat mekanik material di daerah HAZ, sehingga diperlukan perlakuan panas setelah proses pengelasan. Perlakuan panas ini berfungsi untuk mengembalikan keuletan dan tegangan sisa.

Tabel 4. Parameter *inertia drive friction welding* dengan diameter benda kerja 1 inch (ASM Handbook)

WORK METAL	SPINDLE SPEED, REV/MIN	AXIAL FORCE		FLYWHEEL SIZE		WELD ENERGY		METAL LOSS		TOTAL TIME , S
		KN	LBF × 10 ³	KG M ²	LB FT ²	KJ	FT LBF × 10 ³	MM	IN.	
1018 STEEL	4600	53	12	0.28	6.7	33	24	2.5	0.10	2.0
1045 STEEL	4600	62	14	0.33	7.8	38	28	2.5	0.10	2.0
4140 STEEL	4600	67	15	0.35	8.3	41	30	2.5	0.10	2.0
INCONEL 718	1500	220	50	5.48	130.0	68	50	3.8	0.15	3.0
MARAGING STEEL	3000	90	20	0.84	20.0	41	30	2.5	0.10	2.5
TYPE 410 STAINLESS	3000	80	18	0.84	20.0	41	30	2.5	0.10	2.5
TYPE 302 STAINLESS	3500	80	18	0.59	14.0	41	30	2.5	0.10	2.5
COPPER (COMMERCIALY PURE)	8000	22	5	0.04	1.0	14	10	3.8	0.15	0.5
COPPER ALLOY 260 (CARTRIDGE BRASS, 70%)	7000	22	5	0.05	1.2	14	10	3.8	0.15	0.7
TITANIUM ALLOY, TI-6AL-4V	6000	36	8	0.07	1.7	22	16	2.5	0.10	2.0
ALUMINUM ALLOY 1100	5700	27	6	0.11	2.7	20	15	3.8	0.15	1.0

Friction Welding untuk Material Non-Sejenis (Dissimilar Metals)

Banyak industri fabrikasi menggunakan metode *friction welding* untuk material sejenis (*similar metals*) karena pertimbangan ekonomi. Selain itu banyak pula menggunakan metode *friction welding* untuk material tidak sejenis (*dissimilar metals*) karena tidak ada metode pengelasan alternatif lainnya yang dapat digunakan. Contoh dari jenis sambungan ini yaitu kombinasi *dissimilar metals* yang memiliki titik leleh yang sangat berbeda dan kombinasi *dissimilar metals* yang memiliki fase yang tidak cocok ketika pengelasan fusi.



Gambar 46. *Friction welding* antara aluminium dengan baja

Parameter umum yang digunakan untuk pengelasan *dissimilar metals* terlihat pada Tabel 5. pengelasan antara baja karbon rendah dan baja karbon sedang dapat menggunakan berbagai metode pengelasan, sedangkan baja karbon tinggi dan baja paduan dapat menggunakan metode *friction welding*. Masalah sering ditemui ketika mengelas dengan *similar metals* dan *dissimilar metals*. Namun, beberapa masalah hanya terkait dengan pengelasan *dissimilar metals* dikarenakan banyak faktor yang berpengaruh (Taban, 2010).

Tabel 5. Parameter untuk *inertia drive friction welding* untuk material tidak sejenis pada diameter benda kerja 1 inch (ASM Handbook)

WORK METAL	SPINDLE SPEED, REV/MIN	AXIAL FORCE		FLYWHEEL SIZE		WELD ENERGY		METAL LOSS		TOTAL TIME , S
		KN	LBF × 10 ³	KG · M ²	LB · FT ²	KJ	FT · LBF × 10 ³	MM	IN.	
Copper to 1018 steel	8000	22	5	0.06	1.4	20	15	3.8	0.15	1.0
M2 tool steel to 1045 steel	3000	180	40	1.14	27.0	54	40	2.5	0.10	3.0
Nickel alloy 718 to 1045 steel	1500	180	40	5.48	130.0	68	50	3.8	0.15	2.5
Type 302 stainless to 1020 steel	3000	80	18	0.84	20.0	41	30	2.5	0.10	2.5
Sintered high-carbon steel to 1018	4600	53	12	0.35	8.3	41	30	2.5	0.10	2.5
Aluminum 6061 to type 302 stainless	5500	22	5	0.16	3.9	27	20	5.1	0.20	3.0
Copper to aluminum alloy 1100	2000	33	7.5	0.46	11.0	10	7.5	5.1	0.20	1.0

Faktor-faktor yang berpengaruh pada sambungan *dissimilar metals* antara lain : *joint interfaces, low-melting phases, brittle phases,* dan *different thermal expansions* (Rombaut, 2011).

1. Joint Interfaces

Pada umumnya, pengelasan material sejenis dilakukan dengan sedikit perhatian untuk persiapan permukaan, berbeda dengan pengelasan material tidak sejenis yang lebih sensitif. Ini terjadi karena beberapa alasan, contohnya pengelasan pada baja tahan karat (*stainless steel*) dengan material paduan aluminium. Permukaan oksida yang terbentuk pada paduan aluminium mengambil kontaminan seperti air dan hidrokarbon, membentuk lapisan permukaan yang sangat tangguh. Jika lapisan ini tidak dihilangkan sebelum pengelasan, maka lasan dengan struktur yang buruk dapat terbentuk. Paduan ini menyebabkan pengurangan integritas struktural melalui pembentukan fasa leleh yang bersifat getas pada *interface* lasan. Permukaan pada *interface* yang memerlukan persiapan permukaan sebelum pengelasan antara lain baja yang terkarburasi atau ternitridasi, paduan titanium yang ternitridasi dan paduan-paduan lainnya yang mengalami pengerasan permukaan (*hardfaced*). *Hardfaced* ini memiliki koefisien gesek dan *forgeability* yang rendah sehingga sulit dilakukan *friction welding*.

2. Low-Melting Phases

Melting point adalah temperatur dimana zat padat berubah wujud menjadi zat cair pada tekanan satu atmosfer dimana suhu ketika fase padat dan cair sama-sama berada dalam kesetimbangan. Beberapa kombinasi material memiliki *melting point* yang sangat rendah yang terjadi pada *interface* saat proses pengelasan. Pembentukan fase-fase ini merusak sifat-sifat mekanik hasil pengelasan. Contoh kombinasi beberapa penelitian yang termasuk dalam kategori ini mencakup paduan berbasis besi untuk paduan titanium dan paduan aluminium untuk paduan magnesium. *Low melting point eutectics* ditemukan pada kedua sistem metalurgi ini, perhatian khusus harus dilakukan selama pengembangan parameter yang cocok untuk mencegah pembentukan fase cair selama proses pengelasan untuk menghasilkan lasan yang baik. Kombinasi lainnya mungkin dipengaruhi oleh kontaminan pada *interface* yaitu paduan sulfur dan fosfor untuk paduan berbasis besi dan paduan bismut untuk paduan tembaga. Kontaminan ini dapat menyebabkan masalah *hot shortness* atau kecenderungan untuk membelah sepanjang batas butir ketika ditekankan atau dideformasi pada suhu mendekati *melting point*. Sangat penting bahwa persiapan permukaan atau pembersihan dilaksanakan ketika bahan mungkin telah terkontaminasi dengan elemen-elemen ini atau dengan material yang mengandung unsur-unsur ini.

3. *Brittle Phases*

Penggetasan atau *brittle phase* merupakan fenomena material yang ditunjukkan dengan adanya perubahan sifat material dari sifat tangguh atau ulet menjadi getas. Sehingga material tersebut menjadi mudah retak atau patah. Ini terjadi karena selama proses pengelasan terbentuk struktur atau fasa yang memberikan efek getas seperti martensit yang bersifat keras tetapi getas. Martensit memiliki banyak tegangan sisa yang dapat menginisiasi terjadinya retak pada baja. Pada pengelasan baja, butir-butir fasa ferit atau bainit yang tumbuh menjadi kasar atau besar merupakan faktor yang dapat menyebabkan baja menjadi lebih getas. Butiran yang besar akan memiliki ikatan antar atom yang lemah sehingga kekuatan pada batas butir menurun. Daerah HAZ memiliki struktur yang berbeda-beda mulai dari logam induk sampai ke struktur *fusion zone*. Perbedaan ini sesuai dengan siklus panas yang dialaminya.

Perbedaan siklus panas, menyebabkan perbedaan struktur, dan perbedaan struktur menyebabkan perbedaan sifat mekanik.

Penggetasan ini pada dasarnya dapat diturunkan dengan memperbaiki struktur daerah HAZ, penggunaan baja yang kurang peka terhadap penggetasan memiliki kandungan karbo rendah, dan memiliki kadar nikel relatif tinggi. Beberapa unsur yang dapat mengurangi kepekaan terhadap penggetasan antara lain Ti, Nb, B, Ca, dan Ce. Penambahan unsur-unsur tersebut dapat menghambat pertumbuhan butiran logam. Butir-butir logam yang halus akan dapat meningkatkan ketangguhan. Sedangkan unsur-unsur yang harus diminimalkan dalam baja adalah oksigen, nitrogen, fosfor, dan sulfur karena unsur-unsur ini merupakan pengotor dalam baja yang harus dihindari karena dapat meningkatkan kepekaan terhadap kegetasan dan menimbulkan retak.

4. *Different Thermal Expansions*

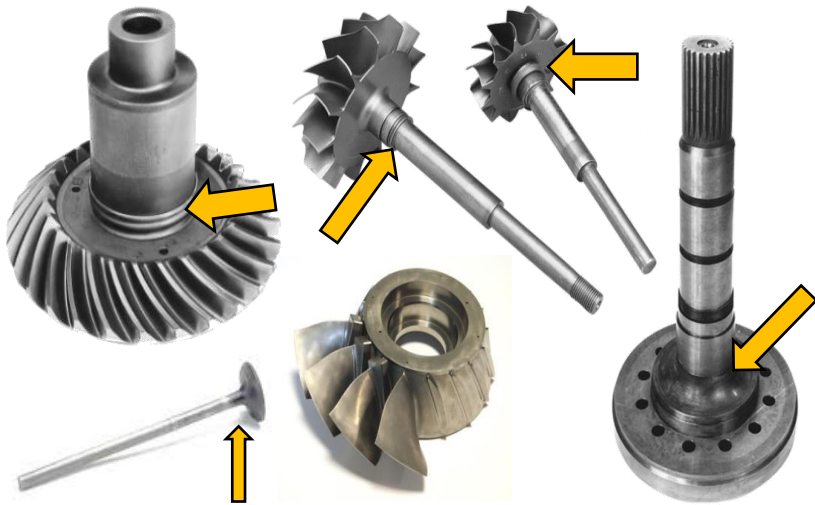
Beberapa kombinasi material akan sulit untuk dilas karena perbedaan besar dalam ekspansi panas. Material berekspansi rendah seperti logam tahan api, keramik, dan paduan besi-nikel dan paduan kobalt kemungkinan gagal selama pendinginan ketika dilas dengan bahan ekspansi tinggi seperti *austenitic stainless steels*, *nickel-base* dan *cobalt-base superalloys*. Penggunaan kombinasi ini mengharuskan desainer untuk mempertimbangkan tekanan lebih besar yang dikembangkan dalam struktur fabrikasi jika pengelasan bermasalah ketika material memiliki perbedaan ekspansi panas yang besar. Material dengan ekspansi menengah dan *multiple friction welding* mungkin diperlukan untuk memungkinkan transisi dari material ekspansi termal tinggi ke rendah.

1.8 Aplikasi *friction welding*

Proses pengelasan dengan metode *friction welding* menghasilkan sambungan *interface* yang terdiri dari material yang sepenuhnya baru sebagai hasil dari sambungan dua material induk. Berbeda dengan pengelasan fusi (cair), material pengisi (*filler*), fluks atau gas pelindung tidak diperlukan untuk *friction welding*. Persiapan sebelum pengelasan gesekan cenderung minimum, permukaan hasil pemotongan dengan

gergaji paling umum digunakan. Karena waktu siklus yang singkat, kemungkinan otomatisasi dan berkurangnya biaya tenaga kerja, adalah salah satu manfaat paling signifikan dari proses tersebut sehingga menjadi lebih ekonomis.

Aplikasi *friction welding* dapat ditemukan dalam berbagai industri dari pertanian, otomotif, industri minyak dan pembangkit listrik seperti di tunjukkan pada Gambar 47. Metode ini dapat menghasilkan komponen mulai dari sambungan *butt* sederhana poros penggerak dan pipa pengeboran minyak hingga komponen mesin pesawat yang rumit. Beberapa contoh aplikasi *friction welding* adalah roda gigi dan katup mesin di industri otomotif, batang piston hidrolis dan *roller track* di industri pertanian, sambungan *blade* turbin dengan *discs* di industri penerbangan dan poros motor listrik di industri pembangkit listrik (Moarrefzadeh, 2012).

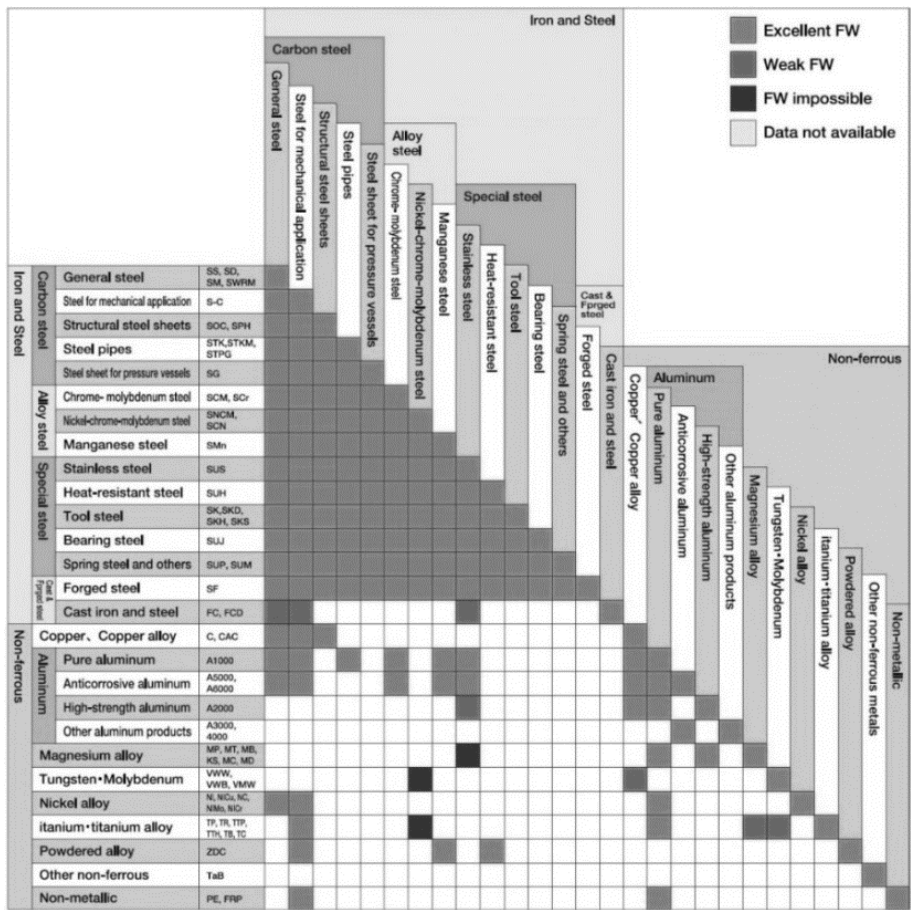


Gambar 47. Aplikasi *friction welding* di dunia industri

1.9 Kombinasi Material Pada *Friction Welding*

Persyaratan umum pada *friction welding* untuk mendapatkan hasil yang baik yaitu material harus memiliki sifat mampu dideformasi

secara plastis dan material dapat mampu menghasilkan gesekan antar permukaan (*interface*). Untuk material tidak sejenis (*dissimilar metals*) yang memiliki titik leleh yang berbeda dan kombinasi material yang memiliki fase yang tidak cocok ketika pengelasan fusi, maka kombinasi material ini harus melalui beberapa penelitian untuk memperoleh data sehingga dapat diketahui hasil sambungan dari kombinasi material tersebut. Gambar 48 menunjukkan kombinasi material pada *friction welding* dari literatur penelitian sebelumnya (Rombaut, 2011).



Gambar 48. Kombinasi material pada *friction welding* (Rombaut, 2011).

DAFTAR BAHAN BACAAN

- ASM Handbook. (1993). *Welding, Brazing and Soldering* (Vol. 6). United States Of America: ASM International.
- ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (Vol. 2). United States Of America: ASM International Handbook Committee.
- ASM International. (1998). *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (Vol. 2). Metals Handbook.
- AY, İ., Çelik, S., & Çelik, İ. (1999). Comparison Of Properties Of Friction and Diffusion Welded Joints Made Between The Pure Aluminium and Copper Bars. *VOL. 2*.
- Haidemenopoulos, G. N., Zervaki, A. D., H. Kamoutsis, Hontzopoulos, E., & Mangana, F. (2013). Fracture behavior of bimetallic Al-Cu LBW joints. *3rd International Conference of Engineering Against Failure (ICEAF III)*.
- Hu, Y., Tsujino, R., Higashi, T., Ueda, Y., & Iguchi, M. (2014). Development of Al/Cu Dissimilar Joint by New Friction Welding Method. *The 3rd International Conference on Design Engineering and Science*.
- Irawan, Y. S., Wirohardjo, M., Ma'arif, M.S. (2012). Tensile Strength of Weld Joint Produced by Spinning Friction Welding of Round Aluminum A6061 with Various Chamfer Angles. *Advanced Materials Research* Vol. 576, 761-765.
- Jeslin, B., Kumar, M. D., & Venkatakrishnan, P. G. (2015). Parameter Optimization on Friction Welding of Aluminium Alloy 6082T6 & Copper. *International Journal Of Innovative Reseach In Technology, Volume 1(Issue 12)*.
- Mila, V. D., Radovanovi, R. V., Mila, M. D., & Gligorijevi, B. R. (2016). Effect Of Friction Welding Parameters On The Morphological Properties Of An Al/Cu Bimetalic Joint. *Materials and technology*.
- Moarrefzadeh, A. (2012). Study of Heat Affected Zone (HAZ) in Friction Welding Process. *Journal of Mechanical Engineering, Vol. 1*.
- Pah, J. C. A., Irawan, Y. S., & Suprpto, W. (2018). Pengaruh Waktu dan Tekanan Gesek Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan

- Paduan Aluminium dan Baja Karbon Pada Pengelasan Gesek Continuous Drive. *Jurnal Rekayasa Mesin, Vol.9*.
- Purnomo, A., Bayuseno, A., Nugroho, S., & Haryanto, P. (2012). Pengaruh Kecepatan Putar dan Tekanan Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Sambungan Friction Welding Antara Bahan Paduan Tembaga dan Paduan Aluminium. *Polines National Engineering Seminar*.
- Rombaut, P. (2011). Joining of dissimilar materials through rotary friction welding. *Mechanical Construction and Production*.
- Sahin, M., & Misirli, C. (2013). Mechanical and Metalurgical Properties of Friction Welded Aluminium Joints. *Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications, Chapter 11*.
- Setyawan, P. E., Irawan, Y. S., & Suprpto, W. (2014). Kekuatan Tarik dan Porositas Hasil Sambungan Las Gesek Aluminium 6061 dengan Berbagai Suhu Aging. *Jurnal Rekayasa Mesin, Vol.5*, 141-148.
- Sahin M, Akata HE (2003) Joining with friction welding of plastically deformed steel. *J Mater Process Technol* 142(1):239–246
- Santoso, Eko B., Irawan, Y.S., Sutikno, E. (2012). Pengaruh Sudut Chamfer dan Gaya Tekan Akhir Terhadap Kekuatan Tarik dan Porositas Sambungan Las Gesek Al-Mg-Si. *Jurnal Rekayasa Mesin. Vol.3, No. 1*, 293-298.
- Surdia, T. & Saito, S. (1999). *Pengetahuan Bahan Teknik*.
- Taban, E., Gould, J. E., & Lippold, J. C. (2010). Dissimilar Friction Welding of 6061-T6 Aluminum and AISI 1018 Steel. *Materials and Design. Elsevier, Vol. 31*, 2305-2311.
- Trykov, Y., Gurevich, L., Pronichef, D., & Trunov, M. (2014). Influence of Strain-Hardened Zones and Intermetallic Layers of Explosion Welded and Heat Treated Al/Cu Laminated Metal Composites on the Evolution of Thermal Conductivity Coefficient. *Material Science, Vol. 20*.
- Wei, Y., Li, J., Xiong, J., & Zhang, F. (2016). Investigation of interdiffusion and intermetallic compounds in Al–Cu joint produced by continuous drive friction welding. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 90–95.