

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Wiratmaja (2007), meneliti tentang pengaruh jarak kampuh las, kuat arus listrik dan kecepatan pengelasan SMAW terhadap kekuatan tarik baja ST 37. Variasi jarak kampuh las 1 mm dan 2 mm. Variasi kuat arus 60 A, 85 A, 110 A. Setiap proses pengelasan dihitung jarak waktu tempuhnya untuk mendapatkan data kecepatan pengelasan. Hasil penelitian ini diperoleh kekuatan tarik terbesar adalah 840 MPa dengan variasi jarak kampuh 2 mm, kuat arus 110 A dan kecepatan pengelasan 1,52 mm/det.

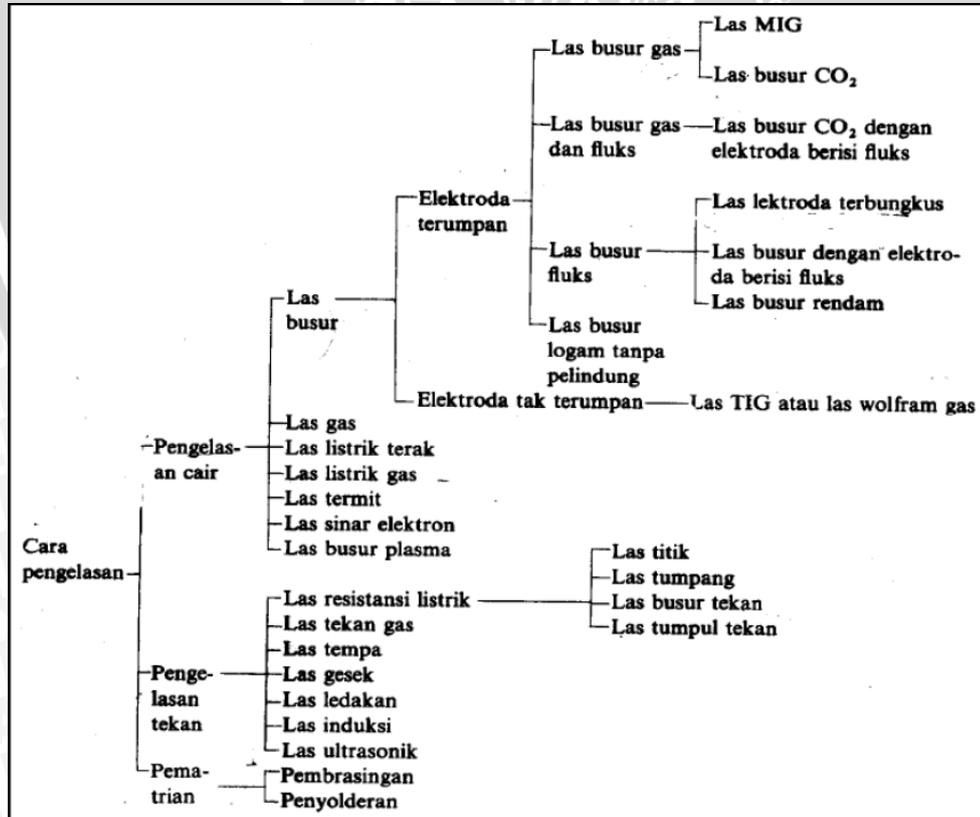
Pamungkas (2009), meneliti tentang perbandingan elektroda E 7016 dan E 7018 proses SMAW pada plat ASTM A36 dengan tipe *butt joint* terhadap kekuatan tarik dan lebar HAZ. Dari penelitian tersebut diketahui bahwa patahan pada spesimen uji rata-rata berada di daerah *base metal*. Hal ini dapat diartikan bahwa kekuatan daerah *weld metal* dan HAZ (baik spesimen las E 7016 dan E 7018 adalah lebih besar dari pada kekuatan *base metal*nya sendiri. Dan lebar HAZ pada spesimen las elektroda E 7018 lebih lebar dari pada spesimen las elektroda E 7016.

Amin (2012), meneliti tentang pengaruh besar arus *temper bead welding* terhadap ketangguhan hasil las SMAW pada baja ST 37 dengan kampuh las V tunggal bersudut 60° . variasi kuat arus antar lapisan yaitu: P1= 70/70 Amper, P2=70/80 Amper, P3=80/70 Amper. Elektroda yang digunakan adalah E 6013. Perlakuan yang memberikan ketangguhan HAZ tertinggi pada perlakuan P1H dengan besar arus 70/70 amper yaitu 57,367 Joule dan terendah adalah 53,571 Joule pada perlakuan P3H dengan besar arus 80/70 amper. Perlakuan yang memberikan kekuatan *impact* HAZ tertinggi pada perlakuan P1H dengan besar arus 70/70 amper yaitu $0,716 \text{ J/mm}^2$ dan terendah yaitu $0,699 \text{ Joule/mm}^2$ pada perlakuan P3H. Perlakuan yang memberikan ketangguhan logam las tertinggi yaitu 57,593 Joule pada perlakuan P1 (besar arus 70/70 amper) dan terendah pada perlakuan P2 (besar arus 70/80 amper) yaitu 57,374 Joule. Perlakuan yang memberikan kekuatan *impact* logam las paling tinggi terjadi pada perlakuan P1 (besar arus 70/70 amper) dan P3 (besar arus 80/70 amper) yaitu sama-sama $0,718 \text{ Joule/mm}^2$ dan terendah pada perlakuan P2 (besar arus 70/80 amper) yaitu $0,717 \text{ Joule/mm}^2$.

2.2 Definisi dan Klasifikasi Pengelasan

Berdasarkan definisi dari Deutsche Industrie Normen (DIN) las adalah ikatan metallurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Sedangkan Messler (1993) menyatakan pengelasan adalah suatu proses dimana material dengan tipe atau kelas yang sama disatukan dan menyebabkan penyambungan melalui kombinasi panas dan tekanan. Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan energi panas. Berdasarkan klasifikasi pengelasan dibagi menjadi tiga kelas utama yaitu :

1. Pengelasan cair adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan hingga mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau sempuran api gas yang terbakar.
2. Pengelasan tekan adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga menjadi satu.
3. Pematrian adalah cara pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah. Dalam cara ini logam induk tidak ikut mencair.

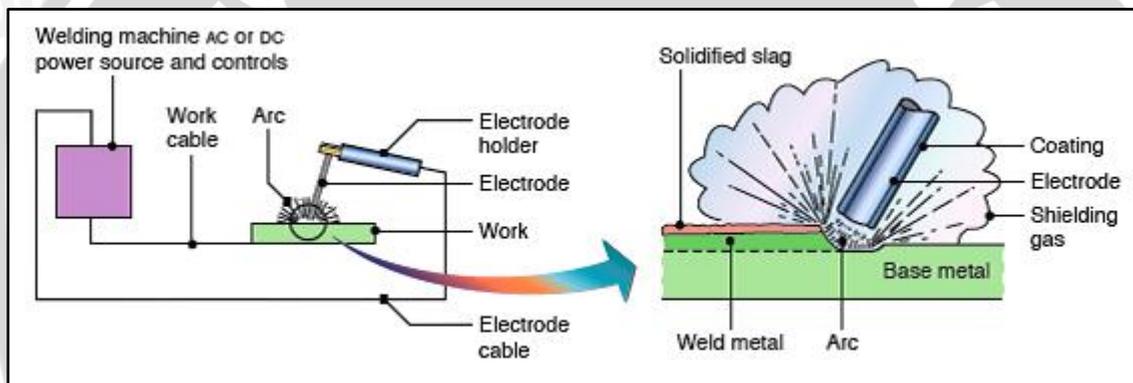


Gambar 2.1 Klasifikasi pengelasan

Sumber : Wiryosumarto, 2000 : 8

2.3 Pengelasan SMAW

Salah satu cara pengelasan yang sering dipergunakan dalam praktek dan termasuk klasifikasi las busur listrik adalah las elektroda terbungkus yang biasa disebut dengan SMAW (*Shield Metal Arc Welding*). Las elektroda terbungkus biasa digunakan dalam pengelasan masa ini. Dalam pengelasan cara ini digunakan kawat elektroda logam yang dibungkus dengan fluks. Pada gambar 2.2 dapat dilihat dengan jelas bahwa busur listrik terbentuk di antara logam induk dan ujung elektroda. Karena panas dari busur ini maka logam induk dan ujung elektroda tersebut mencair dan kemudian membeku bersama. Proses pemindahan logam elektroda terjadi pada saat ujung elektroda mencair dan membentuk butir-butir yang terbawa oleh arus busur listrik yang terjadi.



Gambar 2.2 Ilustrasi proses pengelasan
Sumber : Schmid, 2008 : 6

Pola pemindahan logam cair seperti diterangkan di atas sangat sangat mempengaruhi sifat mampu las dari logam. Secara umum logam dapat mempunyai sifat mampu las tinggi jika pemindahan terjadi pada butiran halus. Sedangkan pola pemindahan cairan dipengaruhi oleh besar kecilnya arus dan juga komposisi dari bahan fluks yang digunakan (Wiryosumarto, 2000:9).

SMAW dapat beroperasi pada *direct current (DC) power supplies* dengan elektroda positif atau negatif. Atau dengan *alternating current (AC) power supplies* tergantung pada desain *coating*. (Kou, 2003 : 66)

2.4 Elektroda Las

Elektroda adalah logam pengisi yang berperan di dalam proses pengelasan. Elektroda juga ikut menentukan kekuatan dari hasil pengelasan, karena itu jenis

elektroda harus dipilih sesuai dengan jenis material logam induk karena elektroda ini akan mencair dan menyatu dengan logam induk. Elektroda yang digunakan pada proses las busur listrik adalah elektroda yang terbungkus oleh fluks dan mempunyai komposisi logam inti yang berbeda – beda.

Sesuai dengan jenis logam yang dilas, maka kawat las atau elektroda dapat dibedakan menjadi empat golongan yaitu :

1. Elektroda baja karbon (*mild steel arc welding electrodes*) : elektroda ini dipakai untuk mengelas baja lunak, baja – baja dengan prosentase karbon yang rendah.
2. Elektroda baja campuran (*alloy steel arc welding electrodes*) : elektroda ini digunakan untuk mengelas baja campuran, misalnya baja stainless.
3. Elektroda bukan besi (*nonferrous arc welding electrodes*) : elektroda ini dipakai untuk mengelas bahan – bahan bukan besi atau baja, misalnya aluminium, kuningan dan perunggu.
4. Elektroda besi tuang (*cast iron arc welding electrodes*) : elektroda ini dipakai untuk mengelas besi tuang dan sejenisnya.

Klasifikasi elektroda menggunakan kode dan digunakan untuk mengelompokkan elektroda – elektroda dari perbedaan pabrik pembuatnya terhadap kesamaan dan jenis pemakainya. Klasifikasi elektroda menurut standar AWS (*American Welding Society*) dan ASTM (*American Society for Testing Material*) dinyatakan dengan tanda E diikuti oleh 4 digit angka.

Elektroda baja lunak dan baja paduan untuk las busur listrik menurut klasifikasi AWS (*American Welding Society*) dinyatakan dengan tanda E xxx yang artinya adalah sebagai berikut :

- E menyatakan elektroda busur listrik
- xx terdepan menyatakan kekuatan tarik bahan las setelah dilaskan. Misalnya E 6010 berarti bahan tersebut kuat tariknya setelah dilaskan sebesar 60.000 psi.
- x (angka ketiga) menyatakan posisi pengelasan yang tepat atau paling sesuai dengan bahan las tersebut. Misalnya E6010, angka 1 menunjukkan boleh dipergunakan untuk semua posisi.
- x (angka keempat) menyatakan jenis arus listrik yang sesuai untuk elektroda dan tipe lapisan pelindung dipakai pengelasan. Misalnya E7028 angka 8 menunjukkan zat lapis pelindung yang terbuat dari *low hydrogen potassium, iron powder*. (Widharto, 2006 : 104)

Tabel 2.1 Spesifikasi elektroda terbungkus

Klasifikasi AWS-ASTM	Jenis Fluks	Posisi Pengelasan	Jenis Listrik	Kekutan Tarik (MPa)	Kekuatan Luluh (MPa)	Perpanjangan (%)
E6010	<i>High Cellulose</i>	F,V,OH,H	DC Polaritas Balik	510	430	27
E6013	<i>High Tytania</i>	F,V,OH,H	AC/DC Polaritas Ganda	510	450	25
E 6019	<i>Ilmenit</i>	F,V,OH,H	AC/DC Polaritas Ganda	460	410	32
E 7016	<i>Low Hydrogen</i>	F,V,OH,H	AC/DC Polaritas Balik	570	500	32
E 7018	<i>Iron Powder Low Hydrogen</i>	F,V,OH,H	AC/DC Polaritas Balik	560	500	31
E 7024	<i>Iron Powder Tytania</i>	H-S, F	AC/DC Polaritas Ganda	540	480	29

Sumber : *Kobelco Welding Handbook*

Keterangan : F = *Flat*, V = *Vertical*, OH = *Over Head*, H = *Horizontal*

2.4.1 Fungsi Fluks

Saat proses pengelasan berlangsung, bahan fluks yang digunakan untuk membungkus elektroda yang mencair akan mengambang di atas logam cair dikarenakan berat jenis dari fluks lebih rendah dari logam cair dan membentuk terak yang akan menutupi logam cair pada sambungan kedua logam untuk mencegah terjadinya oksidasi. Beberapa bahan fluks tidak dapat terbakar, tetapi berubah menjadi gas yang juga menjadi pelindung dari logam cair terhadap oksidasi dan memantapkan busur (Wirjosumarto, 2000:9).

Secara detail fluks berfungsi sebagai:

- Pemantap busur

Pembakaran oksida mempengaruhi intensitas loncatan elektron dari elektroda ke logam induk dan ion dari logam induk ke elektroda. Loncatan ion dan elektroda terjadi pada busur yang disebut plasma. Semakin tinggi intensitas semakin banyak energi yang dibawa dan semakin tinggi kemampuan mencairkan logam akan semakin baik terhadap kedalaman penetrasi ataupun lebar manik las. Masing-masing komponen fluks mempunyai efek yang berbeda.

- Penghasil gas pelindung

Fluks akan terbakar menghasilkan gas yang berfungsi sebagai pelindung busur dan logam cair dari kontaminasi udara luar. Dua jenis gas yang berbahaya bila menyusup adalah oksigen dan hidrogen. Kelarutan gas oksigen dan hidrogen dalam keadaan padat lebih rendah dibanding dalam keadaan cair. Dengan pendinginan yang cepat dikhawatirkan pelepasan gas akibat penurunan batas kelarutan lebih lambat dibanding laju pendinginan yang menyebabkan gas-gas terperangkap. Oksigen terperangkap membentuk keropos dan hidrogen terperangkap menghasilkan penggetasan.

- Elemen paduan tambahan

Fluks yang digunakan pada pengelasan sebagian akan masuk ke dalam logam lasan, hal ini akan mempengaruhi sifat mekanik dari logam lasan sesuai dengan karakteristik dari bahan yang terkandung pada fluks yang digunakan.

- Sebagai penghasil slag

Slag terbentuk dari pembakaran fluks dan membentuk slag cair. Temperatur cair slag lebih tinggi dari logam sehingga pada pendinginan akan membeku lebih dulu. Berat jenis slag jauh lebih rendah dari logam cair dan mudah mengapung dipermukaan. Slag padat akan melindungi logam yang masih panas dari kontaminasi udara luar sekaligus menghambat laju perpindahan panas logam untuk tujuan memperlambat laju pendinginan. Laju pendinginan lambat lebih diutamakan untuk logam-logam yang mudah membentuk fasa keras dan rapuh seperti martensit dan karbida lainnya.

- Mempengaruhi efek penetrasi

Kedalaman penetrasi pengelasan dipengaruhi oleh fluks, hal ini juga berhubungan dengan fungsi fluks sebagai pemantap busur, dimana jika busur yang dihasilkan baik maka penetrasinya akan semakin baik (Affi, 2007:14).

2.4.2 Macam – Macam Bahan Fluks

- a. **Jenis oksida titan** : Jenis ini disebut juga rutil atau titania yang berisi banyak TiO_2 didalamnya. Busur yang dihasilkan oleh elektroda yang dibungkus dengan fluks jenis ini tidak terlalu kuat, penetrasi cairan logamnya dangkal dan menghasilkan manik las yang halus. Karena itu jenis ini baik untuk pengelasan pelat – pelat baja tipis atau untuk pengelasan terakhir pada pengelasan pelat tebal.
- b. **Jenis titania kapur** : Jenis ini disamping berisi rutil juga mengandung kapur. Disamping sifat – sifat yang dimiliki oleh jenis oksida titan, jenis ini mempunyai keunggulan lain yaitu kemampuannya menghasilkan sifat mekanik

yang baik. Walaupun penetrasinya dangkal masih juga dapat menghasilkan manik las yang halus. Jenis ini sesuai hampir semua posisi pengelasan, terutama posisi tegak atau diatas kepala (*overhead*).

- c. **Jenis ilmenit** : Jenis ini terletak diantara oksida titan dan oksida besi. Bahan fluks yang utama adalah ilmenit atau FeTiO_3 . Busur yang dihasilkan cukup kuat dan menghasilkan penetrasi yang dalam. Karena sifatnya yang dapat mencakup penggunaan luas, maka elektroda yang dibungkus fluks dengan jenis ini dianggap sebagai elektroda serba guna.
- d. **Jenis hidrogen rendah (*low hydrogen*)** : Jenis ini terkadang disebut juga sebagai jenis kapur karena bahan utama yang dipergunakan adalah kapur dan fluorat. Jenis ini menghasilkan sambungan dengan kadar hidrogen yang rendah, karena itu kepekaan sambungan terhadap retak sangat rendah, sehingga ketangguhannya sangat memuaskan. Karena fluks jenis ini sangat baik dalam sifat mampu lasnya maka elektroda dengan fluks jenis ini biasanya digunakan untuk konstruksi yang memerlukan tingkat pengamanan yang tinggi seperti konstruksi dengan pelat tebal dan bejana tekan.
- e. **Jenis selulosa (*cellulose*)** : jenis ini berisi 30% zat organik yang dapat menghasilkan gas dengan volume yang besar untuk melindungi logam cair. Busurnya kuat dan penembusannya dalam. Terak yang terbentuk sedikit karena itu amat baik untuk pengelasan tegak yang menurun. Karena banyaknya percikan – percikan yang terjadi maka jenis ini tidak dapat menghasilkan manik las yang halus.
- f. **Jenis oksida besi (*iron oxide*)** : bahan pokok untuk jenis ini adalah oksida besi. Busur yang dihasilkan terpusatkan dan penetrasinya dalam, karena itu jenis ini baik digunakan untuk pengelasan sudut horizontal.
- g. **Jenis serbuk besi oksida (*iron powder oxide*)** : Bahan utama dari fluks ini antara 15 – 50% adalah silikat dan serbuk besi. Pemindahan butir – butir cairan berupa semburan halus dan tidak banyak percikan. Jenis ini banyak digunakan untuk pengelasan sudut horizontal.
- h. **Jenis serbuk besi titania (*iron powder tytania*)** : jenis ini menimbulkan busur yang sedang dan menghasilkan manik las yang halus. Karena didalamnya berisi serbuk besi maka efisiensi pengelasan menjadi tinggi. Elektroda jenis ini sangat baik untuk pengelasan horozontal sudut(Wiryosumarto, 2000:9).

2.4.3 Komposisi Elektroda Las

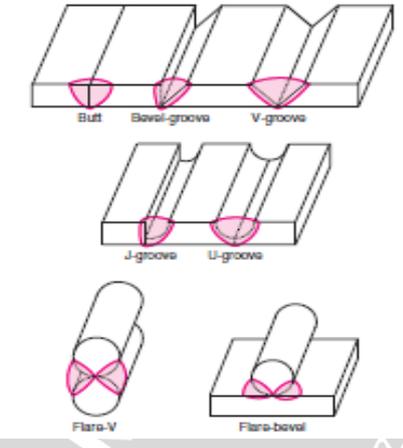
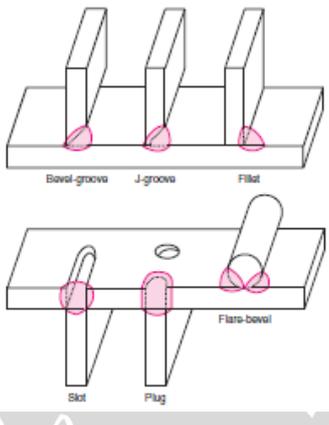
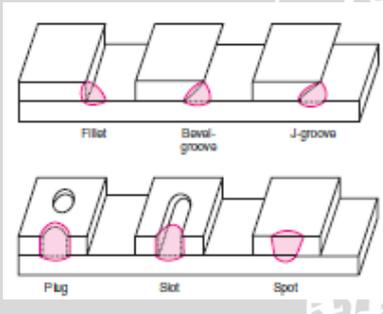
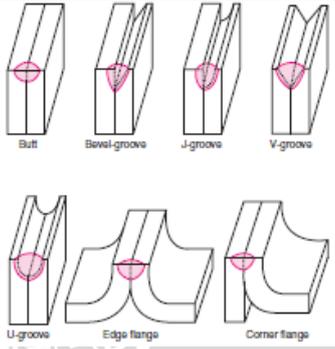
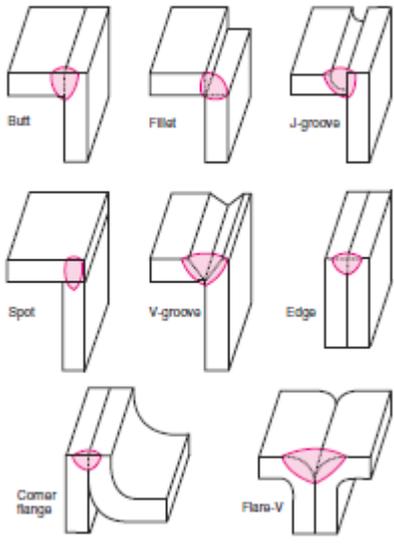
- a. **Carbon (C)** : Pengaruh unsur karbon sangat penting dikarenakan kombinasi antara karbon (C) dengan besi (Fe) akan membentuk kandungan besi karbida (Fe_3C). Kandungan ini dapat menaikkan kekerasan dan kekuatan tarik.
- b. **Manganese (Mn)** : Mangan meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik baja, tetapi pada tingkat lebih rendah dari karbon. Untuk tujuan pengelasan, rasio mangan untuk sulfur minimal 10 berbanding 1. Kandungan mangan kurang dari 0,30% dapat meningkatkan porositas internal dan retak pada manik las, retak juga dapat terjadi jika kandungan lebih dari 0,80%. Baja dengan rasio sulfida mangan rendah dapat mengandung sulfur dalam bentuk besi sulfida (FeS), yang dapat menyebabkan retak (*a hot-short condition*) di las.
- c. **Phosphorus (P)** : Fosfor meningkatkan kekuatan dan kekerasan, tetapi dengan mengurangi elastisitas dan dampaknya terhadap ketangguhan, terutama pada baja karbon tinggi yang di *quenching* dan *tempering*. Dengan demikian kandungan di sebagian besar baja terbatas maksimal 0,05%. Fosfor mencegah *light gage sheets* bila digunakan sebagai paduan dalam baja. Fosfor memperkuat baja karbon rendah, meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan meningkatkan *machinability*. Dalam hal pengelasan, kadar fosfor lebih dari 0,04% membuat las rapuh dan meningkatkan kecenderungan untuk retak.
- d. **Sulphur (S)** : Untuk pengelasan, mampu las menurun seiring peningkatan kandungan sulfur. Sulfur merugikan kualitas permukaan karbon rendah dan baja mangan rendah dan meningkatkan *hot shortness* di las dengan peningkatan sulfur. Kandungannya terbatas pada 0,05%.
- e. **Silicon (Si)** : Silicon meningkatkan kekuatan dan kekerasan, tetapi pada tingkat lebih rendah daripada mangan. Dalam pengelasan, silikon merugikan kualitas permukaan, terutama di karbon rendah. Hal ini dapat memperburuk kecenderungan retak ketika kandungan karbon cukup tinggi. Untuk kondisi pengelasan terbaik, isi silikon tidak boleh melebihi 0,10%. Namun, jumlah sampai dengan 0,30% tidak seserius daripada sulfur tinggi atau kadar fosfor.

2.5 Klasifikasi Sambungan Las

Untuk dapat menyambung dua komponen logam diperlukan berbagai jenis sambungan. Pada sambungan inilah nantinya logam tambahan diberikan, sehingga

terdapat kesatuan terhadap komponen-komponen yang disambung. Macam – macam sambungan dari pengelasan dapat dilihat apada tabel dibawah ini.

Tabel 2.2 Jenis – Jenis Sambungan Las

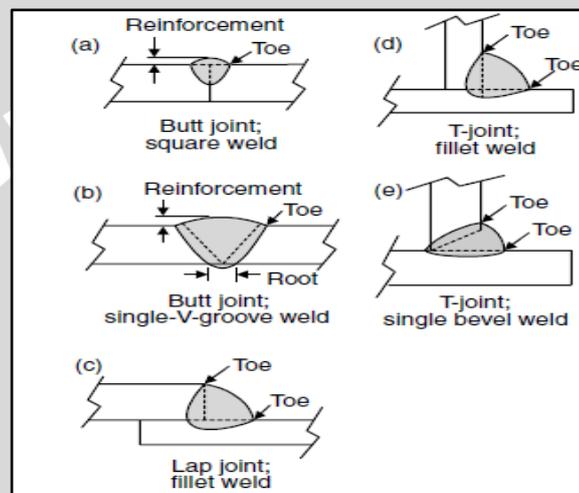
<i>Butt Joint</i>	<i>T – Joint</i>
 <p>Bevel-groove, V-groove, J-groove, U-groove, Flare-V, Flare-bevel</p>	 <p>Bevel-groove, J-groove, Fillet, Flare-bevel, Slot, Plug</p>
<i>Lap Joint</i>	<i>Edge Joint</i>
 <p>Fillet, Bevel-groove, J-groove, Plug, Slot, Spot</p>	 <p>Butt, Bevel-groove, J-groove, V-groove, U-groove, Edge flange, Corner flange</p>
<i>Corner Joint</i>	
 <p>Butt, Fillet, J-groove, Spot, V-groove, Edge, Corner flange, Flare-V</p>	

Sumber : The Goodheart – Willcox Co., Inc. : 58

Penyambungan dalam pengelasan diperlukan untuk meneruskan beban atau tegangan diantara bagian-bagian yang disambung. Oleh karena itu bagian sambungan paling tidak memiliki kekuatan yang sama dengan bagian yang disambung.

2.6 Jenis dan Bentuk Kampuh Las

Bentuk kampuh dalam sambungan las sangat mempengaruhi efisiensi pengerjaan dan jaminan konstruksi yang akan dilas. Dalam memilih bentuk kampuh harus memperhatikan ketebalan material yang akan disambung. Adapun jenis – jenis kampuh las untuk jenis sambungan tumpul adalah :



Gambar 2.3 Variasi tipe sambungan las
Sumber : Kou, Sindo, 2003 : 8

Penyambungan dalam pengelasan diperlukan untuk meneruskan beban atau tegangan diantara bagian – bagian yang disambung. Karena meneruskan beban, maka bagian sambungan juga akan menerima beban. Oleh karena itu, bagian sambungan paling tidak memiliki kekuatan yang sama dengan bagian yang disambung (Sonawan, 2006 : 20).

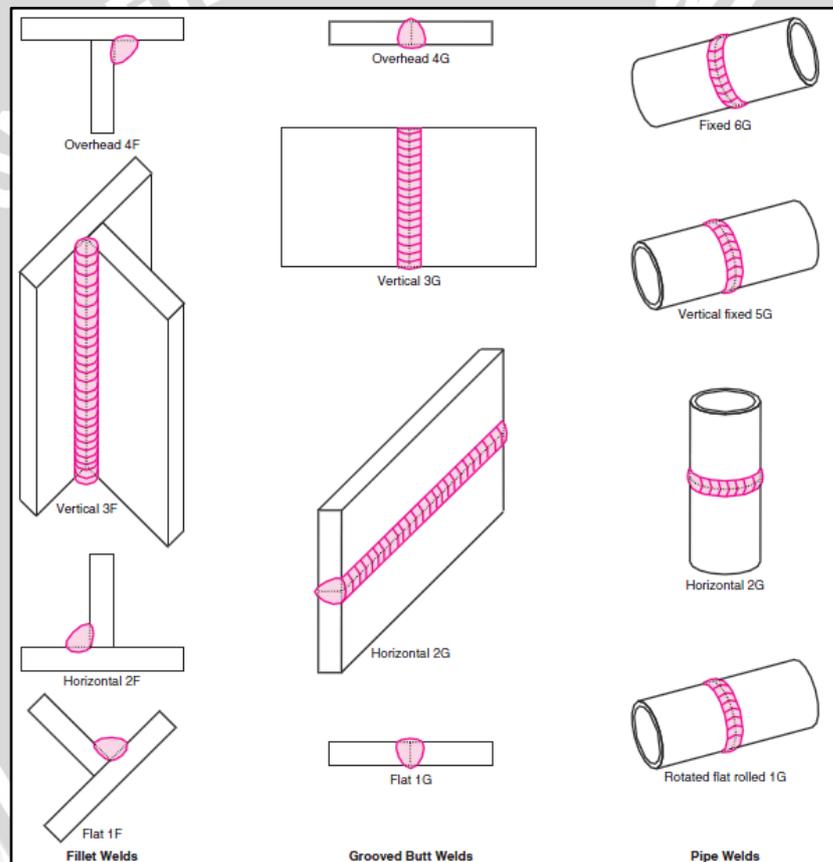
Sambungan kampuh V dipergunakan untuk menyambung logam atau plat dengan ketebalan 6-15 mm. Sambungan ini terdiri dari sambungan kampuh V terbuka dan sambungan kampuh V tertutup. Sambungan kampuh V terbuka dipergunakan untuk menyambung plat dengan ketebalan 6-15 mm dengan sudut kampuh antara 60° - 80° , jarak akar 2 mm, tinggi akar 1-2 mm (Sonawan, 2006).

2.7 Posisi Pengelasan

Terdapat 4 posisi dasar dalam pengelasan yaitu:

1. Posisi datar (*flat position* = 1G)
Yaitu pelat dalam posisi horizontal dan diisi logam las dari atas pelat
2. Posisi horizontal (2G)
Yaitu pelat dalam posisi vertical dengan pengelasan pada posisi horizontal
3. Posisi vertical (3G)
Yaitu pelat dalam posisi vertical dengan pengelasan dalam posisi vertikal
4. Posisi di atas kepala (4G)
Yaitu pelat dalam posisi horizontal dan diisi logam las dari bawah pelat.

Padaposisi pengelasan ini dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut ini.



Gambar 2.4 Berbagai posisi pengelasan
Sumber : The Goodheart – Willcox Co., Inc. : 64

2.8 Pengaruh Kecepatan Pengelasan

Dalam pengelasan, untuk mencairkan logam induk dan logam pengisi diperlukan energi yang cukup. Energi yang dihasilkan dalam operasi pengelasan berasal dari bermacam – macam sumber yang tergantung pada proses pengelasannya. Pada pengelasan busur listrik, sumber energi berasal dari listrik yang diubah menjadi energi

panas. Energi panas ini sebenarnya hasil kolaborasi dari parameter arus las, tegangan las dan kecepatan pengelasan. Parameter ketiga yaitu kecepatan pengelasan ikut mempengaruhi energi pengelasan karena proses pemanasannya tidak diam ditempat akan tetapi bergerak dengan kecepatan tertentu (Sonawan 2006 : 31).

Kecepatan pengelasan didefinisikan sebagai laju perjalanan elektroda sepanjang sambungan (*joint*) (Tewari, 2010:512). Kecepatan pengelasan akan mempengaruhi *heat input* (masukan panas) yang terjadi pada saat proses pengelasan. *Heat input* adalah nilai dari energi yang ditransfer per unit panjang dari suatu pengelasan. Hubungan antara kecepatan pengelasan dan *heat input* dapat dijabarkan pada rumus dibawah ini :

Heat Input

$$H = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{v} \quad 2.1$$

(Messler, Robert, W., 1999)

Keterangan :

- H = *Heat Input* (J/mm)
 v = kecepatan pengelasan (mm/s)
 E = potensial listrik (Volt)
 I = arus listrik (Ampere)
 η = Efisiensi Las SMAW sebesar 0,8

Untuk memperoleh masukan panas yang sebenarnya dari suatu proses pengelasan maka persamaan *heat input* di atas dikalikan dengan efisiensi proses (η). Efisiensi masing-masing proses pengelasan antara lain :

Tabel 2.3 Efisiensi Proses Pengelasan

Proses Pengelasan	Efisiensi (%)
SAW (<i>Submerged Arc welding</i>)	90 – 99
GMAW (<i>Gas Metal Arc Welding</i>)	65 – 85
FCAW (<i>Flux Cored Arc Welding</i>)	65 – 85
SMAW (<i>Shield Metal Arc Welding</i>)	50 – 85
GTAW (<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>)	20 – 50

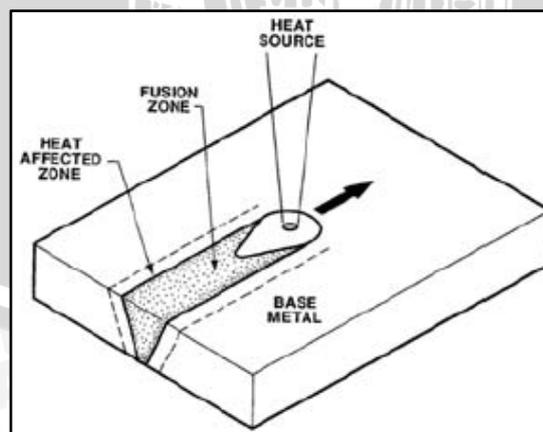
Sumber : Sonawan, 2006 : 32

Kecepatan pengelasan tergantung pada jenis elektroda, diameter inti elektroda, bahan yang dilas, geometri sambungan, ketelitian sambungan dan lain-lain. Dalam hal hubungannya dengan tegangan dan arus las bahwa kecepatan pengelasan tidak ada hubungannya dengan tegangan las tetapi berbanding lurus dengan arus las. Karena itu pengelasan yang cepat memerlukan arus yang tinggi.

Jika tegangan dan arus dibuat tetap sedang kecepatan pengelasan dinaikkan maka deposit per satuan panjang las jadi menurun. Tetapi disamping itu sampai pada suatu kecepatan tertentu, kenaikan kecepatan akan memperbesar penetrasi pada saat pengelasan. Jika kecepatan pengelasan dinaikkan terus maka masukan panas (*heat input*) per satuan panjang juga akan menjadi kecil. Pada umumnya dalam pelaksanaan kecepatan selalu diusahakan setinggi – tingginya selama belum merusak manik las dan dengan kecepatan pengelasan yang tinggi maka akan mengurangi perubahan bentuk selama pengelasan (Wiryosumarto, 2000 : 255).

2.9 Siklus Termal Daerah Lasan

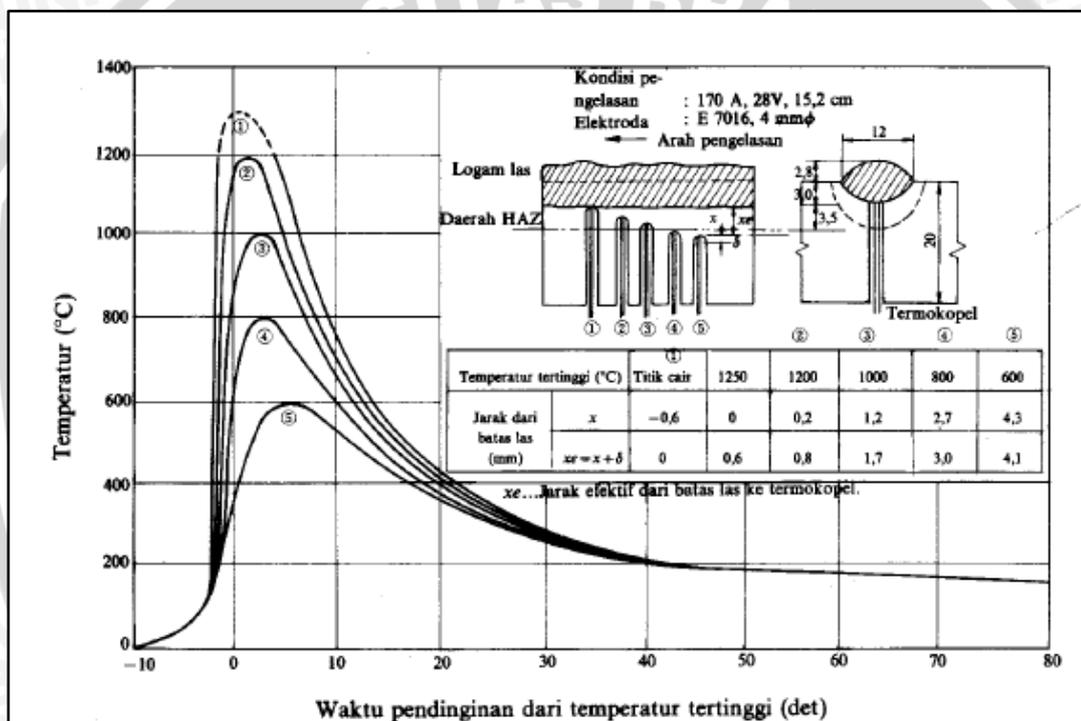
Daerah pengelasan terdiri dari 3 bagian yaitu logam lasan, *Heat Affected Zone* (HAZ), dan logam induk yang tak terpengaruhi. Logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Daerah pengaruh panas atau HAZ adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat. Logam induk tak terpengaruhi adalah bagian logam dasar dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat.



Gambar 2.5 Daerah–daerah pengelasan
Sumber : Anonymous 1

2.9.1 Temperature Cycle

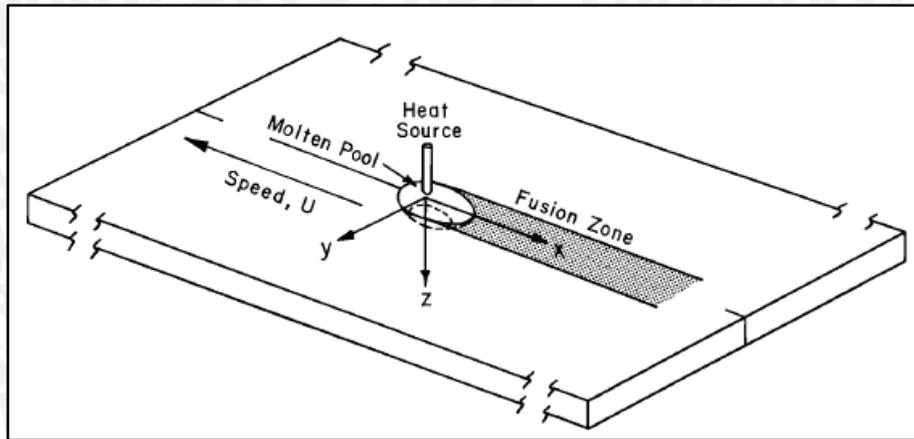
Selama proses pengelasan material yang dilas mengalami pemanasan (*thermal cycle*) dan mengalami proses pendinginan (*cool down*) selama waktu tertentu. pada daerah pengelasan (*fusion zone*) temperatur puncak mencapai titik mencair (T_m) dan kolam las akan terbentuk dan saat itu juga material yang tidak mencair akan mencapai puncak temperatur tergantung jarak dari daerah lasan. Selama fase pendinginan pada proses pengelasan, cairan logam las akan memadat dan terjadi proses pembentukan. Sehingga perputaran temperatur (*temperatur cycle*) sangat mempengaruhi struktur dan propertis dari material maka temperatur puncak dan laju pendinginan memiliki peran penting pada proses ini.



Gambar 2.6 Grafik temperatur sebagai fungsi waktu pada lokasi yang berbeda
Sumber : Wiryosumarto, 2000 : 59

2.9.2 Peak Temperature (Temperatur Puncak)

Memprediksi atau menginterpretasikan transformasi secara metalurgi di satu titik pada material solid yang dekat dengan pengelasan membutuhkan beberapa pengetahuan tentang *peak temperature* (temperatur puncak) yang diperoleh pada suatu lokasi.



Gambar 2.7 Koordinat sistem dengan *heat source*
Sumber : Kou, 2003 : 48

Pada gambar di atas menunjukkan pengelasan pada suatu plat, dengan koordinat sistem yang bergerak bersama *heat source* pada kecepatan konstan dalam arah $-x$ dan temperatur dari plat pada gambar di atas menunjukkan fungsi dari waktu dan posisi. Sedangkan distribusi temperatur dapat ditunjukkan dalam beberapa cara. Untuk *single pass butt weld* pada suatu plat, distribusi dari *peak temperatur* (T_p) pada *base material* dapat diketahui dengan rumus :

$$T_p = \frac{1}{\frac{\sqrt{2\pi e \cdot y \cdot h \cdot \rho C}}{H} + \frac{1}{T_m - T_0}} + T_0 \quad 2.2$$

(Messler, Robert, W., 1999)

Keterangan :

- T_p = Temperatur puncak (K)
- T_0 = Temperatur awal benda kerja (K)
- T_m = Temperatur lebur (K)
- e = 2,718 angka alam logaritma
- y = Jarak dari *Fusion Line* (m)
- h = Tebal benda kerja (m)
- ρC = *Volume Thermal Capacity* (J/m^3K)
- H = Masukan energi (*heat input*) (J/m)

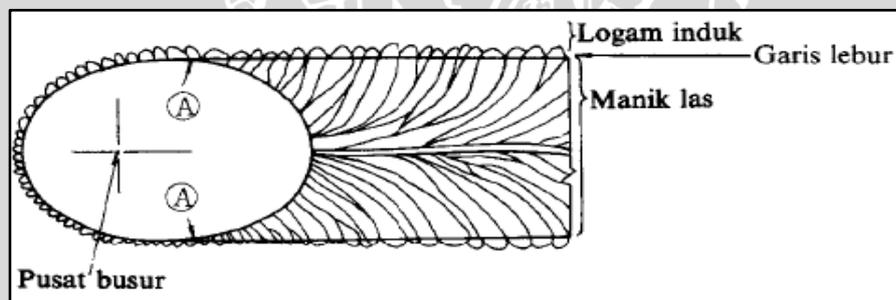
Tabel 2.4 *Thermal Properties* untuk beberapa material

Material	Thermal Diffusivity, α (m ² /s)	Volume Thermal Capacity, ρC_p (J/m ³ K)	Thermal Conductivity, k (J/msK)	Melting Point (K)
Aluminum	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	35.2	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 : Kou, 2003 : 50

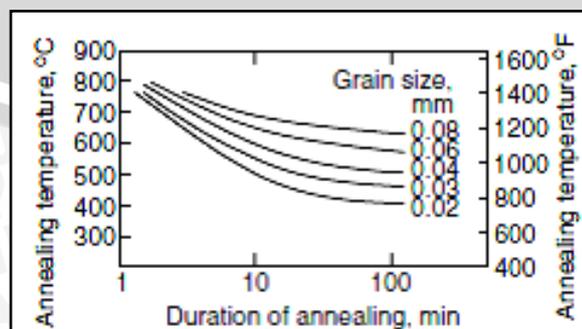
2.9.3 Pembekuan dan Struktur Logam Las

Dalam gambar 2.8 ditunjukkan secara skematik proses pertumbuhan dari kristal-kristal logam las yang berbentuk pilar. Titik A dari gambar tersebut adalah titik mula dari struktur pilar yang selalu terletak dalam logam induk. Titik ini tumbuh menjadi garis lebur dengan arah yang sama dengan gerakan sumber panas. Pada garis lebur sebagian dari logam dasar turut mencair dan selama proses pembekuan logam las tumbuh pada butir-butir logam induk dengan sumbu kristal yang sama.



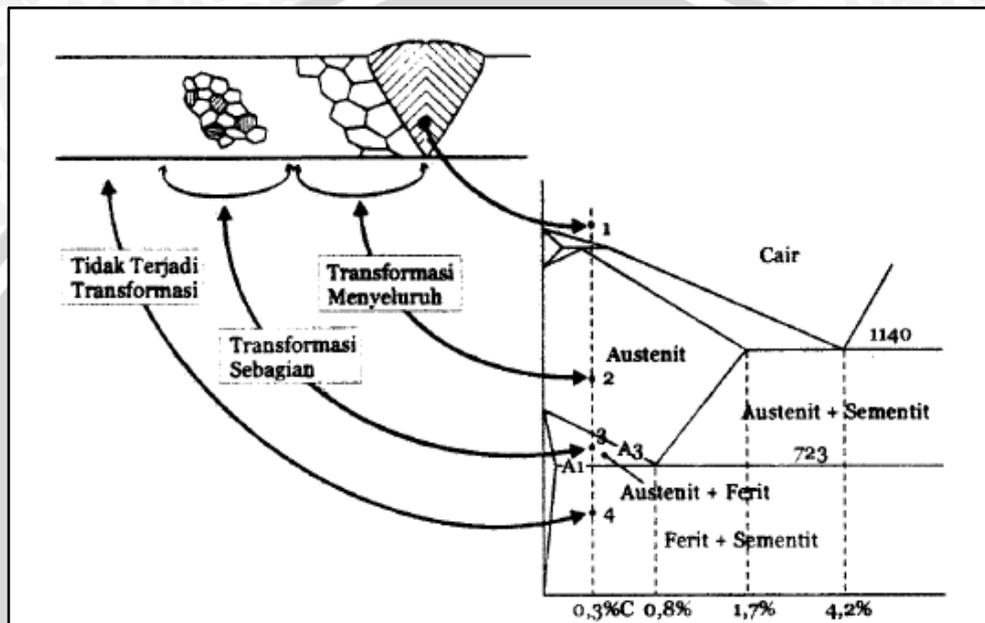
Gambar 2.8 Arah pembekuan dari logam las
Sumber : Wiryosumarto, 2000 : 57

2.9.4 Struktur Mikro Daerah HAZ (*Heat Affected Zone*)



Gambar 2.9 Hubungan antara besar butir dan temperatur
Sumber : Kou, 2003 : 71

Butir struktur austenit di HAZ terutama dipengaruhi oleh masukan panas. Pada masukan panas yang tinggi, HAZ sangat lebar dan butir dapat tumbuh hingga menjadi sangat kasar (*coarse grains*). Daerah yang dekat dengan logam las mengalami pertumbuhan butir yang paling hebat dibanding dengan daerah yang mengalami transformasi sebagian. Dengan butir yang kasar maka kekuatan dan ketangguhan HAZ menjadi rendah.



Gambar 2.10 Transformasi fasa pada logam hasil pengelasan
Sumber : Sonawan, 2006 : 72

Daerah yang dekat dengan logam las karena berbutir kasar maka ketangguhannya turun. Jika pada produk hasil pengelasan terdapat konsentrasi tegangan seperti yang terjadi disisi manik las maka hal ini akan menjadi lebih riskan dikarenakan ketangguhan las yang rendah. Ketangguhan yang rendah ditambah dengan tegangan tarik yang besar membuat titik dengan konsentrasi tegangan ini menjadi awal terbentuknya retak. (Sonawan, 2006 : 72)

2.10 Mampu Las (*Weld Ability*)

Mampu las adalah kemampuan suatu logam atau kombinasi logam yang dilas menjadi suatu konstruksi yang memiliki karakteristik dan sifat tertentu serta memenuhi persyaratan yang diinginkan. Pengertian yang lebih mudah dipahami adalah logam yang memiliki sifat mampu las yang tinggi akan membutuhkan usaha/perlakuan yang sedikit untuk mengelasnya. Usaha/perlakuan yang dimaksud adalah

- a. Logam diberikan perlakuan berupa pemanasan mula (*preheat*) sebelum dilakukannya pengelasan.
- b. Logam diberikan perlakuan berupa pemanasan pasca pengelasan (*post weld heat treatment*).
- c. Logam diberikan perlakuan berupa prosedur pengelasan khusus misalnya menggunakan elektroda dengan fluks berhidrogen rendah.

Jika suatu logam tidak banyak memerlukan usaha/perlakuan diatas maka dapat dikatakan sifat mampu las logam itu tinggi atau baik. Sebagai contoh baja karbon rendah memiliki sifat mampu las yang tinggi karena pengelasan baja karbon rendah tidak memerlukan *preheat* ataupun *post weld heat treatment* (Sonawan, 2006:14).

2.11 Material Baja Karbon

Klasifikasi baja karbon berdasarkan kandungan karbon (C) dapat dibagi menjadi tiga yaitu, baja karbon rendah atau baja lunak (0,08 % - 0,25 %). Baja karbon menengah atau sedang (0,25 % - 0,55 %). Baja karbon tinggi (0,55 % - 1,7 %). Masing – masing baja karbon tersebut mempunyai material induk besi (Fe) dengan unsur paduannya sebesar 0,25 % - 1,50 % Mn (Mangan), 0,25% - 0,30 % Si (Silium), maksimum 0,04 % P (Phospor) dan maksimum 0,05 % S (Sulfur).

Baja karbon rendah strukturnya terdiri dari ferrit dan sedikit perlit sehingga baja ini kekuatannya relatif rendah, lunak tetapi keuletannya tinggi. Baja ini tidak dapat dikeraskan kecuali dengan pengerasan permukaan.

Baja karbon rendah sangat banyak digunakan meskipun terbatas pada konstruksi yang tidak membutuhkan tegangan tarik dan kekerasan yang relatif tinggi, hal tersebut karena harganya murah dan mudah pembedanya. Baja karbon rendah dengan kadar 0,04 % - 0,10 % C digunakan untuk baja – baja plat atau strip, baja karbon rendah dengan kadar 1,5 % C digunakan untuk badan – badan kendaraan dan baja karbon rendah dengan kadar 0,15 % - 0,20 % digunakan untuk konstruksi jembatan, bangunan atau baja konstruksi.

Baja karbon menengah terdiri dari ferrit dan perlit seperti baja karbon rendah tetapi perlit yang terdapat lebih banyak sehingga baja ini lebih kuat dan keras serta dapat dikeraskan tetapi getas. Untuk baja karbon menengah dengan kadar karbon 0,25 – 0,55 % C banyak digunakan untuk alat – alat perkakas, struktur mesin, roda gigi, poros dan sebagainya.

Baja karbon tinggi lebih kuat dan lebih keras dari pada baja karbon rendah maupun menengah, tetapi keuletan dan ketangguhannya rendah. Baja karbon tinggi yang mempunyai kadar 0,56 – 1,70 % C digunakan untuk baja alat ukur, kawat baja maupun kabel baja.

Pada baja karbon apabila semakin tinggi kandungan karbonnya, maka material semakin kuat tetapi ketangguhannya menurun. Kemampuan baja untuk dilas akan semakin menurun seiring bertambahnya kandungan karbon didalam baja.

2.12 Pengelasan Baja Karbon

Berdasarkan definisi AWS las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas. Sedangkan secara umum las adalah proses penggabungan material secara metalurgi atau termis dengan menggunakan energi yang berasal dari energi kimia, energi listrik dan energi mekanik.

Pada pengelasan baja karbon terbagi atas tiga jenis yaitu :

1. Baja karbon rendah

Tidak menimbulkan masalah selama tebalnya kurang dari satu inci, tidak memerlukan *pre* ataupun *pos heating* dan umumnya elektroda mempunyai *low carbon*.

2. Baja karbon menengah

Secara umum mempunyai sifat mampu las (*weld ability*) yang baik. Pemilihan baja karbon menengah untuk aplikasi lebih didasarkan pada sifatnya yang tahan lama setelah dipakai.

Pada aplikasi dan komponen tertentu diberi perlakuan panas (*heat treatment*) yaitu *pre* atau *post heat* atau keduanya untuk proses las demi menjamin terpenuhinya kisaran kekuatan dan kekesaran yang diperlukan.

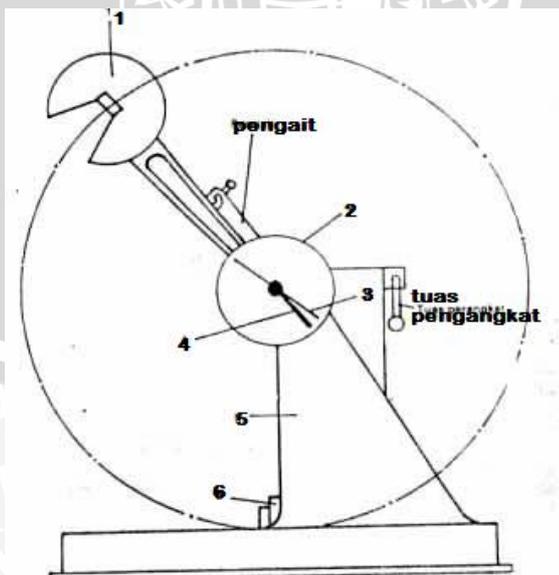
3. Baja karbon tinggi

Pengelasannya sulit karena cenderung retak akibat difusi hidrogen. Pengelasan busur listrik lebih kritis dibandingkan dengan gas *welding*. Dibutuhkan *pre* dan *post heat* atau *stress relieving* atau elektroda mutlak *low hydrogen*, kadang untuk kadar karbon yang sangat tinggi dipakai elektroda *extra low carbon* untuk menambah ketahanan terhadap retak las.

2.13 Kekuatan *Impact*

Satu bahan mungkin memiliki kekuatan tarik yang tinggi tetapi tidak memenuhi syarat untuk kondisi pembebanan kejut. Ketahanan *impact* biasanya diukur dengan menggunakan metode *Izod* atau *Charpy* yang bertakik maupun tidak bertakik. Pada pengujian ini beban diayun dari ketinggian tertentu untuk memukul benda uji, kemudian diukur energi yang diserap oleh perpatahan. Pengujian ini terutama berguna untuk memperlihatkan penurunan kelenturan dan kekuatan *impact* bahan dengan struktur bcc pada temperature rendah. Sebagai contoh baja karbon memiliki temperature transisi lentur-rapuh yang relatif tinggi sehingga hanya dapat digunakan dengan aman pada temperature di bawah nol jika temperature transisinya diturunkan dengan penambahan paduan atau dengan menghaluskan ukuran butir. Suatu paduan memiliki parameter ketangguhan terhadap perpatahan (Kc) yang didefinisikan sebagai kombinasi tegangan kritis dan panjang retak. Kc didefinisikan karena banyaknya paduan yang mengandung retak-retak kaecil yang akan menjalar jika mengalami tegangan yang melebihi tegangan kritis.

Pengujian *impact* digunakan untuk mengukur ketangguhan suatu spesimen. Ketangguhan suatu spesimen adalah kemampuan spesimen tersebut untuk menyerap energi pada daerah plastis. Prinsip kerja pengujian *impact* menurut *Charpy* adalah suatu benda uji dengan dibuat takikan di tengah dan menerima pukulan (beban kejut) oleh palu yang di jatuhkan dengan satu pukulan, dimana pukulan yang terpakai diukur, ayunan palu setelah mematahkan batang uji juga diukur.



Gambar 2.11 Pengujian ketangguhan *charpy*

Sumber : Supardi, 1996: 72

Keterangan :

- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| 1. Pendulum | 4. Batang pembawa jarum |
| 2. Piring busur derajat | 5. Badan mesin uji |
| 3. Jarum penunjuk sudut | 6. Tempat benda uji dipasang |

Kerja yang dilakukan untuk mematahkan benda kerja adalah

$$W = G \cdot L (\cos \beta - \cos \alpha)$$

2.3

Dimana

W = kerja patah dalam Joule

G = beban yang digunakan dalam kg

L = panjang lengan ayun dalam m

β = sudut jatuh dalam derajat

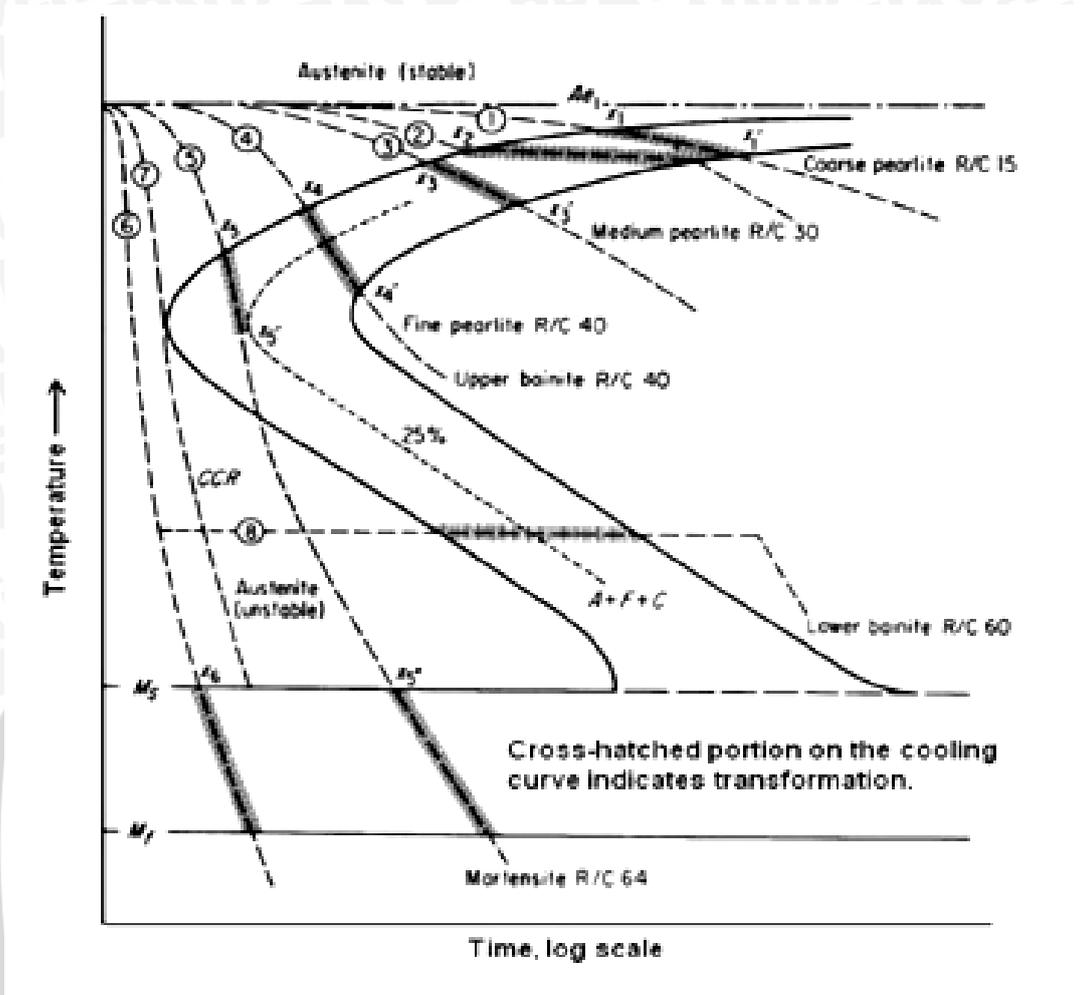
α = sudut awal dalam derajat

Bila diketahui luas penampang di bawah takikan (A)... mm², dapat disimpulkan perolehan nilai ketangguhan batang uji dihitung sebagai berikut:

Nilai Ketangguhan = Kerja Patah (W) / Luas Penampang di bawah takikan (A) = Joule / mm².

2.14 Kecepatan Pendinginan (*Cooling Rate*)

Pada *Time Temperatur Transformation Diagram* (TTT diagram) yang mempunyai waktu sebagai absis dan temperatur sebagai ordinat, maka pada diagram tersebut dapat diplot berbagai kurva pendinginan. Dari masing-masing kurva pendinginan ini dapat dipelajari transformasi yang terjadi, seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.12 *Time temperature transformation diagram*

Sumber: Avner, 1974: 271

Kurva pendinginan 1 menggambarkan pendinginan yang sangat lambat, seperti pada *annealing*. Transformasi akan mulai terjadi pada titik x_1 yang akan menghasilkan perlit yang sangat kasar. Transformasi akan berlangsung sampai pada titik x'_1 . Karena ada perbedaan temperatur awal dan akhir transformasi maka akan ada perbedaan kekasaran perlit yang dihasilkan pada awal dan akhir transformasi. Setelah melewati x'_1 kecepatan pendinginan tidak lagi berpengaruh terhadap struktur dan sifat dari hasil transformasi, karenanya pendinginan dapat dilakukan dengan cepat.

Kurva pendinginan 2 menggambarkan transformasi berlangsung pada temperatur konstan, sehingga hasil transformasi lebih homogen.

Kurva pendinginan 3 menggambarkan pendinginan yang lebih cepat, seperti pada *normalizing*. Transformasi dimulai pada titik x_3 dengan hasil perlit kasar dan berakhir pada x'_3 dengan hasil perlit medium. Hasil akhir akan merupakan campuran

perlit dari berbagai kekasaran antara kasar dan medium. Kurva pendinginan 4 juga serupa, kekasarannya antara medium dan halus.

Kurva pendinginan 5 transformasi mula-mula menghasilkan perlit halus, tetapi setelah 25% austenite bertransformasi, transformasi terhenti dan pada saat itu kurva 25% berbelok kekanan dan kurva pendinginan akan mengarah ke prosentase transformasi yang mengecil atau jumlah perlit yang sudah terjadi akan berkurang. Berkurangnya perlit tidak disebabkan menjadi austenite kembali, karena pada pendinginan perlit tidak dapat menjadi austenite. Karenanya pada titik itu transformasi terhenti. Transformasi akan dimulai lagi bila temperatur mencapai M_s , yaitu pada titik x'_5 . Di sini austenite yang belum menjadi perlit akan bertransformasi menjadi martensit. Pada temperatur kamar akan terlihat 25% perlit dan 75% martensit.

Kurva pendinginan 6 menggambarkan pendinginan yang sangat cepat sehingga tidak terjadi transformasi di daerah hidung. Transformasi baru akan terjadi bila temperatur mencapai M_s dan berakhir pada M_f . Struktur yang terjadi seluruhnya martensit. Hal seperti ini juga terjadi pada kurva pendinginan 7.

Semua kurva pendinginan yang lebih lambat dari pada kurva pendinginan 7 tidak akan menghasilkan 100% martensit. Oleh karena itu kurva pendinginan 7 disebut kurva kecepatan pendinginan kritis atau disebut *critical cooling rate*, yang disingkat CCR. Kurva CCR dapat dibuat dengan menggambar kurva yang tepat menyinggung hidung diagram.

Dengan pendinginan kontinyu seperti yang digambarkan di depan dapat dihasilkan struktur yang sepenuhnya perlitik atau sepenuhnya martensitik, tetapi tidak akan dapat menghasilkan struktur yang sepenuhnya bainitik. Struktur yang sepenuhnya bainitik dapat diperoleh kombinasi kurva pendinginan 6 atau 7. Kemudian setelah melewati hidung, temperatur dipertahankan konstan, misalnya dengan kurva 8. Bila melalui kurva 5 dan kurva 8 akan diperoleh sebagian (25%) perlit dan sebagian bainit.

Kecepatan pendinginan yang dialami suatu benda kerja banyak tergantung pada media pendinginan yang digunakan untuk pendinginan cepat tersebut. Beberapa media pendinginan cepat yang sengaja digunakan diurutkan menurut kemampuannya mendinginkan adalah sebagai berikut:

1. *Brine* (air + 10% garam dapur)
2. Air
3. Garam cair
4. Larutan minyak dalam air
5. Minyak
6. Udara

Disamping itu kemampuan pendinginan juga tergantung pada temperatur medium pendinginan.

2.15 Cacat Las dan Kerusakan yang Terjadi

Hasil dari pengelasan tidak akan langsung sempurna, pasti terdapat beberapa cacat-cacat ataupun kerusakan yang terjadi. Diantaranya cacat las dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Retak Las

Cacat las yang sering sekali terjadi pada saat proses pengelasan adalah retak las yang dapat dibagi menjadi dua kategori yakni : retak dingin dan retak panas. Retak dingin adalah retak yang terjadi pada daerah las pada suhu kurang lebih 300°C. Sedangkan retak panas adalah retak yang terjadi pada suhu diatas 500°C. Retak dingin tidak hanya terjadi pada daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) atau sering disebut dengan daerah pengaruh panas tetapi biasanya terjadi pada logam las. Retak dingin ini dapat terjadi pada daerah panas yang sering terjadi. Dan retakan ini dapat dilihat dibawah manik las, retak akar dan kaki, serta retak melintang.

Retak dingin didaerah HAZ ini biasanya terjadi antara beberapa menit sampai 48 jam

sesudah pengelasan. Retak dingin ini disebabkan oleh :

- Struktur daerah pangaruh Panas.
- Hidrogen difusi didaerah las.
- Tegangan.

Sedangkan retak panas dibagi menjadi dua kelas yaitu retak karena pembebasan tegangan pada daerah pengaruh panas yang terjadi pada suhu 500°C - 700°C dan retak yang terjadi pada suhu diatas 900°C yang terjadi pada peristiwa

pembekuan logam las. Retak panas sering terjadi pada logam las karena pembekuan, biasanya berbentuk kawah dan retak memanjang. Retak panas ini terjadi karena pembebasan tegangan pada daerah kaki didalam daerah pengaruh panas.

Retak ini biasanya terjadi pada waktu logam mendingin setelah pembekuan dan terjadi karena adanya tegangan yang timbul, yang disebabkan oleh penyusutan dan sifat baja yang ketangguhannya turun pada suhu dibawah suhu pembekuan. Keretakan las yang lain adalah retak sepanjang rigi-rigi lasan retak disamping las dan retak memanjang diluar rigi-rigi lasan. Akan tetapi penyebab umum pada semua jenis keretakan las ini adalah:

- Pilihan jenis elektroda yang salah atau tidak tepat.
- Benda kerja terbuat dari baja karbon tinggi.
- Pendinginan setelah pengelasan yang terlalu cepat.
- Benda kerja yang dilas terlalu kaku.
- Penyebaran panas pada bagian-bagian yang di las tidak seimbang.

2. Penembusan Kurang Baik

Selain retak, cacat las yang juga sering terjadi, adalah penembusan las yang kurang dan jelek. Jika penembusan pengelasan kurang maka akibat yang timbul pada konstruksi adalah kekuatan konstruksi yang kurang kokoh karena penembusan yang kurang. Karena kurang penembusan inilah maka penyambungan tidak sempurna. Penyebab dari penembusan yang kurang ini antara lain :

- Kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi.
- Arus terlalu rendah.
- Diameter elektroda yang terlalu besar atau terlalu kecil.
- Benda kerja terlalu kotor.
- Persiapan kampuh atau sudut kampuh tidak baik.
- Busur las yang terlalu panjang.

3. Pengerukan / *Under cut*

Cacat las yang lain adalah pengerukan atau yang sering disebut dengan *under cut* pada benda kerja. Pengerukan ini terjadi pada benda kerja atau konstruksi yang termakan oleh las sehingga benda kerja tadi berkurang kekuatan konstruksi meskipun sebelumnya telah dilakukan pengelasan. Sebab-sebab pengerukan las antara lain :

- Arus yang terlalu tinggi.
- Kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi pula.
- Busur nyala yang terlalu panjang.
- Ukuran elektroda yang salah.
- Posisi elektroda selama pengelasan tidak tepat.
- Ayunan elektroda selama pengelasan tidak teratur.

4. Keropos

Keropos merupakan cacat las yang juga sering terjadi dalam pengelasan. Keropos ini bila didiamkan, lama kelamaan akan menebar yang diikuti dengan perkaratan atau korosi pada konstruksi sehingga konstruksi menjadi rapuh karena korosi tadi. Cacat ini memang kelihatannya sepele akan tetapi dampak yang ditimbulkan oleh cacat ini cukup membahayakan juga. Penyebab keropos ini yakni :

- Busur pendek.
- Kecepatan mengelas yang terlalu tinggi atau terlalu rendah.
- Kurang waktu pengisian.
- Terdapat kotoran-kotoran pada benda kerja.
- Kesalahan memilih jenis elektroda.

5. Penggerutan Benda Kerja

Pada dasarnya setiap logam bila dipanasi akan memuai dan mengkerut bila didinginkan. Bila salah satu permukaan las tipis dilas pada arah memanjang, maka setelah dingin terjadilah pelengkungan atau melenting atau deformasi.

Dan pada dua bilah plat tipis dilas (tanpa membuat pengikat lebih dulu) maka kedua sisi kampuh yang masih bebas akan bergeser, bahkan sampai kedua sisi tersebut dapat berimpit

Penyebab pengerutan adalah:

- Pengisian pengelasan kurang.
- Pengkleman salah.
- Pemanasan yang berlebihan.
- Kesalahan persiapan kampuh.
- Pemanasan tidak merata.
- Penempatan bagian-bagian yang disambung kurang baik.
- Salah urutan pengelasan.

6. Inklusi

Cacat ini disebabkan oleh pengotor (inklusi) baik berupa produk karena reaksi gas atau berupa unsur-unsur dari luar, seperti: terak, oksida, logam wolfram atau lainnya. Cacat ini biasanya terjadi pada daerah bagian logam las (*weld metal*).

7. Kurangnya fusi atau penetrasi

- Kurangnya fusi

Cacat ini merupakan cacat akibat terjadinya "discontinuity" yaitu ada bagian yang tidak menyatu antara logam induk dengan logam pengisi. Disamping itu cacat jenis ini dapat pula terjadi pada pengelasan berlapis (multipass welding) yaitu terjadi antara lapisan las yang satu dan lapisan las yang lainnya.

- Kurangnya penetrasi

Cacat jenis ini terjadi bila logam las tidak menembus mencapai sampai ke dasar dari sambungan.

2.16 Temper Bead Welding

Berbagai metode untuk memperbaiki struktur daerah batas las telah dilakukan para peneliti terdahulu (Anang Setiawan dkk. 2006 , Arianto Leman S. dkk. 2004,

Suharno. 2008, Cleiton C. Silva et all 2009), yang pada prinsipnya metode untuk memperbaiki struktur daerah batas las adalah dengan pembatasan masukan panas. Metode lain dilakukan oleh peneliti (Abdulkareem S. Aloraiera, et all) yaitu dengan cara pemanasan kembali melalui panas las. Melalui *temper bead welding* sebenarnya secara tidak langsung telah dilakukan usaha penurunan penggetasan. Dalam hal ini lapisan las yang ada di bawah dipanaskan oleh lapisan di atasnya sehingga dicapai temperatur di atas titik transformasi Ac3 yang menyebabkan terbentuknya butir-butir kristal yang halus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ada perbaikan yang signifikan pada mikrostruktur, ukuran HAZ dan pengurangan kekerasan sebagai akibat dari lapisan tumpang tindih *temper bead*.

Dengan melakukan pemanasan kembali melalui panas las diharapkan terjadi perbaikan struktur yang menyebabkan terbentuknya butir-butir kristal yang halus dan dapat menurunkan penggetasan batas las.

2.17 Hipotesa

Semakin tinggi arus pengelasan maka laju pendinginan pada proses pengelasan akan semakin lambat. Semakin tinggi arus maka jumlah lapisan atau struktur yang berlapis-lapis (*lamellar*) yang ditunjukkan oleh jumlah siklus termal selama proses pengelasan semakin sedikit. Artinya masukan panas yang rendah menghasilkan temperatur puncak (*peak temperature*) las yang rendah memungkinkan pada benda kerja mengalami pemanasan berulang yang lebih banyak juga, dengan temperatur pemanasan yang lebih rendah. Pemanasan yang berulang-ulang dengan temperatur rendah memungkinkan terbentuk struktur yang lebih homogen. Semakin homogen strukturnya maka semakin besar ketangguhannya.