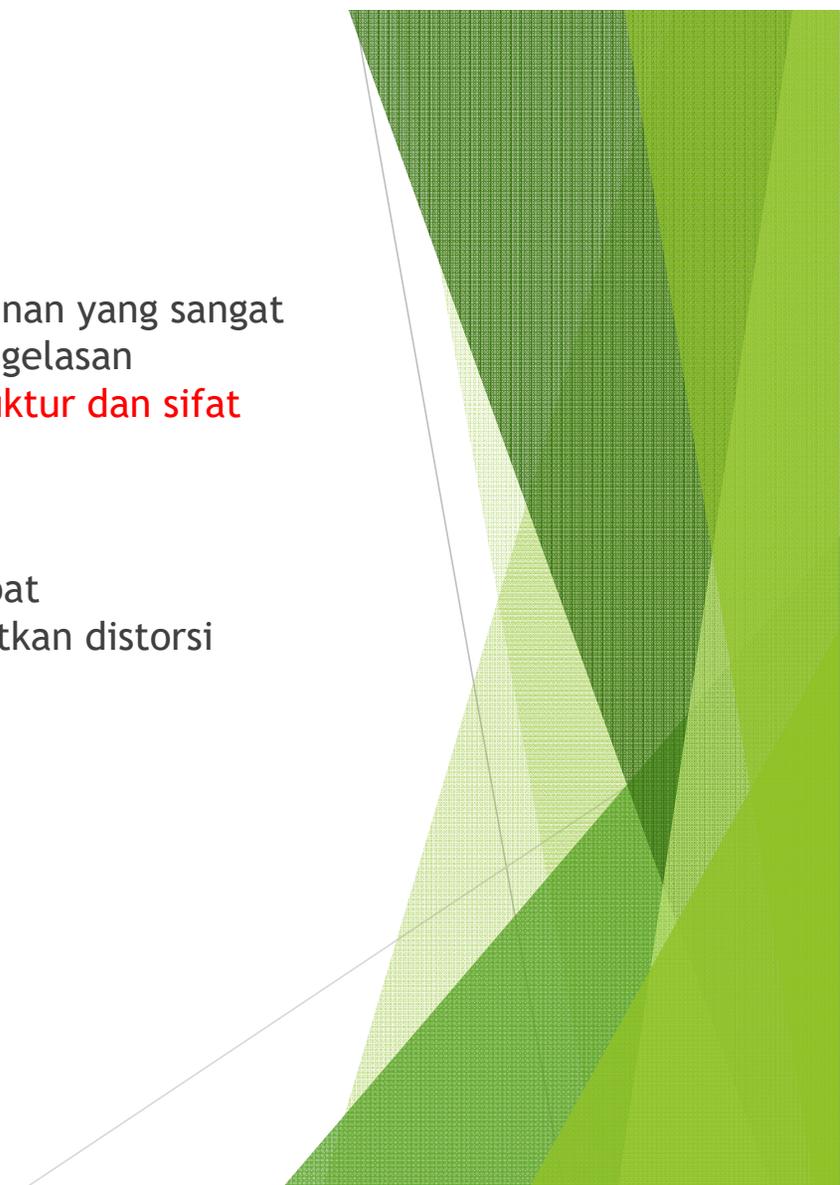


# Perpindahan Panas Las

Amir Arifin

# 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.



# 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).

## 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/m<sup>2</sup>.
- ▶ **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

# Kapasitas Energy (*energy capacity*)

- ▶ Besarnya energy (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;  $V_{\text{asetylene}}$  = debit aliran gas asetylene (l/h)
- ▶ Panas Pembakaran acetylene = 48kJ/l pada 1 atm dan 25 °C
- ▶  $h$  = waktu dalam jam
- ▶ **Energi pada busur listrik**  $Q(w) = \eta \cdot E \cdot I$
- ▶ Dimana  $E$  = potensial listrik
- ▶  $I$  = arus listrik
- ▶  $\eta$  = Efisiensi sumber panas
- ▶  $\eta$  = Energi yang ditransfer benda kerja (workpiece)
- ▶ Energi yang dibangkitkan sumber panas

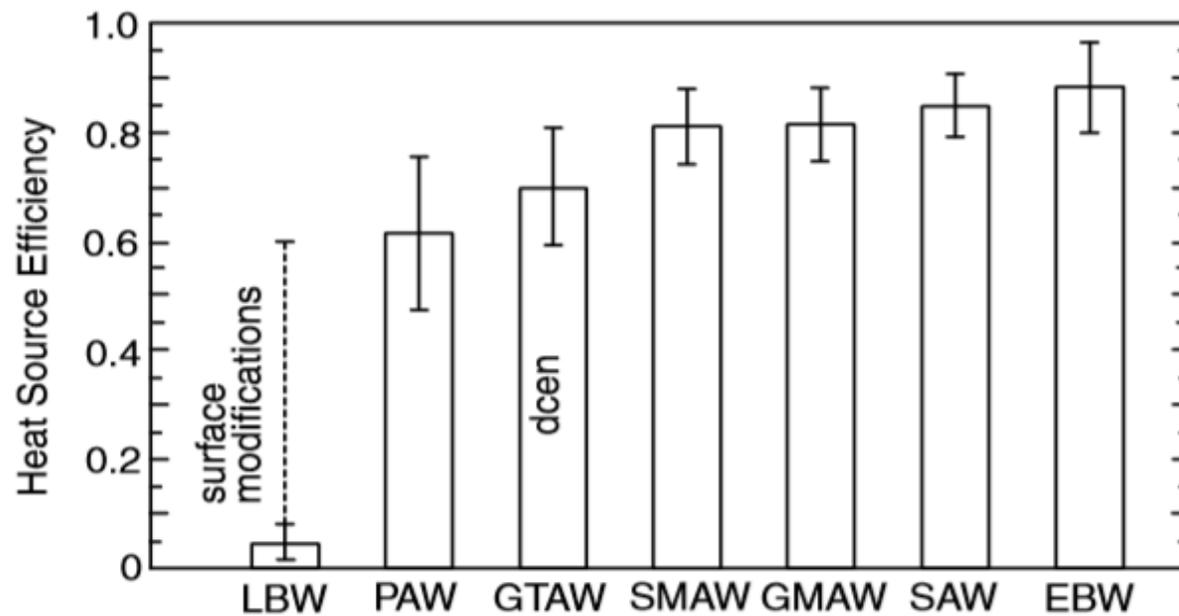
# Masukan Panas (heat input)

- ▶ 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  $\eta$  adalah efisiensi perpindahan panas yang nilainya 0 dan 1



# 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  $\alpha = \text{difusivitas}$   
 $\alpha = k / (\rho c)$

Persamaan ini berlaku pada beberapa kasus

Sumber Panas Titik

Sumber panas berbentuk garis (line source)

Sumber panas bidang (area source)

## 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)

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

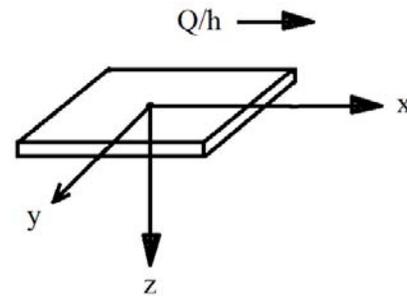
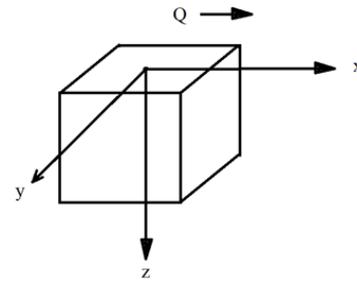
$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

## 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)

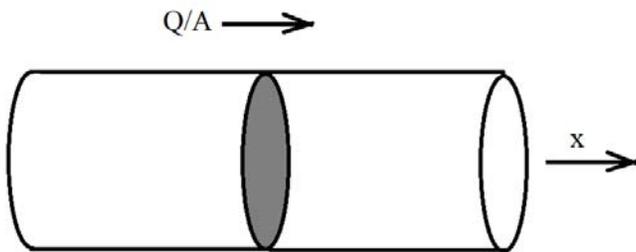
Dengan nilai  $r^2 = x^2 + y^2$

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



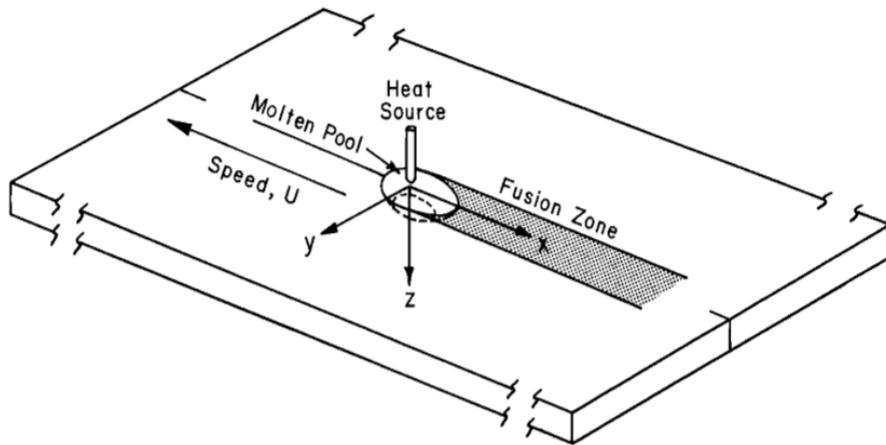
Sumber panas bidang (area source)

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



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

## Sumber Panas yang bergerak



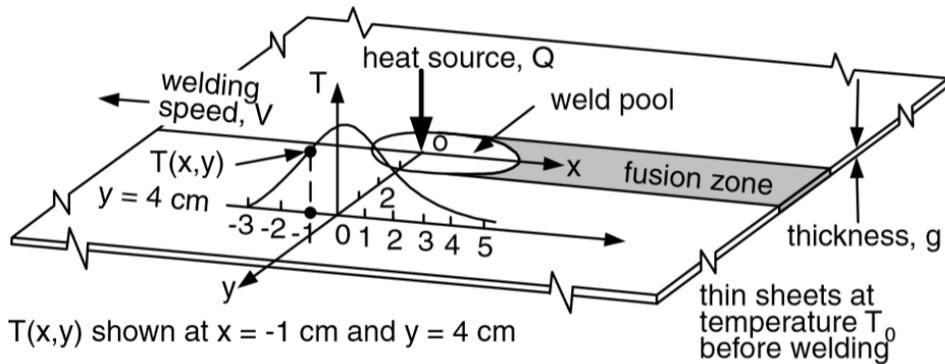
$$\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{v}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

### 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 terbuang dari permukaan benda kerja
6. Tidak ada konveksi pada weld pool.

## Persamaan Rosenthal dua dimensi



Dimana:

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

$T$  = temperatur

$T_0$  = temperatur benda kerja sebelum pengelasan

$k$  = Konduktivitas thermal benda kerja

$g$  = ketebalan benda kerja

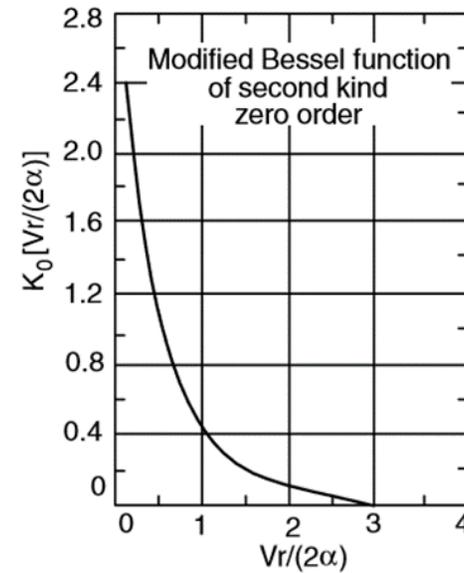
$Q$  = perpindahan panas dari sumber panas ke benda kerja.

$V$  = kecepatan pengelasan

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

$K_0$  = Fungsi Bessel

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



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.

## Sifat-sifat Termal beberapa jenis material

Material	Thermal Diffusivity, $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Volume Thermal Capacity, $\rho C_s$ (J/m <sup>3</sup> K)	Thermal Conductivity, $k$ (J/m s K)	Melting Point (K)
Aluminum	$8.5 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^6$	229.0	933
Carbon steel	$9.1 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^6$	41.0	1800
9% Ni steel	$1.1 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^6$	35.2	1673
Austenitic stainless steel	$5.3 \times 10^{-6}$	$4.7 \times 10^6$	24.9	1773
Inconel 600	$4.7 \times 10^{-6}$	$3.9 \times 10^6$	18.3	1673
Ti alloy	$9.0 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^6$	27.0	1923
Copper	$9.6 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^6$	384.0	1336
Monel 400	$8.0 \times 10^{-6}$	$4.4 \times 10^6$	35.2	1573

Source: Gray et al. (27).

## Persamaan Rosenthal tiga dimensi

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

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

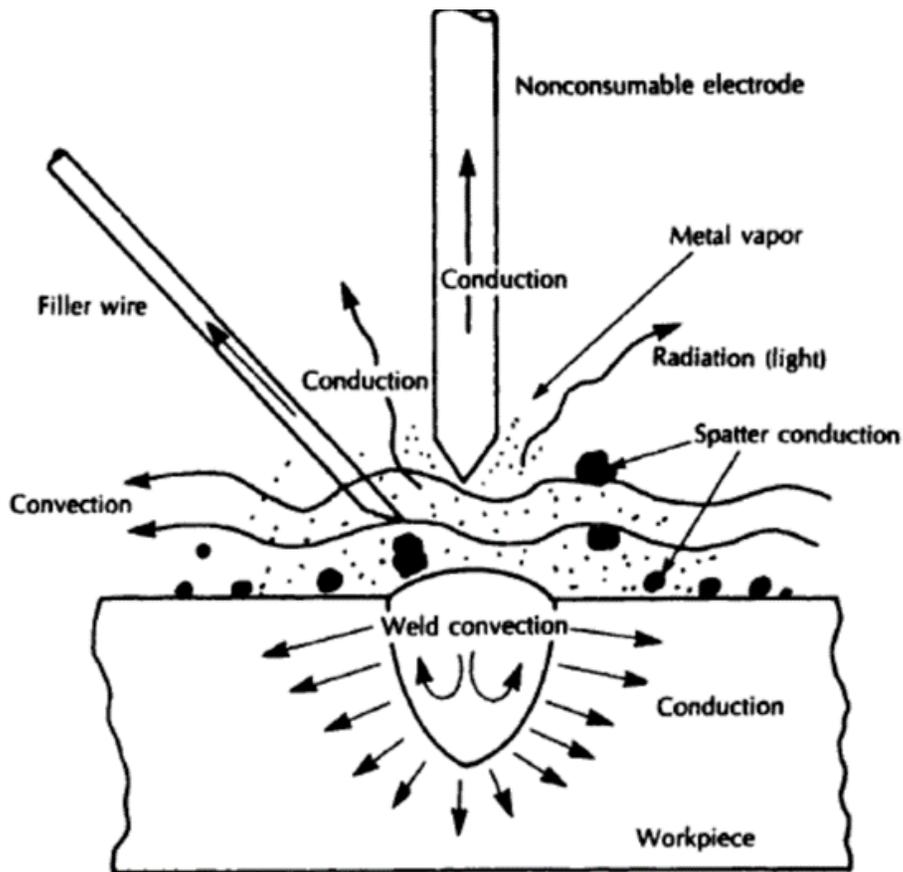
Persamaan diatas dapat menghitung temperatur dalam keadaan steady state  $T(x, y, z)$ , dimana sumber panas bergerak pada 'posisi benda kerja  $(x,y,z)$  dimana  $x = 1$  cm,  $y = 4$  cm dan  $z = 0$  cm

## Efek Pengaruh Variable Pengelasan Pada Daerah Penyebaran Panas

Luas daerah yang mengalami pemanasan dapat dipengaruhi oleh beberapa factor

- ▶ 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  $T_0$  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.

## 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 energy akan lepas dari sumber energy ke benda kerja seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini
- ❑ Energi dapat lepas melalui benda kerja itu sendiri, terjadi konveksi ke udara bebas, melalui kawat filler, radiasi, Konduksi dengan elektoda itu sendiri.

## Suhu Temperatur Puncak (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

$\rho$  = masa jenis ( $\text{g/mm}^3$ )

$c$  = panas jenis logam induk ( $\text{J/(gK)}$ )

$h$  = 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 ( $\text{J/mm}$ )

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

Sedangkan panas atau energy untuk sebuah las busur adalah

$$Q = \eta EI$$

# 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

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

$k$  = konduktifitas termal dari material ( $\text{J}/\text{mm s}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

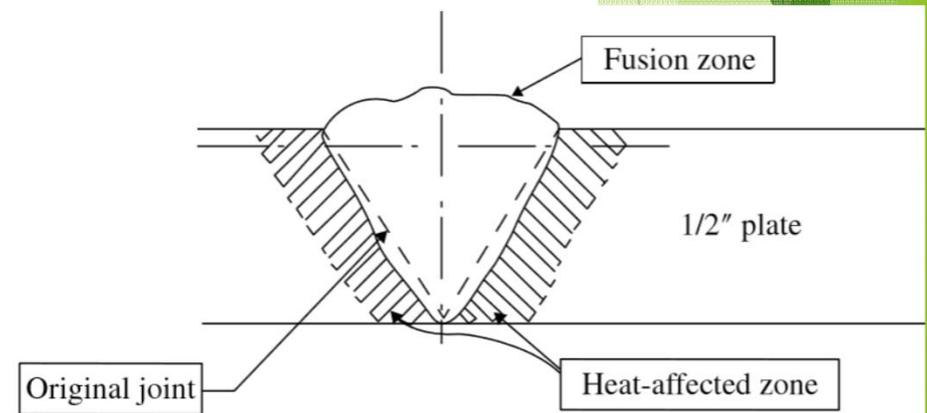
$T_o$  = Temperatur awal plat (K)

$T_c$  = temperature dimana laju pendinginan dihitung (K)

$H_{net} = q/v$

$Q = \eta EI$

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



# Laju pendinginan (Cooling Rates)

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)

$\rho$  = densitas dari material induk ( $\text{g/mm}^3$ )

$c$  = Panas spesifik dari material induk ( $\text{J/g.K}^{-1}$ )

$\rho c$  = Panas spesifik volume ( $\text{J/mm}^3\text{K}^{-1}$ )

Peningkatan temperatur awal ( $T_o$ ) akan menurunkan laju pendinginan

# 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

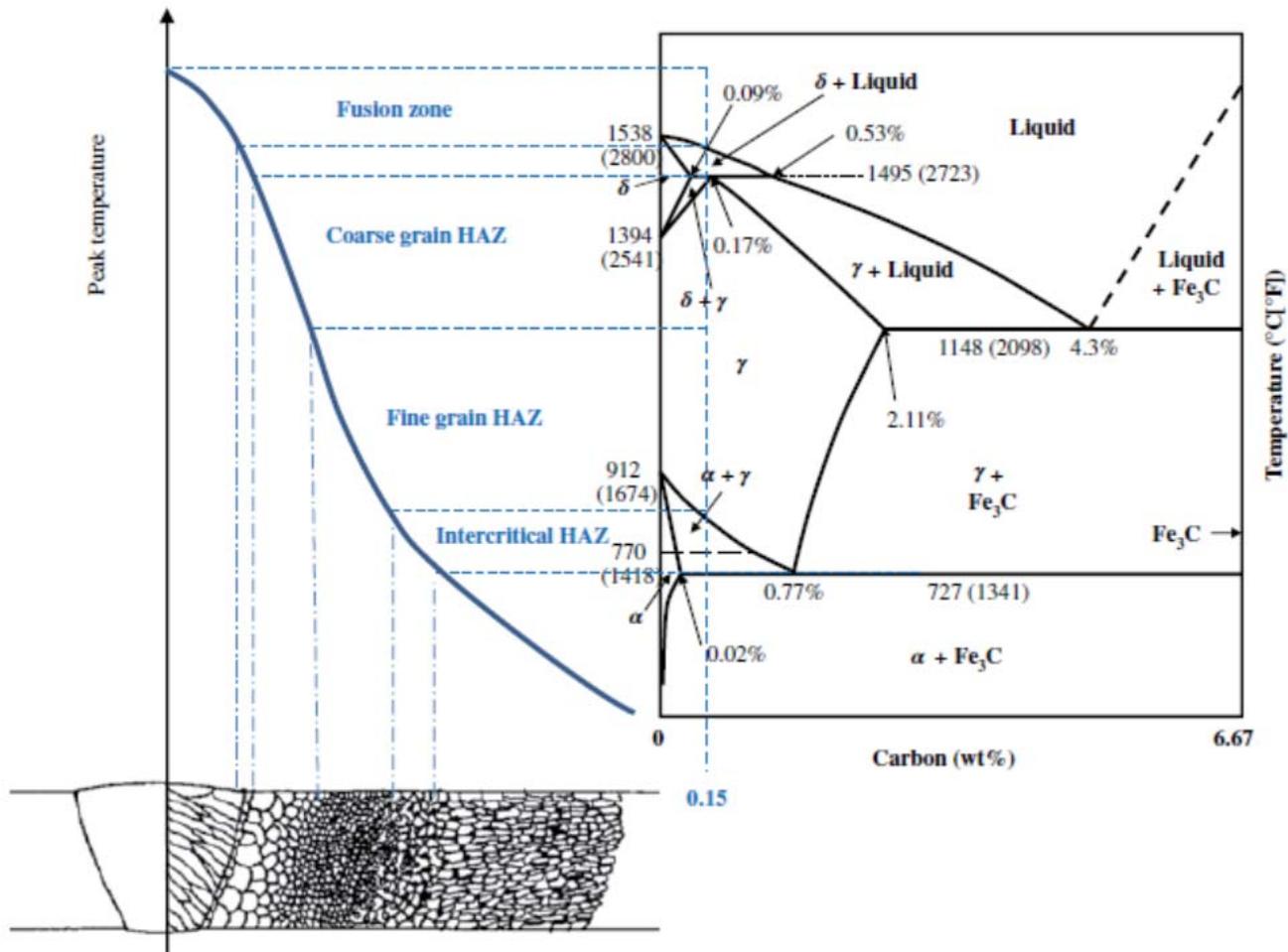
Biasanya waktu pendinginan dinyatakan dalam notasi  $\Delta t_{8/5}$ . Dan besarnya biasa dihitung dengan persamaan berikut:

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

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

Tebal kritis suatu pelat

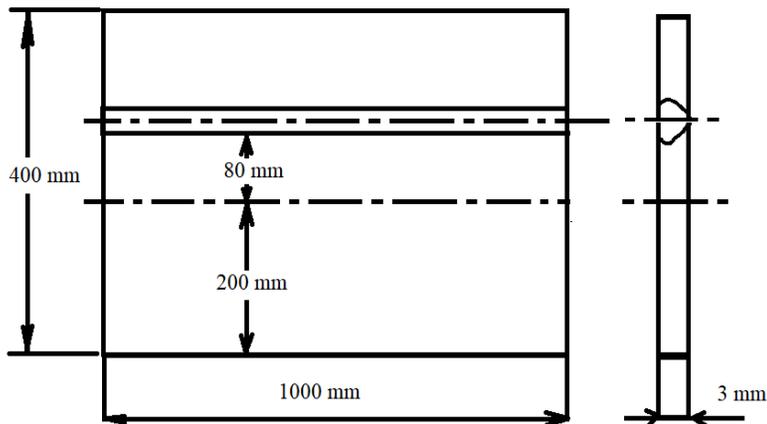
$$h_c = \left[ \frac{q}{2\rho c} \left( \frac{1}{500 - T_o} - \frac{1}{800 - T_o} \right) \right]^{1/2} \quad \text{Pelat dikategorikan tebal jika } h > h_c \text{ dan tipis apabila } h < h_c$$



**FIGURE 2.51** Relationship between Fe-Fe<sub>3</sub>C phase diagram and the microstructure in the HAZ of plain-carbon steels.

## 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 V**, tegangan listrik **20 A**, kecepatan pengelasan **2 mm/s** dan efisiensi **70 %**.



Diketahui sifat-sifat thermal baja sebagai berikut;	
Konduktifitas panas (k)	= 0.04 Jmm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
Hasil kali (ρc)	= 5.0 × 10 <sup>-3</sup> Jmm <sup>-3</sup> °C <sup>-1</sup>
Koefisien muai panas (αT)	= 14 × 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
Modulus elastisitas (E)	= 207 GPa
Factor kekakuan longitudinal (μ1)	= 0.335
Factor kekakuan Transfersal (μ2)	= 0.850
Titik lebur Tm	= 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

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

$hc = 21.623 \text{ mm}$  dikategorikan sebagai pelat tipis (tebal pelat < hc)--

**Waktu Pendinginan** adalah

$$\Delta t_{\frac{8}{5}} = \frac{\left(\frac{q}{v}\right)^2}{4\pi k\rho c h^2} \left[ \left(\frac{1}{500 - T_o}\right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_o}\right)^2 \right] \quad \Delta t_{\frac{8}{5}} = 1.138 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

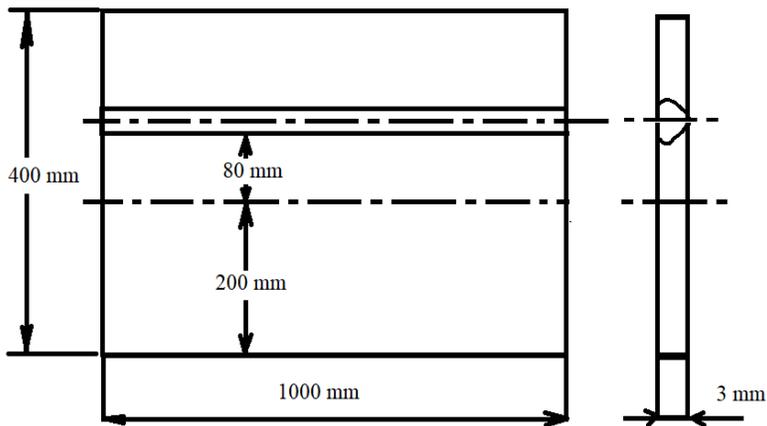
**Suhu maksimum ( $T_p$ ) pada jarak 5 mm dari garis las adalah:**

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

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

## Tugas

Suatu pelat baja **ST 37** dengan sambungan tumpul (butt joint) di las dengan las busur elektroda terbungkus. **Ketebalan pelat (1.5+1 angka terakhir NIM) mm** dan sebelum pengelasan, pelat dipanasi dulu (**preheat**) pada suhu (**100+ 2 angka terakhir NIM**) °C. Jarak garis las dengan sumbu simetri pelat (eksentris) sebesar 80 mm seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini. Pengelasan dilakukan dengan menggunakan kuat arus (**150 + 2 angka terakhir NIM**) V, tegangan listrik **20 A**, 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 ( $\rho c$ )	= $5.0 \times 10^{-3} \text{ Jmm}^{-3}\text{°C}^{-1}$
Koefisien muai panas ( $\alpha T$ )	= $14 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$
Modulus elastisitas ( $E$ )	= $207 \text{ GPa}$
Factor kekakuan longitudinal ( $\mu_1$ )	= $0.335$
Factor kekakuan Transfersal ( $\mu_2$ )	= $0.850$
Titik lebur $T_m$	= $1500\text{°C}$

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



# Tegangan Sisa (Residual Stress) Pada Pengelasan

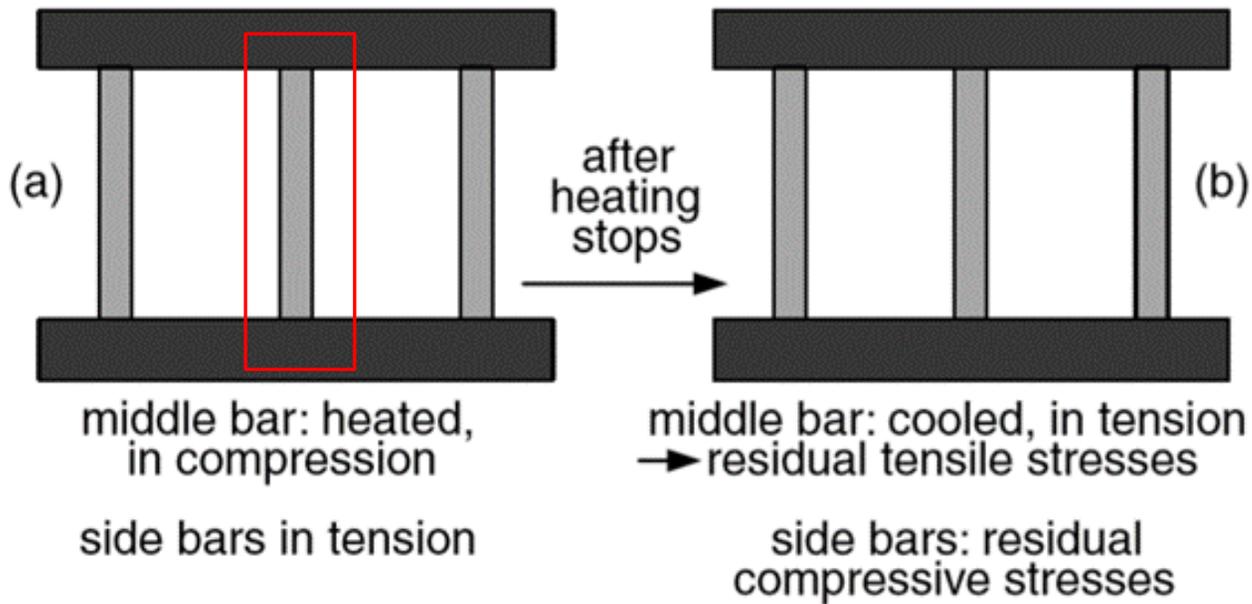
**Tegangan sisa** adalah tegangan yang ada pada sebuah benda jika seluruh beban yang ada dilepaskan kadangkala sering disebut juga dengan **tegangan internal**.

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.

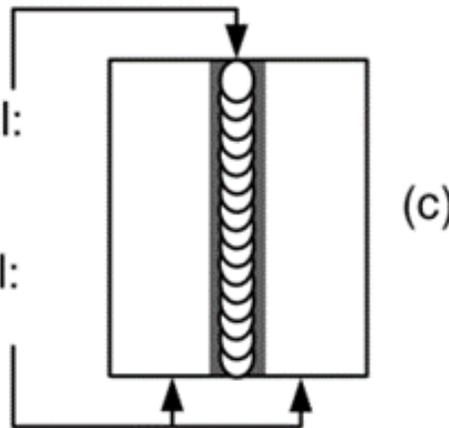
# Penyebab terjadinya tegangan sisa

- ❑ Tegangan sisa sebagai akibat dari tegangan thermal seperti pada pengelasan dan perlakuan panas (heat treatment)
- ❑ Tegangan sisa yang disebabkan karena transformasi fasa seperti pada baja karbon
- ❑ 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.



weld metal and adjacent base metal:  
residual tensile stresses

areas farther away from weld metal:  
residual compressive stresses



Tegangan Termal:

(a) selama pemanasan;

(b) selama pendinginan

(c) tegangan sisa pada sambungan las.

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

## Proses terjadinya tegangan sisa yang disebabkan oleh tegangan thermal

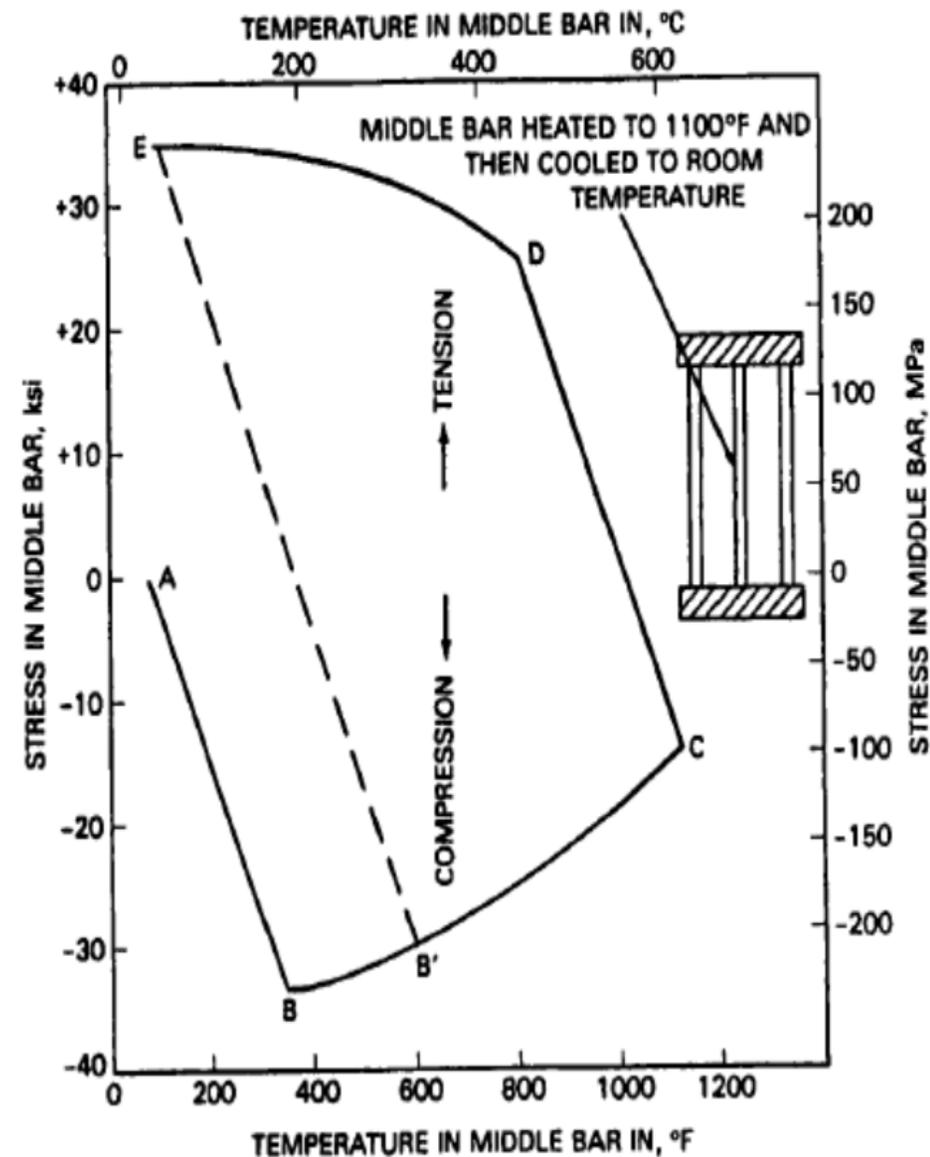
**A – B** Kenaikan suhu menyebabkan peningkatan tegangan tekan. Hal ini disebabkan oleh tertahannya penambahan panjang akibat pemanasan. Hal ini terjadi sampai suhu 340 °F (170°C) yaitu pada titik B dimana tegangan luluh (yield stress) tekan tercapai.

**B – C** Pada pemanasan selanjutnya, tegangan tekan turun dan pemanasan dihentikan pada titik C yaitu pada 1100°F (595°C).

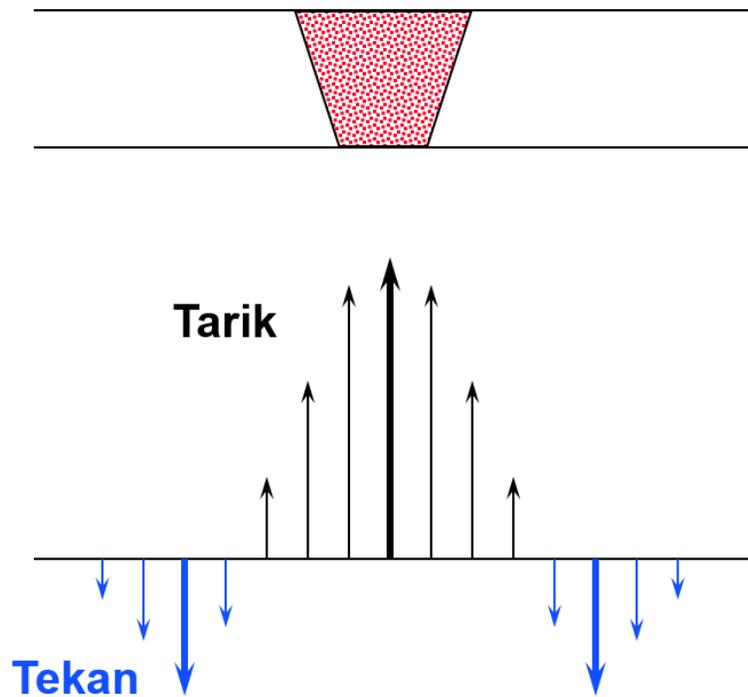
**C – D** Ketika suhu turun dari titik C, tegangan tekan turun dengan cepat dan berubah menjadi tegangan tarik sampai tegangan luluh Tarik tercapai pada titik D.

**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.



## Pola Residual Stress



- ▶ Residual stress hadir setelah proses pendinginan
- ▶ Tension/tarik muncul pada daerah weld pool
- ▶ Compression/tekan disekitar weld pool

### Potongan A - A :

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

### Potongan B - B :

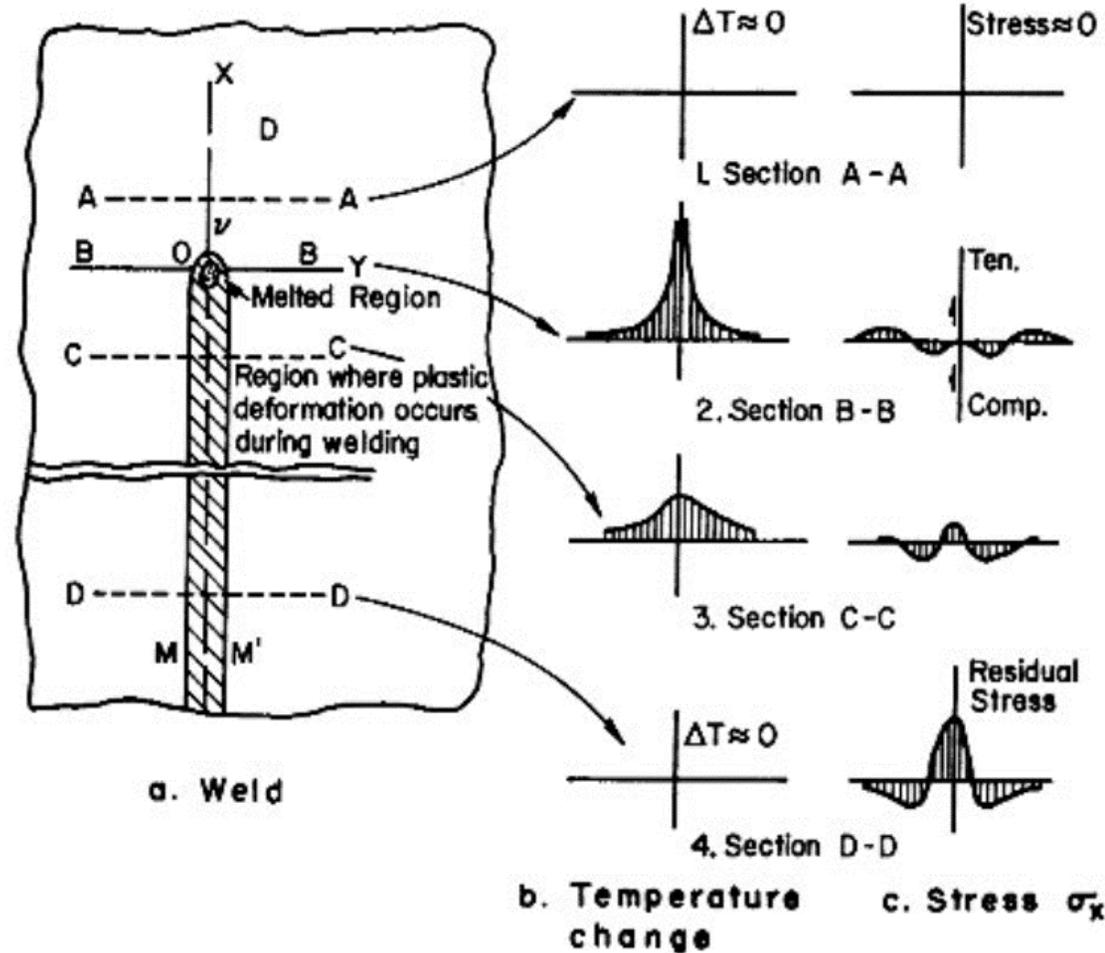
Suhu sangat tinggi karena potongan B - B melalui las cair. **Tegangan thermal dekat sumber panas mendekati nol karena logam cair tak bisa menahan gaya/beban.** Pada daerah HAZ terdapat tegangan tekan karena pemuaian HAZ terhalang oleh logam di sekitarnya.

### Potongan C - C :

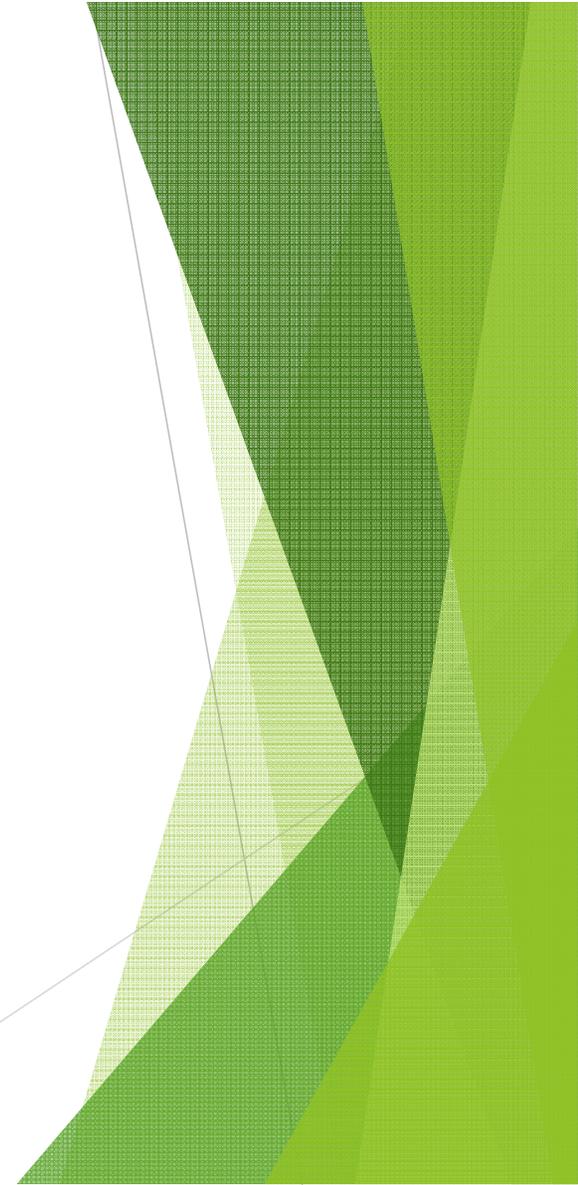
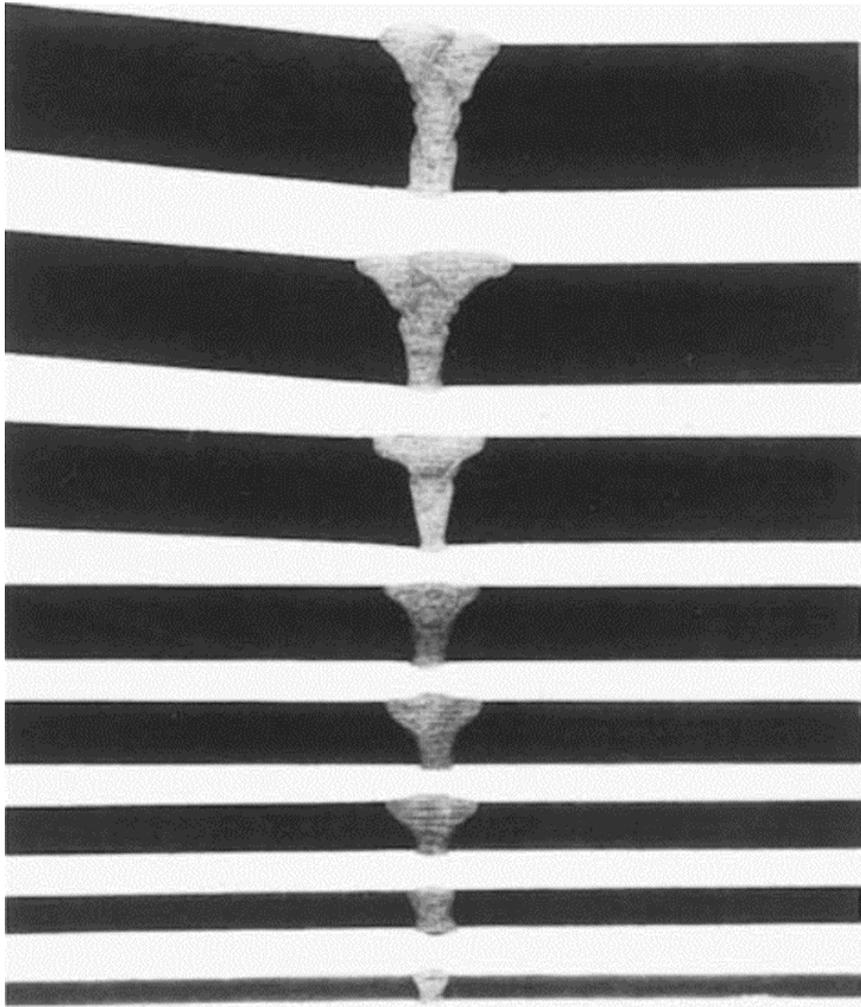
Daerahh dimana pendinginan terjadi. Logam las dan HAZ menyusut sehingga terjadi tegangan Tarik. **Tegangan Tarik ini diimbangi tegangan tekan pada logam induk.**

### Potongan D - D :

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



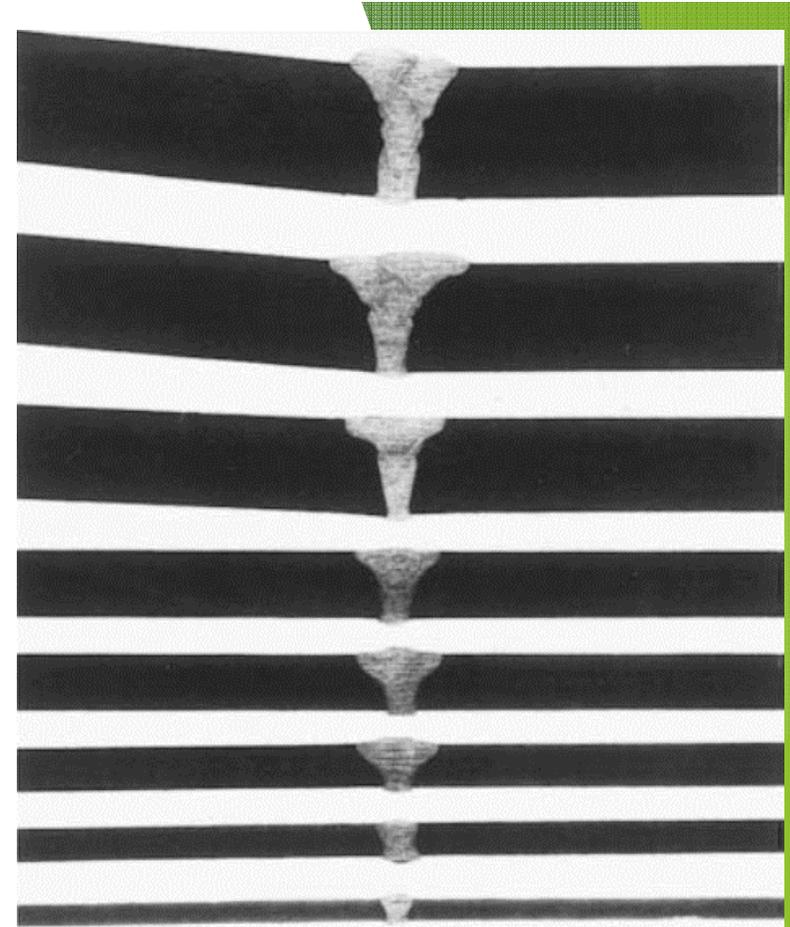
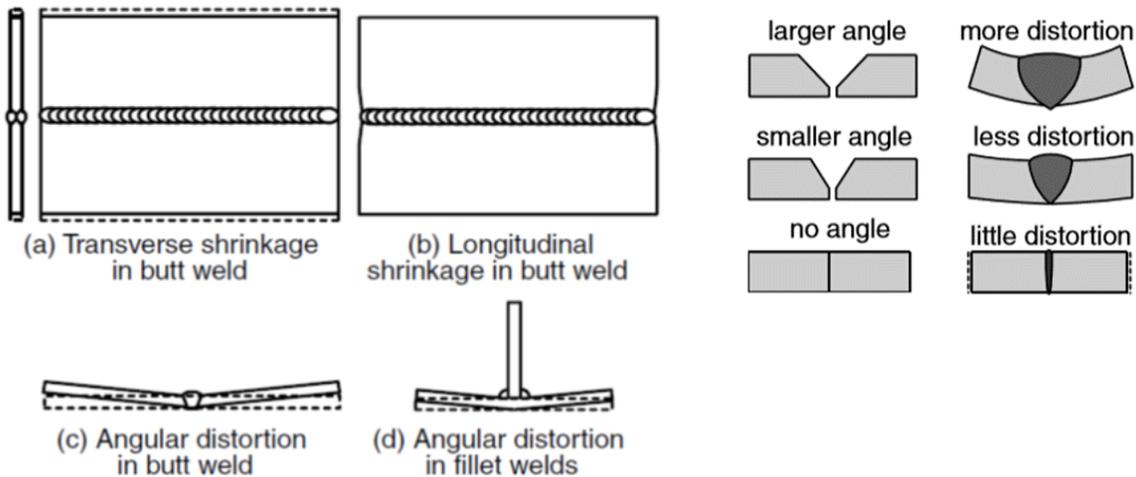
Perubahan temperature dan tegangan selama pengelasan  
Sumber: Welding Handbook, American Welding Society.



# Distorsi

Distorsi pada hasil pengelasan muncul karena adanya penyusutan dari pembekuan dan kontraksi termal dari logam las selama proses pengelasan berlangsung.

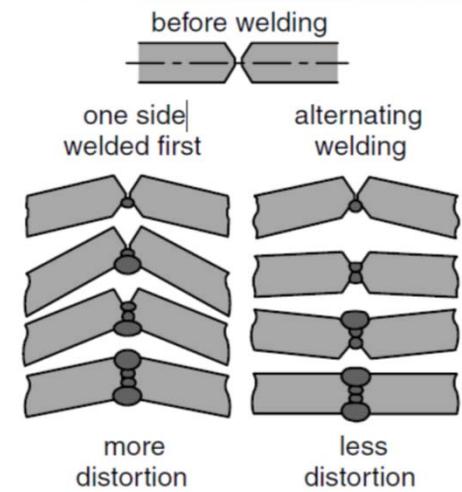
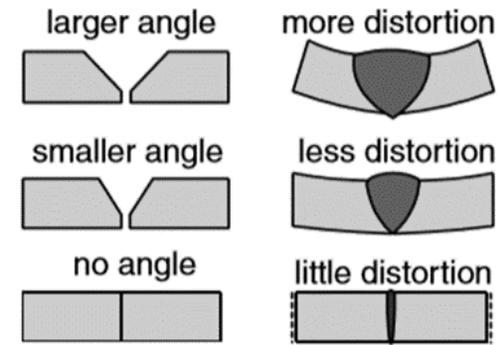
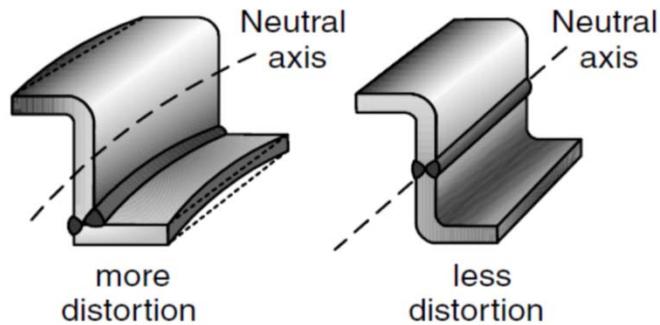
Peningkatan sudut distorsi muncul karena logam las yang diatas lebih lebar dari pada yang dibawah sehingga menyebabkan penyusutan dan kontraksi termal lebih besar pada bagian atas.

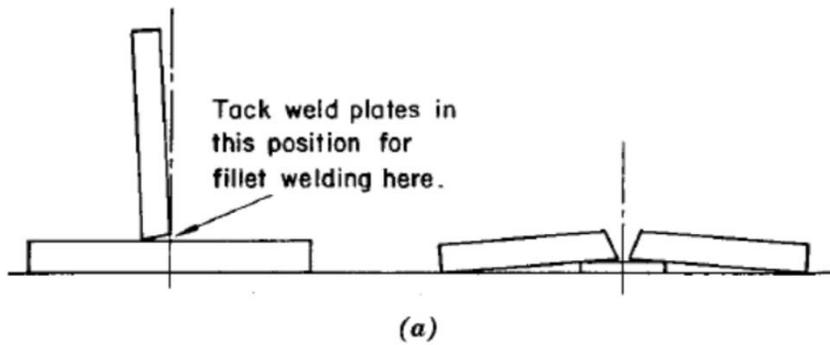


Distortion in butt welds of 5083 aluminum with thicknesses of 6.4-38mm. Reprinted from Gibbs (6). Courtesy of American Welding Society

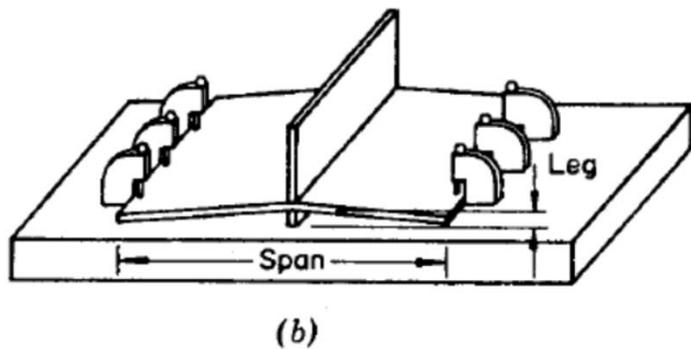
# Metode Mengurangi Distorsi yang Terjadi

- ▶ Mengurangi volume logam las dapat mengurangi jumlah distorsi sudut dan penyusutan lateral.
- ▶ Balancing welding by using a double-V joint in preference to a single-V joint can help reduce angular distortion.
- ▶ Reducing distortion by placing welds around neutral axis.





Presetting (Figure a) is achieved by estimating the amount of distortion likely to occur during welding and then assembling the job with members preset to compensate for the distortion

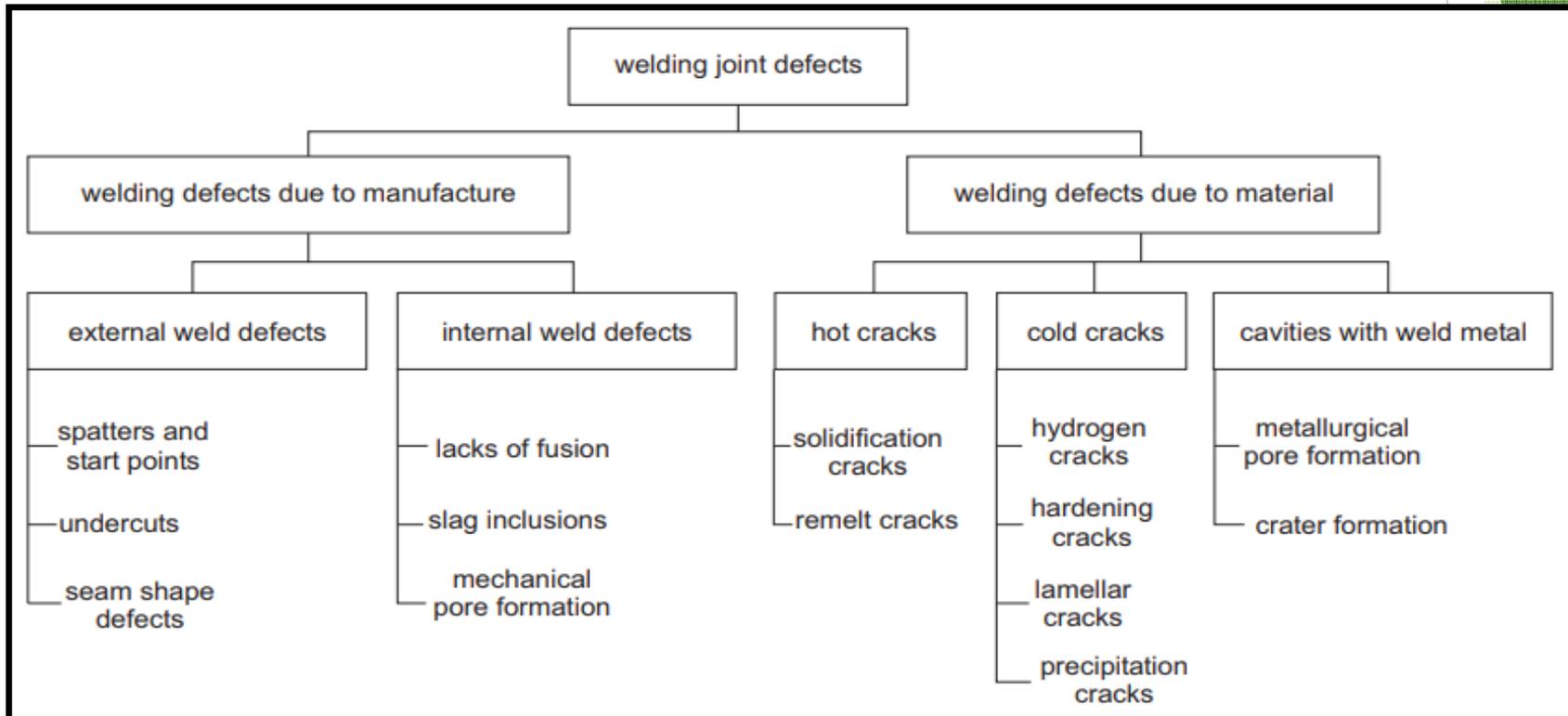


Elastic prespringing (Figure b) can reduce angular changes after the removal of the restraint.



# Cacat Las

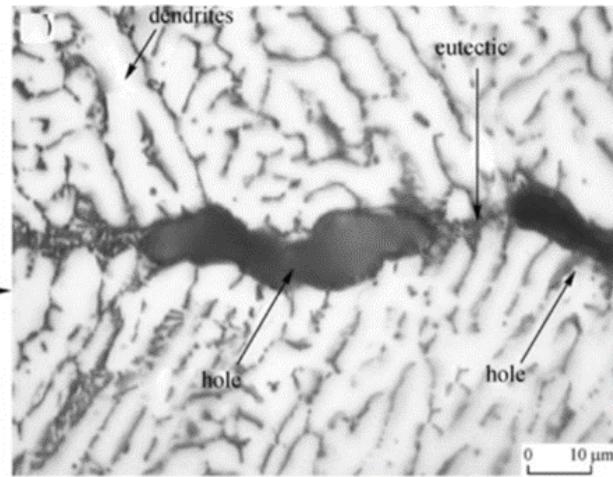
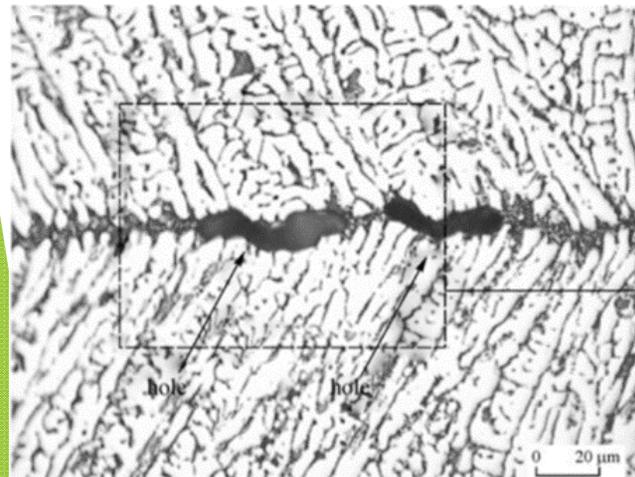
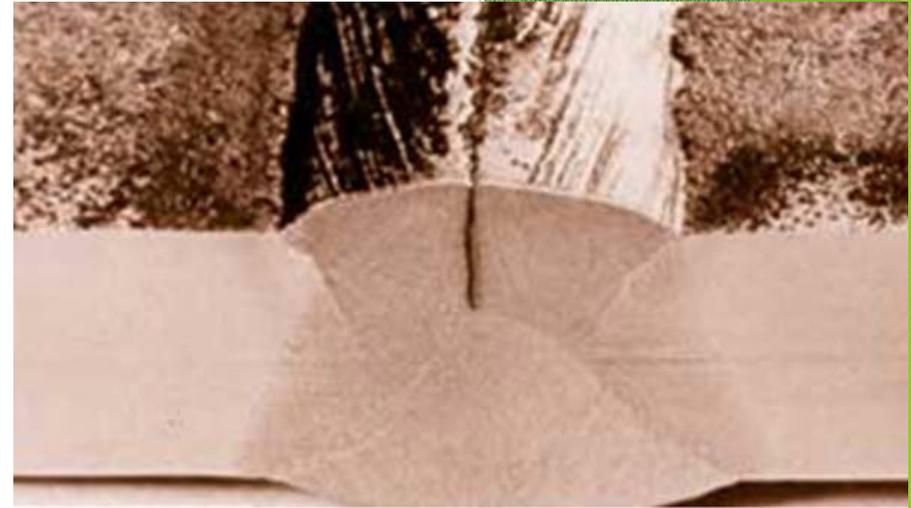
Cacat dalam proses pengelasan dapat di kategorikan menjadi dua kategori, yaitu cacat yang timbul karena proses manufaktur (proses pengelasan) dan cacat yang timbul karena disebabkan oleh material. Cacat las yang disebabkan oleh manufaktur dapat dibagi menjadi cacat eksternal dan cacat internal. Sedangkan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



# Retak Panas (hot cracking)

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.



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

# Retak Panas (hot cracking)

Karena kelarutan unsur-unsur paduan pada zat padat lebih rendah dibanding 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 impurity yang menyebabkan terjadinya retak biasanya mempunyai sifat-sifat berikut:

- Nilai koefisien partition,  $k_0$  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.

# COLD CRACKING OF WELDS



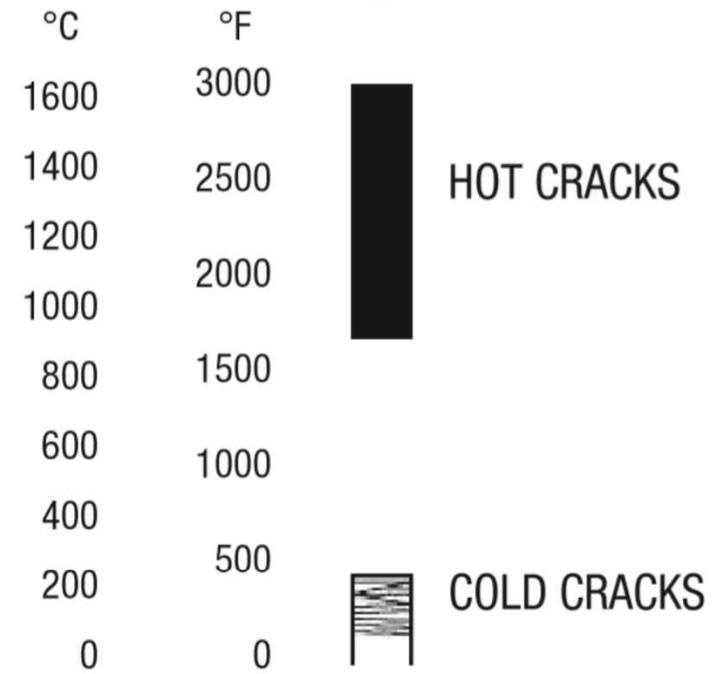
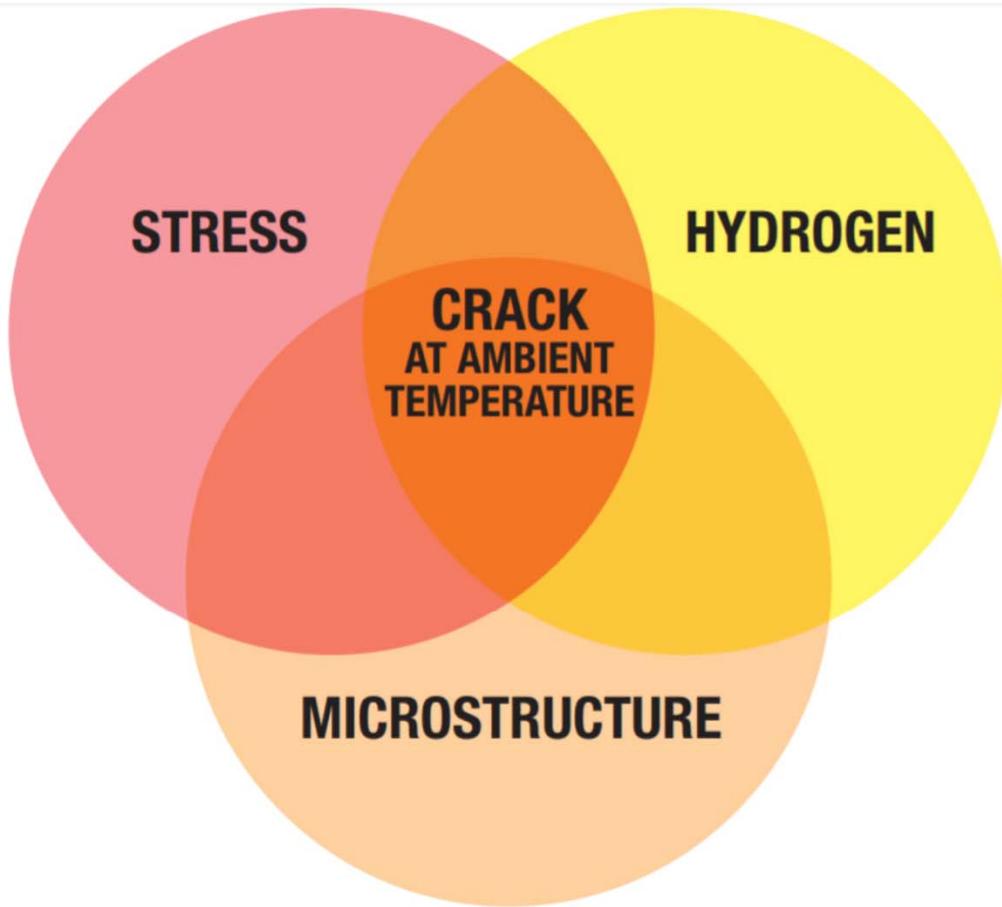
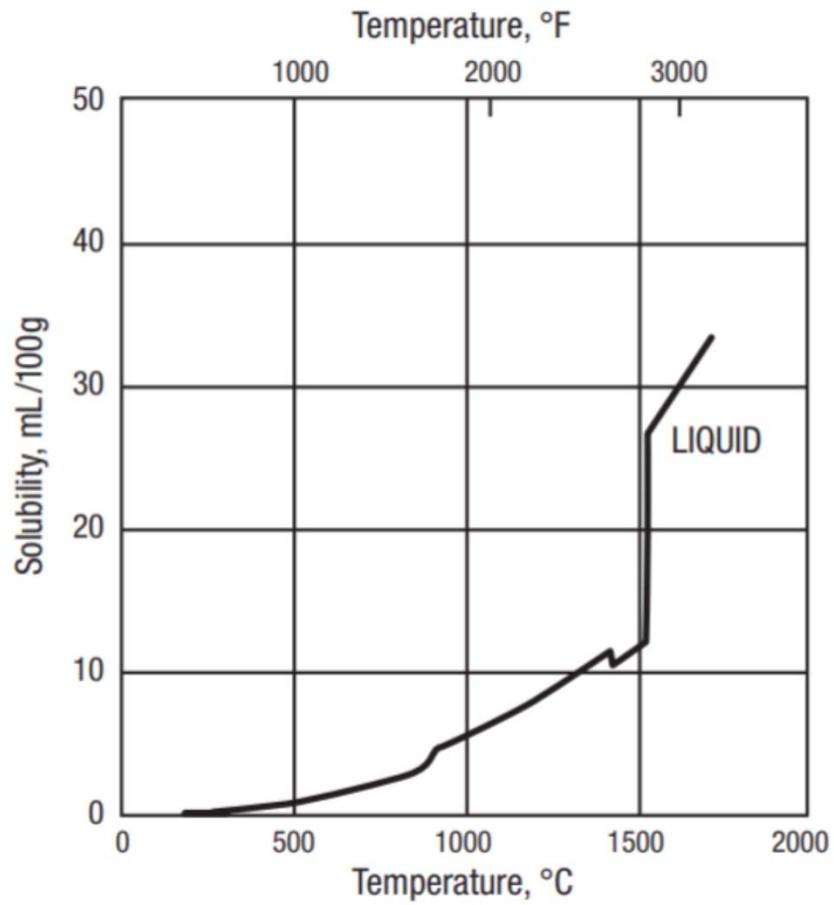


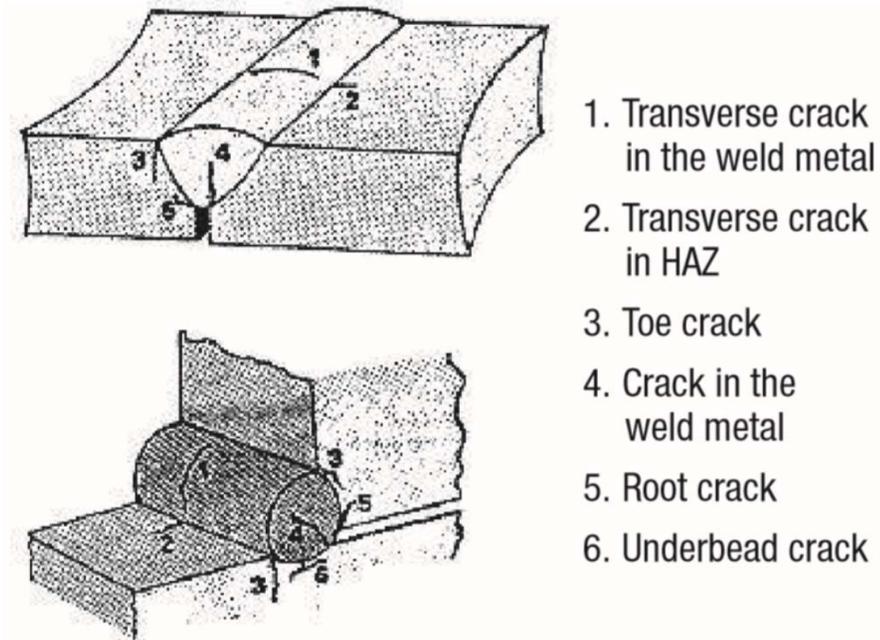
Figure 1 Hot and cold cracking temperature ranges



*Figure 3 Hydrogen solubility in steel as a function of the temperature*



# CRACK LOCATION



*Figure 5. Frequent locations of cold cracks in groove and fillet welds*



*Figure 6 Hydrogen-induced cracking in the HAZ of carbon steel, ASM, V.11*

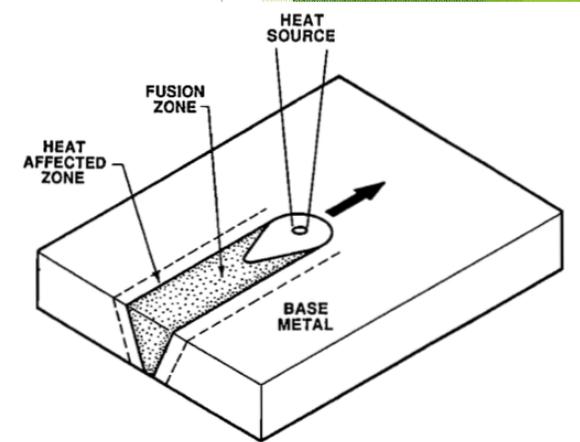
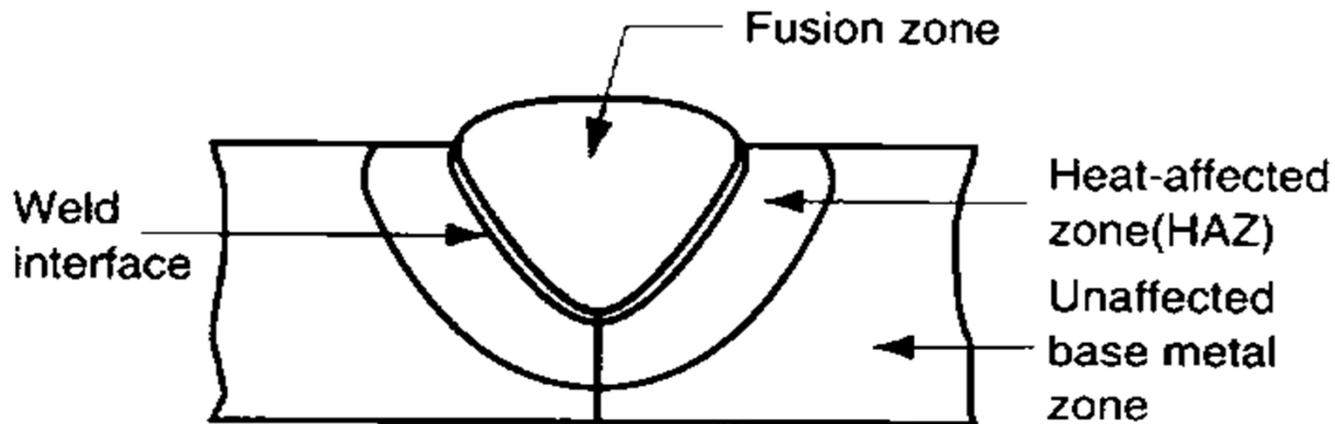


# Dasar-Dasar Metalurgi Las

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 dalam Pengelasan dapat dibagi menjadi 4 :

- *Fusion Zone (FZ),*
- *Weld interface (mushy zone),*
- *Heat Affected Zone (HAZ)*
- *Unaffected base metal zone*

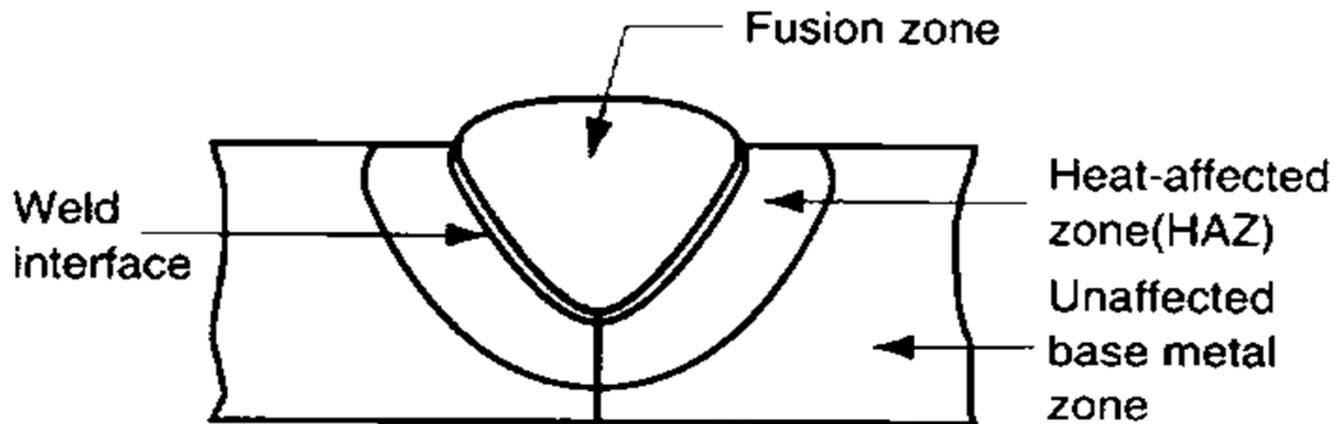


## **Fusion Zone,**

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.

## **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).

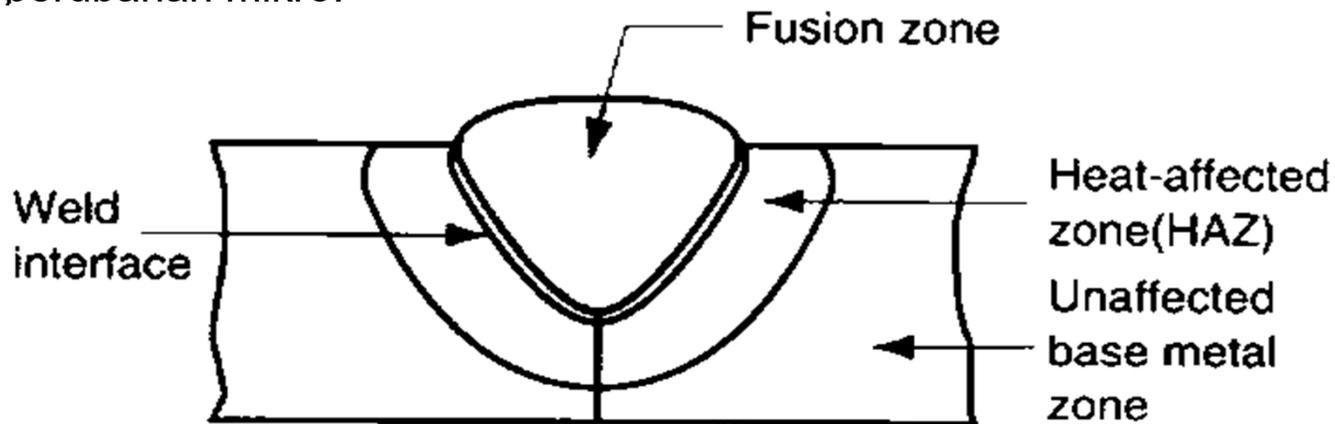


## Heat affected zone (HAZ)

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.

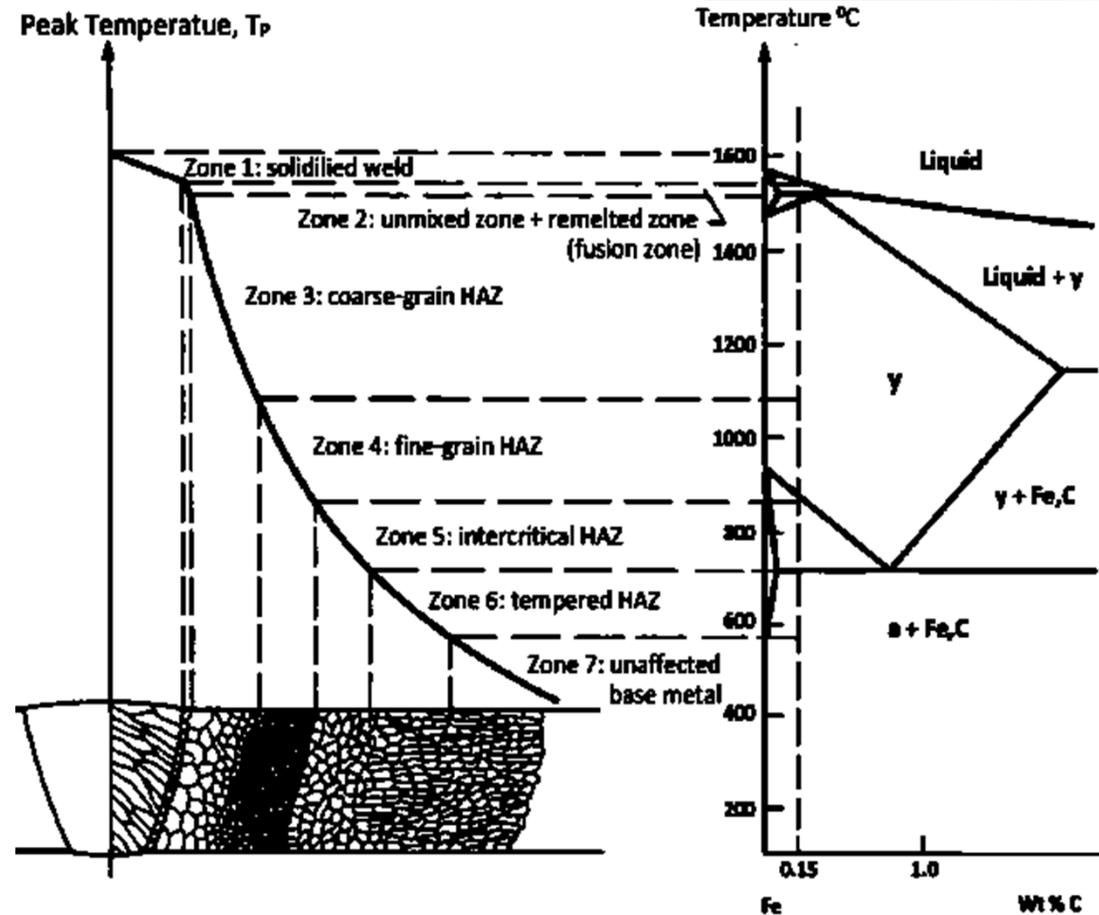
## Unaffected base metal zone

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 (HAZ)* 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.

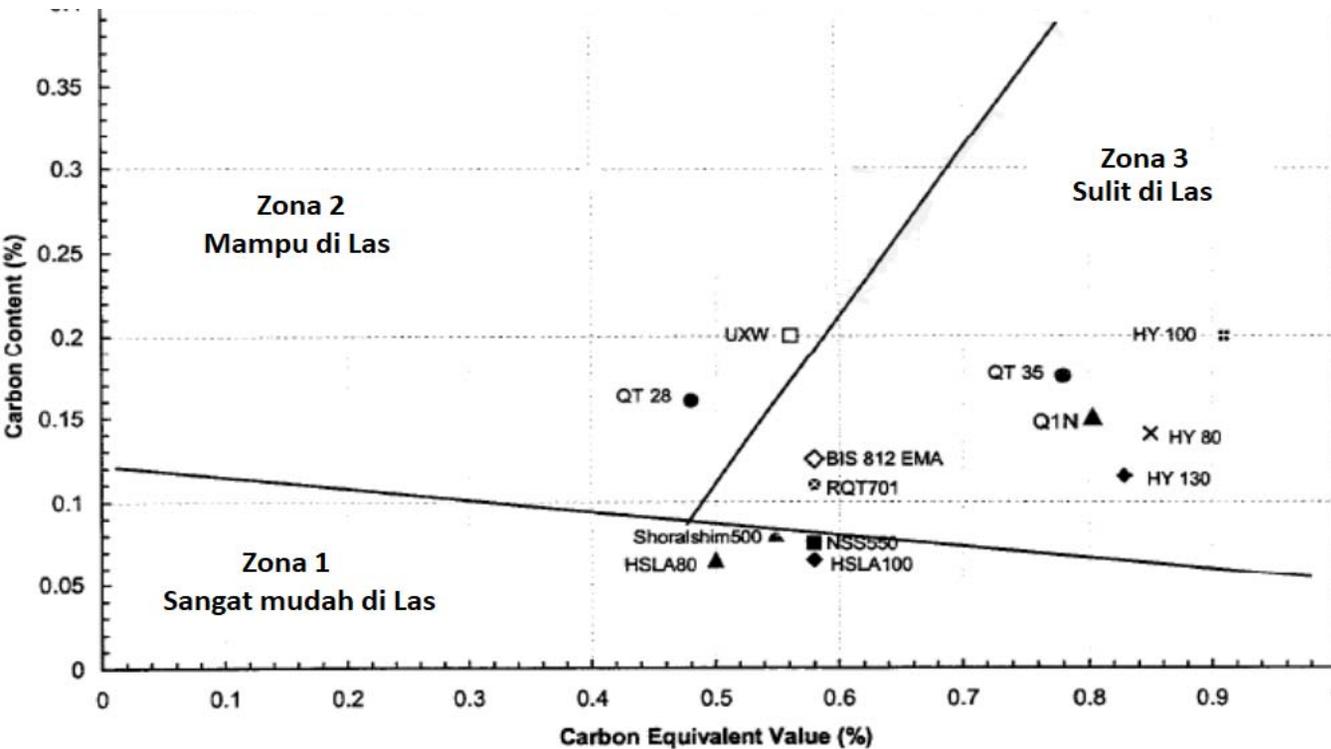


## Kemampuan Las Baja (*weldability of steels*)

Dalam pengelasan salah satu persyaratan penting pada pengelasan logam adalah sifat mampu las yang baik (*weldability*). Kemampuan las baja 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. **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:

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



**Diagram Graville** menyajikan kerentanan keretakan yang diinduksi hidrogen dari berbagai jenis baja berdasarkan pada kandungan karbon dan carbon equivalent (C.E) yang sesuai

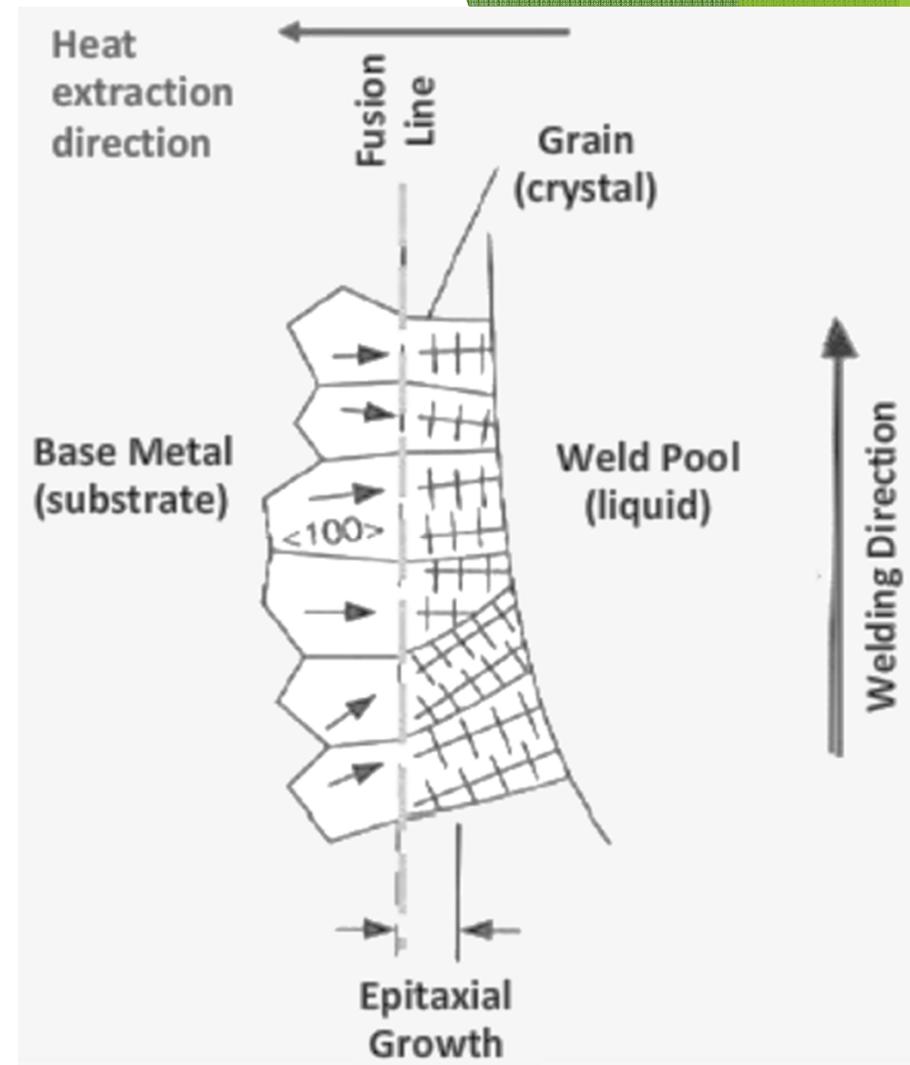
- Zona 1** pada diagram Graville baja karbon mempunyai kandungan karbon yang rendah dan nilai kekerasan yang rendah.
- Zona 2** mempunyai level karbon yang tinggi dengan kekerasan yang lebih rendah. Kerentanan retak karena induksi hidrogen pada baja dapat dihindari selama pengelasan dapat dikendalikan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

## 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 ( $\Delta T$ ) dan komposisi paduan ( $C_0$ ). Dalam weld pool,  $G$ ,  $R$  dan  $\Delta T$ .

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.



Pembekuan Epitaxial dalam pengelasan Fusi