

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Retak Dingin

2.1.1 Fenomena Retak Dingin pada Lasan

Retak dingin dikenal dengan beberapa istilah seperti *hydrogen induced cracking, delayed cracking, underbead cracking*. Retak dingin merupakan retak yang terjadi pada temperatur rendah yaitu pada waktu logam telah mendingin lebih rendah dari 150°C dalam waktu mulai dari beberapa menit hingga beberapa hari ^[6].

Permulaan retak dingin biasanya berhubungan dengan takikan, seperti *toe* pada lasan, atau struktur mikro yang tidak homogen yang menunjukkan perubahan kekerasan yang mendadak seperti inklusi *slag* dan *interface* martensit –ferit. Seperti fenomena perambatan retak pada umumnya, retak dingin dipengaruhi juga oleh tegangan sisa tinggi dan pengerasan matriks ^[11].

Berdasarkan letak retak yang terjadi, retak dingin dapat digolongkan menjadi dua yaitu retak di daerah HAZ dan retak di daerah logam las ^[10].

1. Retak dingin pada daerah HAZ

Retak dingin terjadi ketika kondisi-kondisi berikut berlangsung secara simultan. Kondisi-kondisi tersebut adalah :

A) Hadirnya hidrogen pada tingkatan yang cukup

Hadirnya hidrogen biasanya bersumber dari kelembaban fluks yang digunakan pada pengelasan atau dari sumber lainnya. Hidrogen diserap melalui *weld pool* dan sebagian ditransfer ke HAZ melalui difusi.

B) Adanya tegangan tarik pada lasan

Peningkatan tegangan berasal dari kontraksi termal selama pendinginan dan diperkuat oleh tegangan lain yang terbentuk sebagai hasil dari rigiditas bagian yang akan disambung.

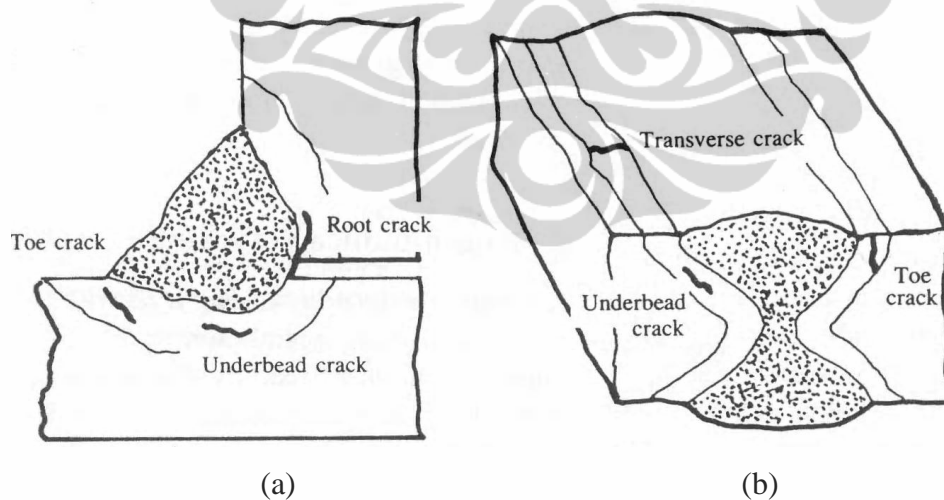
C) Adanya sensitivitas struktur mikro pada HAZ

Selama pengelasan, bagian HAZ menerima temperatur yang cukup tinggi untuk bertransformasi secara cepat dari ferit ke austenit dan sebaliknya menghasilkan struktur mikro yang biasanya lebih keras dan lebih sensitif terhadap *hydrogen embrittlement* daripada bagian lain HAZ. Retak hidrogen biasanya ditemukan pada daerah transformasi tersebut.

D) Terjadi di temperatur rendah

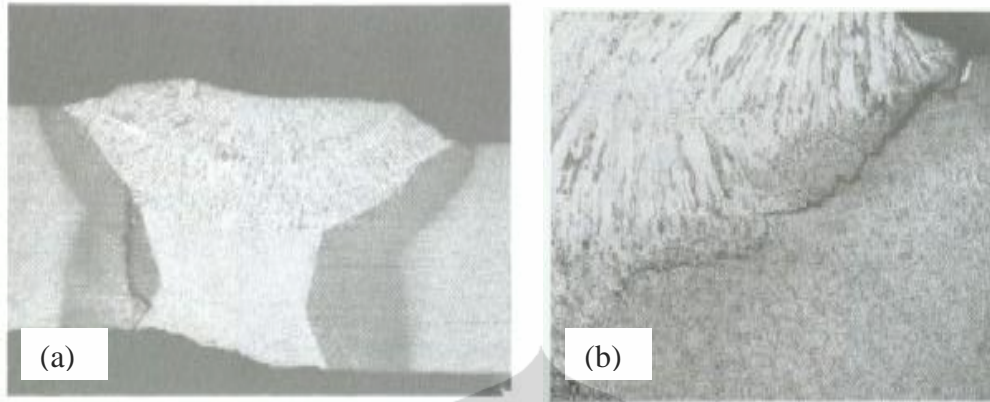
Resiko terbesar retak terjadi ketika temperatur mendekati temperatur batas dan retak membutuhkan beberapa jam setelah proses pengelasan selesai. Retak tidak mungkin terjadi pada struktur baja di atas temperatur 150°C.

Retak pada HAZ biasanya terletak pada *weld toe*, *weld root* atau pada posisi *underbead*. Secara skematis, posisi retak tersebut untuk lasan *fillet* dan *butt weld* ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pada lasan *fillet*, retak HAZ berorientasi sepanjang *weld length*. Pada lasan *butt*, retak sub permukaan dapat berorientasi transversal terhadap arah lasan. Secara mikroskopis, retak pada HAZ dapat terjadi secara *intergranular* atau *transgranular*. Gambar 2.2 menunjukkan contoh retak dingin pada daerah HAZ.



Gambar 2.1 Retak Dingin pada HAZ ^[10]

(a) pada Lasan *Fillet* (b) pada Lasan *Butt*



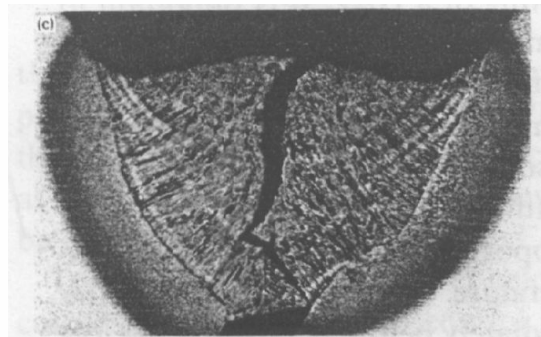
Gambar 2.2 Contoh Retak Dingin pada Daerah HAZ Lasan ^[11]

(a) *Root Crack* (b) *Toe Crack*

2. Retak dingin pada logam las

Retak dingin dapat terjadi pada logam las sama seperti pada daerah HAZ. Retak pada logam las dapat berorientasi longitudinal atau transversal terhadap *weld length*. Orientasi retak transversal dapat tegak lurus maupun bersudut (sekitar 45°) terhadap permukaan lasan. Secara mikroskopis, retak terjadi secara *transgranular*, meskipun beberapa deposit paduan terdapat morfologi *intergranular* ^[10].

Faktor-faktor yang mempengaruhi retak pada logam las sama seperti faktor yang mempengaruhi retak pada HAZ yaitu tegangan, hidrogen, sensitivitas mikrostruktur dan temperatur. Namun demikian, retak dingin pada logam lasan dapat terjadi pada tingkat kekerasan logam lasan yang rendah ^[10]. Contoh retak dingin pada logam las ditunjukkan pada Gambar 2.3.

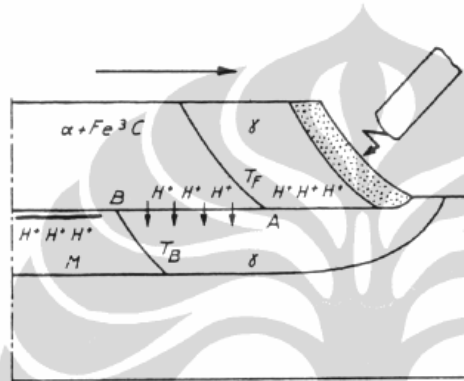


Gambar 2.3 Contoh Retak Dingin pada Logam Las

2.1.2 Faktor yang Berpengaruh Terhadap Retak Dingin

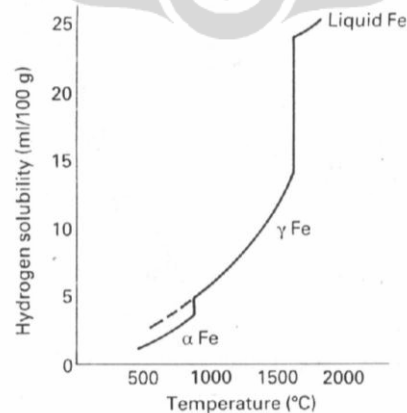
2.1.2.1 Kadar Hidrogen

Selama pengelasan, hidrogen diserap oleh *weld pool* dari *arc atmosphere*. Selama pendinginan, sebagian besar hidrogen keluar dari kampuh yang membeku dengan cara difusi tetapi sebagian juga berdifusi ke HAZ dan logam induk. Difusi hidrogen dari logam las ke HAZ selama pengelasan ditunjukkan secara skematis pada Gambar 2.4.



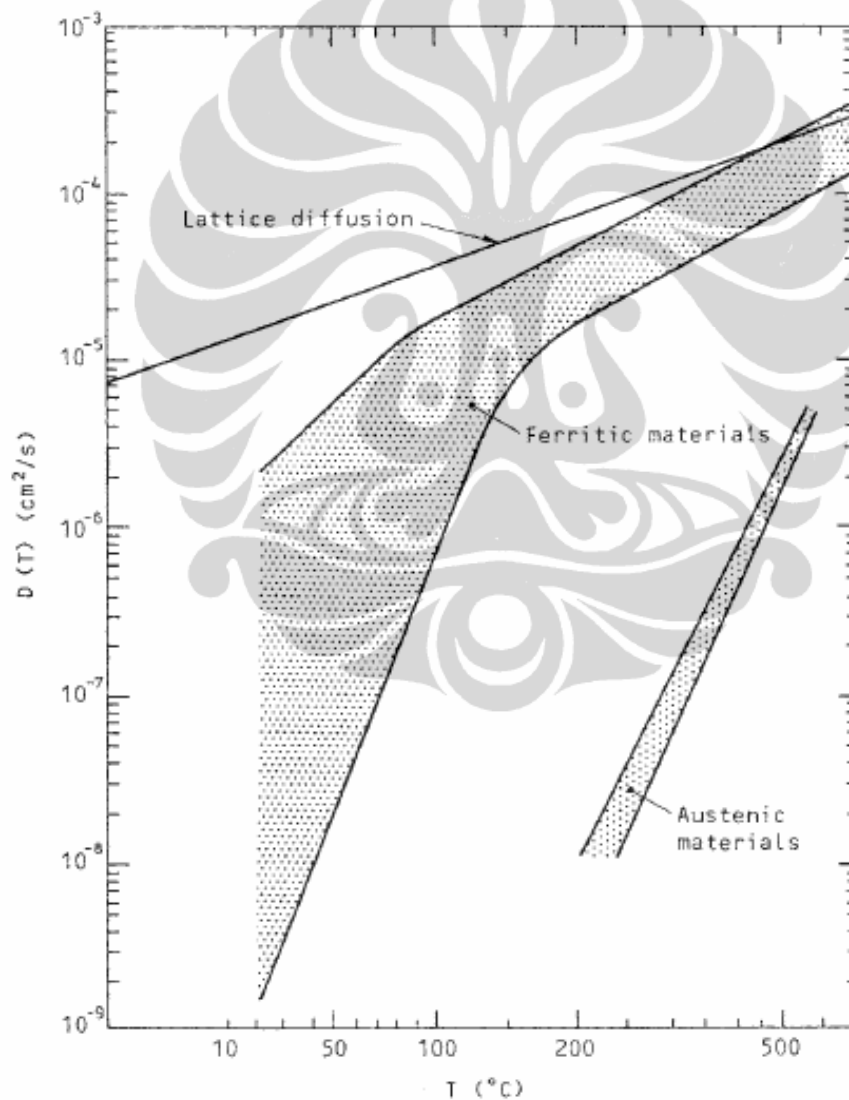
Gambar 2.4 Difusi Hidrogen dari Logam Las ke HAZ Selama Pengelasan [7]

Kelarutan hidrogen pada logam las akan menurun seiring dengan penurunan temperatur seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Dari gambar tersebut, tampak kelarutan hidrogen turun drastis dari *liquid steel* seiring dengan pendinginan. Ketika baja bertransformasi ke ferit, kelarutan hidrogen kembali turun tajam hingga mencapai kadar yang rendah.



Gambar 2.5 Kelarutan Hidrogen pada Logam Las Berkurang Seiring Penurunan Temperatur [10]

Untuk memahami bagaimana hidrogen keluar dari baja pada saat pendinginan, perlu dipahami laju difusi hidrogen pada baja terhadap variasi temperatur seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6. Dari gambar tersebut, tampak bahwa laju difusi hidrogen lebih lambat pada austenit dibandingkan pada ferit. Laju difusi pada austenit di bawah temperatur 500°C sama dengan laju difusi ferit pada temperatur batas (*ambient temperature*) dimana laju difusinya sangat lambat. Pada temperatur di bawah 200°C, laju difusi ferit mulai berdeviasi di bawah garis teoretis untuk *lattice diffusion*.

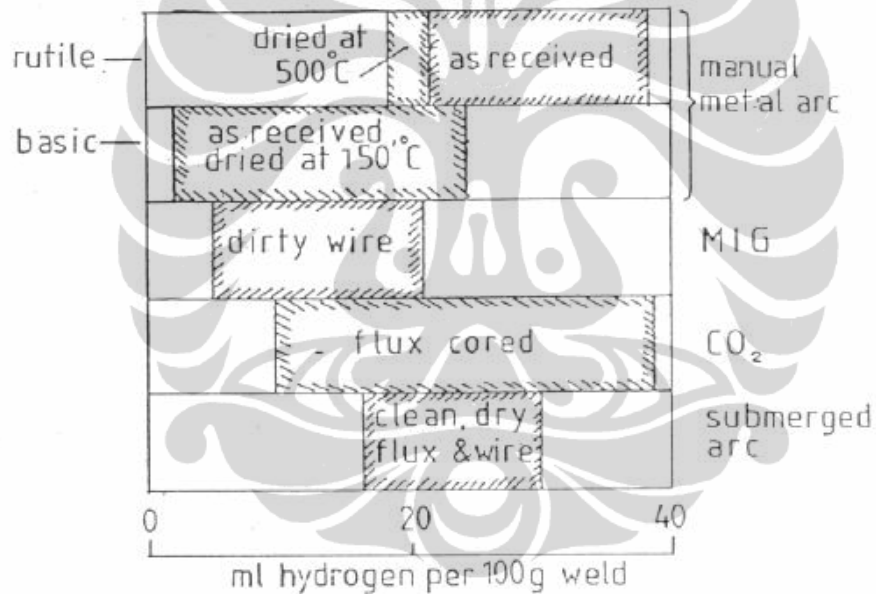


Gambar 2.6 Variasi Koefisien Difusivitas Hidrogen pada Baja Terhadap Temperatur^[11]

Pada pengelasan, kandungan hidrogen dapat berasal dari *welding consumable* maupun dari material yang akan dilas. Beberapa kondisi yang berpengaruh terhadap munculnya hidrogen dari *welding consumable* sebagai berikut ^[10]:

- Kelembaban pada pelapisan elektroda dari *manual metal arc*, pada fluks yang digunakan pada las SAW atau pada *flux-cored wires*.
- Senyawa yang mengandung hidrogen pada pelapisan (*coating*) atau fluks.
- Oli, kotoran dan gemuk (*grease*) pada permukaan kawat las
- Karat permukaan kawat las

Pengaruh proses pengelasan, kebersihan dan pengeringan elektroda terhadap penyerapan hidrogen pada logam las ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hidrogen Logam Las Sebagai Fungsi Variabel Proses ^[7]

Kandungan hidrogen yang bersumber dari material yang akan dilas adalah sebagai berikut ^[10] :

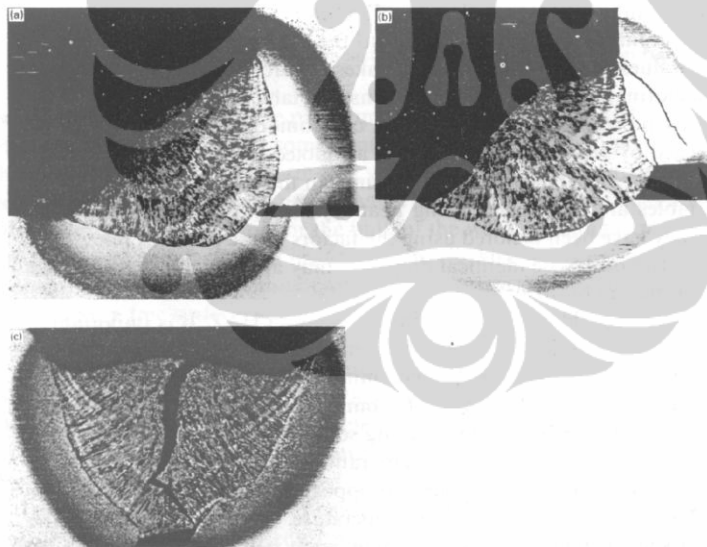
- Oli, kotoran, cat, karat pada permukaan material
- Fluida pembersih *grease* yang digunakan untuk membersihkan material selama persiapan pengelasan
- Hidrogen dari logam induk seperti sisa dari proses pengecoran

2.1.2.2 Tegangan Sisa

Tegangan sisa merupakan tegangan yang tetap berada dalam suatu struktur sebagai akibat adanya perlakuan termal atau perlakuan mekanik atau keduanya.

Tegangan yang ditimbulkan pada material yang mengalami pengelasan disebabkan utamanya oleh kontraksi dari logam cair yang membeku. Tegangan sisa pada daerah lasan mempunyai dua efek utama yaitu menghasilkan distorsi dan menghasilkan kegagalan prematur dari daerah lasan ^[6].

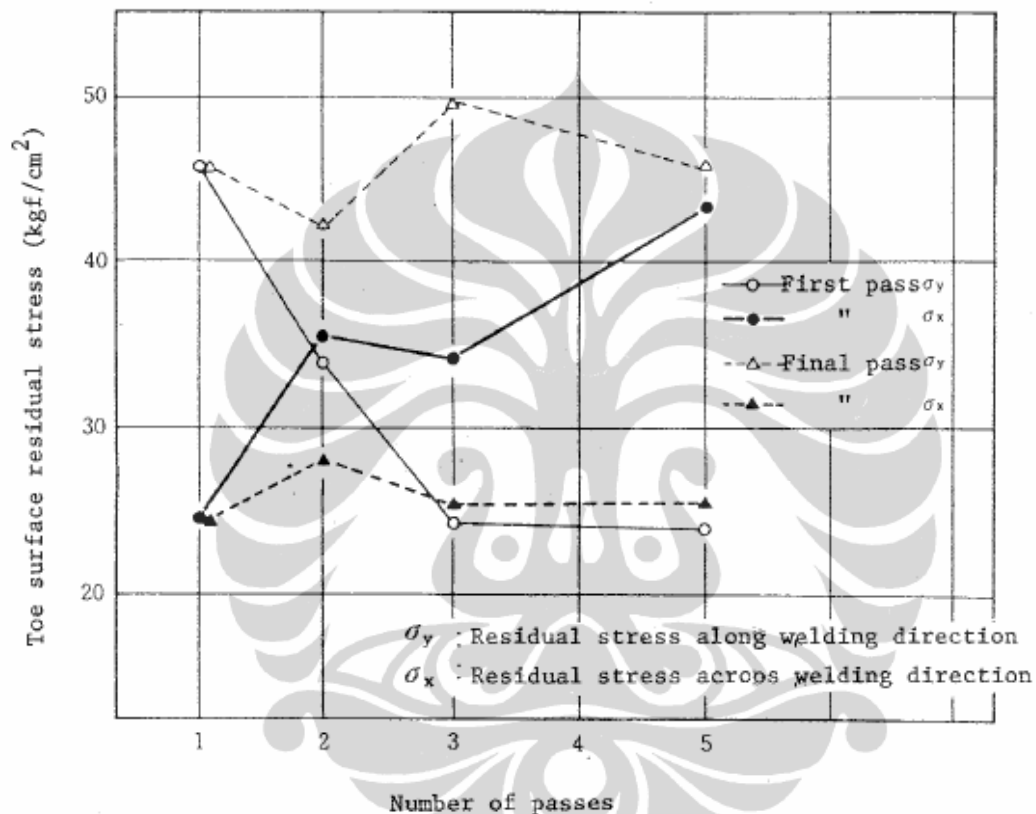
Tegangan sisa pada logam las atau kampuh las, seringkali terjadi hingga mencapai kekuatan *yield* logam las ^[11]. Tegangan sisa menjadi gaya pemicu untuk terjadinya *cold cracking*. Tegangan sisa dapat meningkat karena adanya konsentrasi tegangan yang berasal dari bentuk *root gap*, *undercut*, dan cacat pada *weld toe*. Pengaruh kondisi konsentrasi tegangan terhadap retak dingin ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pengaruh Konsentrasi Tegangan pada Retak Dingin

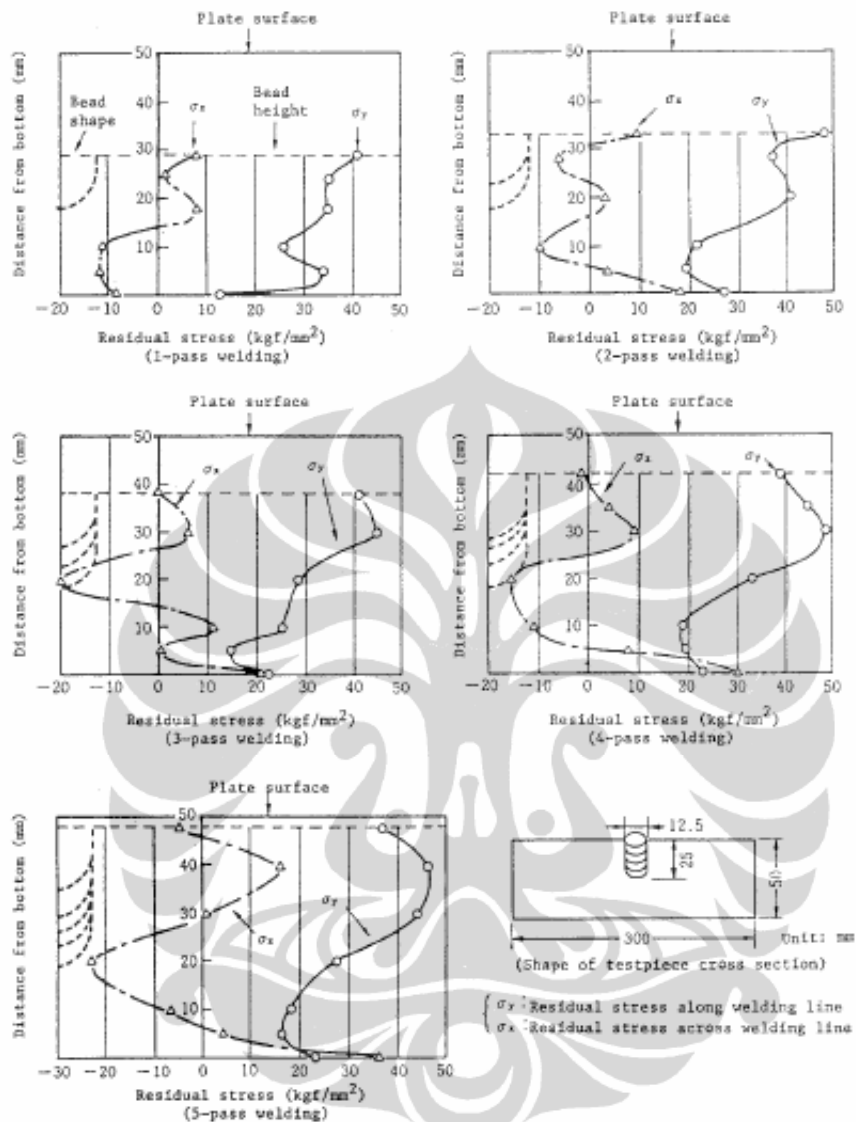
Pada pengelasan *multipass* ^[3], tegangan sisa pada arah longitudinal dan arah transversal daerah lasan dipengaruhi jumlah *pass* yang digunakan. Pengaruh jumlah *pass* terhadap tegangan sisa pada pengelasan multi pass ditunjukkan pada Gambar

2.9. Dari gambar tersebut, tampak bahwa tegangan sisa pada arah longitudinal akan kecil pada *pass* pertama dan akan meningkat pada akhir *pass*. Sedangkan tegangan sisa pada arah transversal akan besar pada *pass* pertama dan menurun pada akhir *pass*.



Gambar 2.9 Pengaruh Jumlah *Welding Pass* pada Tegangan Sisa ^[3]

Pengaruh pengelasan multipass terhadap distribusi tegangan sisa pada tiap ketebalan pelat ditunjukkan pada Gambar 2.10. Dari gambar ini, diketahui bahwa tegangan sisa arah longitudinal maupun tegangan sisa arah transversal pada *weld root* akan meningkat dengan penambahan jumlah *pass* lasan.



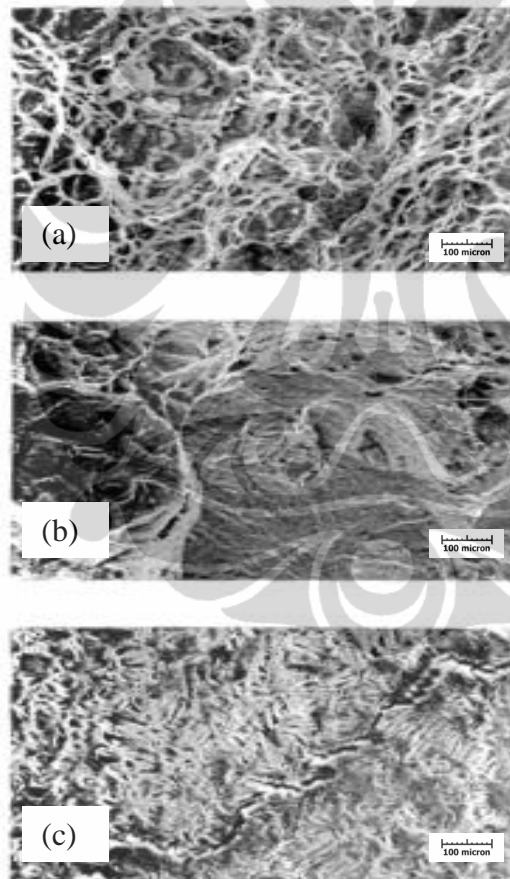
Gambar 2.10 Distribusi Tegangan Sisa Terhadap Ketebalan Pelat pada Pengelasan *Multipass* [3]

2.1.2.3 Struktur Mikro

Pada umumnya ditemukan bahwa permulaan retak dingin pada daerah pertumbuhan butir HAZ. Peningkatan ukuran butir secara efektif menurunkan temperatur transformasi sehingga pada baja dengan karbon ekuivalen tinggi volume fraksi produk transformasi temperatur rendah meningkat seperti martensit, bainit atau *Widmanstatten side plate* [7]. Kerapatan dislokasi yang tinggi pada produk tersebut dan

partikel karbida halus menghasilkan matriks yang memiliki keuletan rendah dan keras.

Pada spesimen yang mengandung kadar hidrogen lebih tinggi, fenomena yang dikenal sebagai “*fish eye*” kadangkala ditemukan pada permukaan patahan. Hal ini menginterpretasikan sebagai pusat area sirkular patahan *quasi-cleavage* pada inklusi yang besar (misalnya MnS) atau kumpulan inklusi kecil (misalnya partikel silikat atau Al_2O_3) [7]. Perbandingan permukaan patahan sebelum dan sesudah bermuatan hidrogen dan lintasan patahan yang menunjukkan campuran patahan cleavage dan patahan ulet ditunjukkan pada Gambar 2.11.



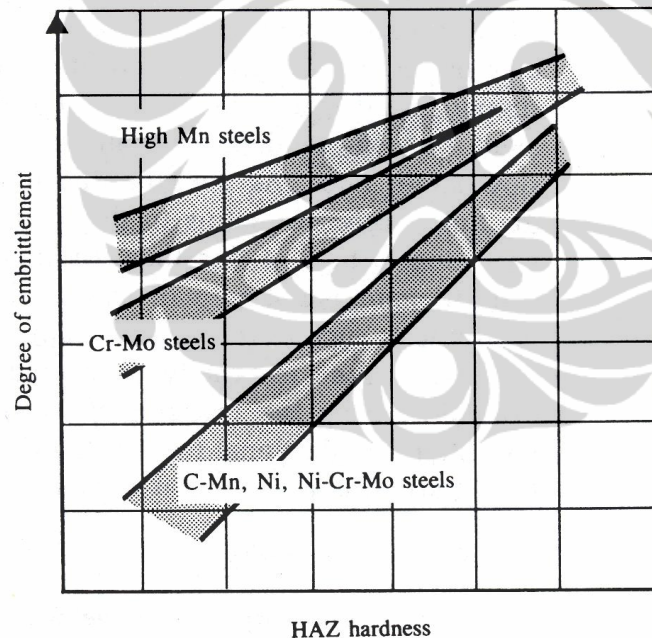
Gambar 2.11 Perbandingan antara Karakteristik Patahan Baja Bainit [7]

- (a) Permukaan Patahan Sebelum Bermuatan Hidrogen
- (b) Permukaan Patahan Setelah Bermuatan Hidrogen
- (c) Lintasan Zig-Zag Patahan *Cleavage*

Struktur mikro yang dipertimbangkan sebagai sensitif terhadap retak dingin memiliki ciri-ciri sebagai berikut ^[7]:

- Butirnya keras biasanya mengandung martensit atau bainit
- Ukuran butir *prior-austenite* kasar.
- Inklusi *slag*, atau partikel karbida kasar yang berada pada batas butir
- Kerapatan dislokasi tinggi

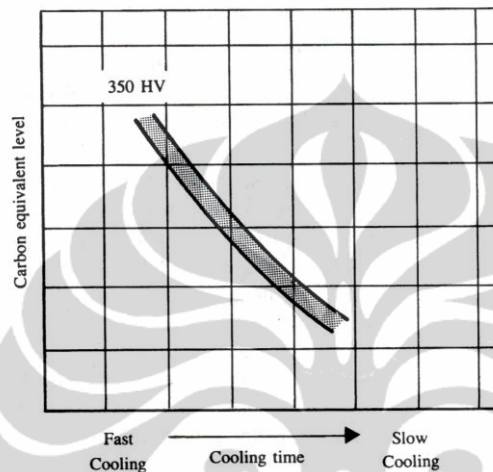
Pengerasan yang terjadi pada daerah HAZ disebabkan pemanasan dan pendinginan secara cepat selama proses pengelasan. Struktur mikro yang lebih keras memiliki resiko besar terhadap terjadinya retak dingin. Struktur mikro yang lunak dapat lebih toleran terhadap hidrogen dibanding struktur mikro yang keras. Hubungan kekerasan pada daerah HAZ dan derajat *embrittlement* ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Hubungan Kekerasan Daerah HAZ dan Derajat *Embrittlement* pada Beberapa Tipe Baja ^[10]

Struktur mikro yang dihasilkan pada beberapa baja dipengaruhi beberapa faktor yaitu : (i) laju pendinginan, (ii) komposisi kimia, (iii) kemampukerasan baja

dan (iv) ukuran butir (*prior austenit*) sebelum transformasi ^[10]. Laju pendinginan dipengaruhi oleh panas yang disuplai selama pengelasan, temperatur awal komponen yang akan dilas, ketebalan pelat dan geometrinya. Pada Gambar 2.13, ditunjukkan kekerasan struktur mikro tergantung pada laju pendinginan lasan untuk beberapa komposisi baja.



Gambar 2.13 Kekerasan Struktur Mikro Tergantung pada Laju Pendinginan Lasan ^[10]

Kemampukerasan baja dipengaruhi oleh komposisi kimianya. Cara untuk mendeskripsikan hubungan kemampukerasan dengan elemen pendukungnya dengan menggunakan cara empiris yang didefinisikan sebagai karbon ekuivalen (CE). Rumus karbon ekuivalen dapat dilihat pada persamaan 2.1 ^[10].

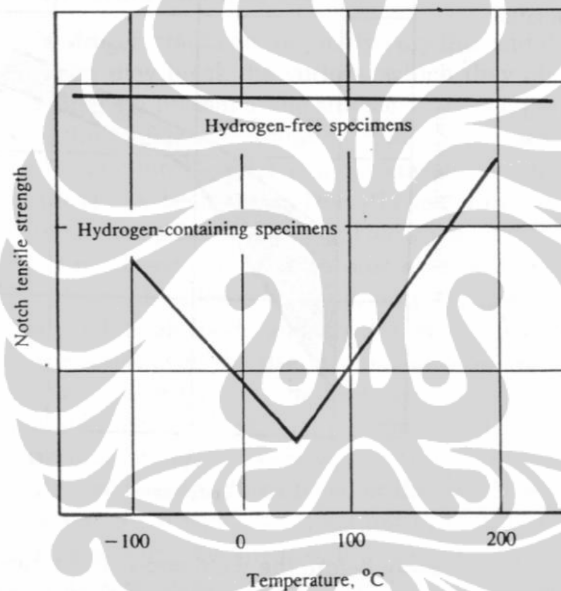
$$CE = C + (Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad [2.1]$$

Untuk baja yang mengandung karbon rendah, telah karbon ekuivalen dirumuskan berupa Pcm (*Composition Parameter*) yang dinyatakan pada persamaan 2.2 ^[10]:

$$Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/12 + V/10 + 5B \quad [2.2]$$

2.1.2.4 Temperatur

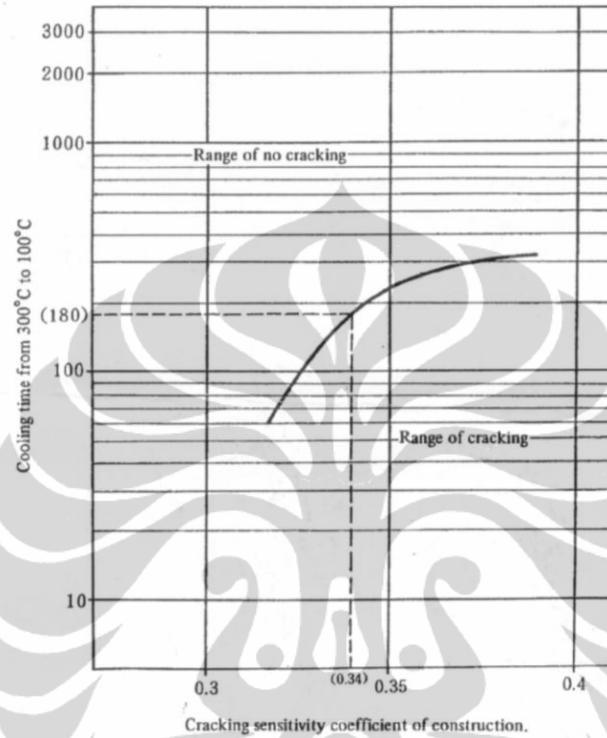
Hidrogen *embrittlement* pada baja terjadi pada temperatur rendah, mendekati temperatur *ambient*. Pengaruh temperatur terhadap hidrogen embrittlement ditunjukkan pada Gambar 2.14. Dari gambar tersebut, tampak bahwa *embrittlement* terjadi dari temperatur 200°C hingga temperatur di bawah -100°C. Untuk baja yang memiliki HAZ sangat sensitif terhadap *embrittlement*, retak dingin dapat terjadi pada temperatur 190°C, meskipun kandungan hidrogen pada tingkat yang sangat rendah seperti pada pengelasan TIG ^[11].



Gambar 2.14 Pengaruh Temperatur pada Hidrogen *Embrittlement* dari Simulasi Material HAZ Hasil dari *Notched Tensile Strength Test* ^[10]

Temperatur yang sering diperhitungkan dalam laju pendinginan adalah temperatur dari 800°C hingga 500°C yang mana dalam kisaran temperatur tersebut terjadi transformasi HAZ baja yang mengandung C dan C:Mn pada pendinginan dari austenit. Waktu pendinginan, $T_{800-500}$ atau $T_{8/5}$, sering digunakan ketika transformasi baja terutama daerah HAZ lasan dipertimbangkan. Untuk pendinginan pada temperatur rendah yang mana pada temperatur tersebut hidrogen keluar dari area lasan, sering digunakan waktu pendinginan $T_{300-100}$ atau $T_{3/1}$ ^[11]. Pada Gambar 2.15, ditunjukkan hubungan antara waktu pendinginan dari temperatur 300°C hingga 100°C

terhadap koefisien sensitivitas retak (P_w). Berdasarkan grafik pada gambar tersebut, dapat diketahui temperatur kritis yang diperlukan sehingga tidak terjadi retak.



Gambar 2.15 Hubungan Temperatur Pendinginan ($T_{300-100}$) terhadap Koefisien Sensitivitas Retak (P_w)^[12]

Nilai koefisien sensitivitas retak (P_w) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.3^[12].

$$P_w = P_{CM} + P_H + P_K \quad [2.3]$$

$$P_H = H/60 \quad [2.4]$$

$$P_K = K/40000 \quad [2.5]$$

P_H = parameter yang berkaitan dengan difusi hidrogen, nilai difusi hidrogen mengacu pada Gambar 2.16

P_K = parameter yang berkaitan dengan *degree of restraint*

K = *degree of restraint*

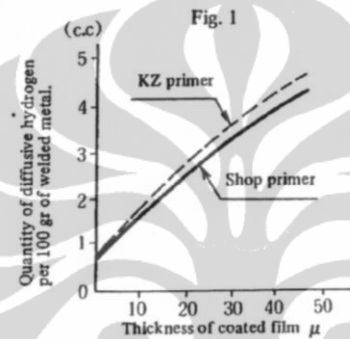
$$= \alpha h$$

h = ketebalan sambungan

$\alpha = 70$, untuk sambungan yang sulit berdeformasi

$\alpha = 40$, untuk sambungan umum

Values of H		unit: cc/100 gr-Fe-JIS
Surface of clean mother materials		Coated surface of mother materials
CO_2 welding	Manual welding of low-hydrogen series	Obtained from fig. 1
0.6	4	



Gambar 2.16 Nilai Difusi Hidrogen ^[12]

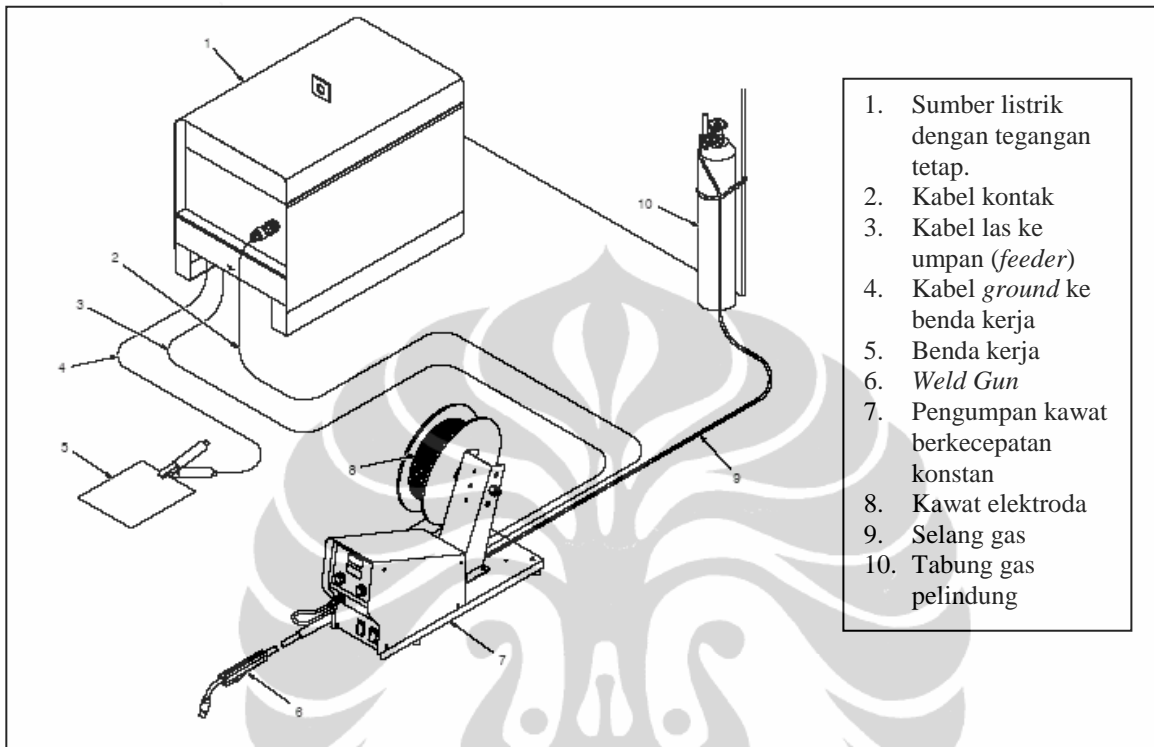
Berdasarkan hubungan koefisien sensitivitas retak dan waktu pendinginan, dapat diperkirakan terjadinya retak pada lasan yaitu jika temperatur pendinginan lebih tinggi dari temperatur pendinginan kritisnya ^[12].

2.2 Gas Metal Arc Welding (GMAW)

Gas Metal Arc Welding (GMAW) ^[13] adalah proses pengelasan logam di mana logam yang akan disambung terlebih dahulu dicairkan melewati titik leburnya (*melting point*) oleh busur listrik.

Pengelasan GMAW dapat dilakukan dengan cara semi otomatis, mesin dan otomatis. Dengan cara semi otomatis, peralatan las hanya mengendalikan pengumpanan (*feeding*) dari kawat elektroda, sementara pergerakan dari *weld gun* dikendalikan oleh tangan operator. Skema dari peralatan las dengan cara semi otomatis ditunjukkan oleh Gambar 2.17. Dengan cara mesin (*machine welding*), peralatan las dipakai untuk mengendalikan *weld gun*, sementara parameter lasnya

diatur oleh operator. Dengan cara otomatis, peralatan las mengendalikan seluruh proses pengelasan dengan memakai sensor untuk mengendalikan jalan dari *weld gun*.



Gambar 2.17. Skema Peralatan Las Semi Otomatis

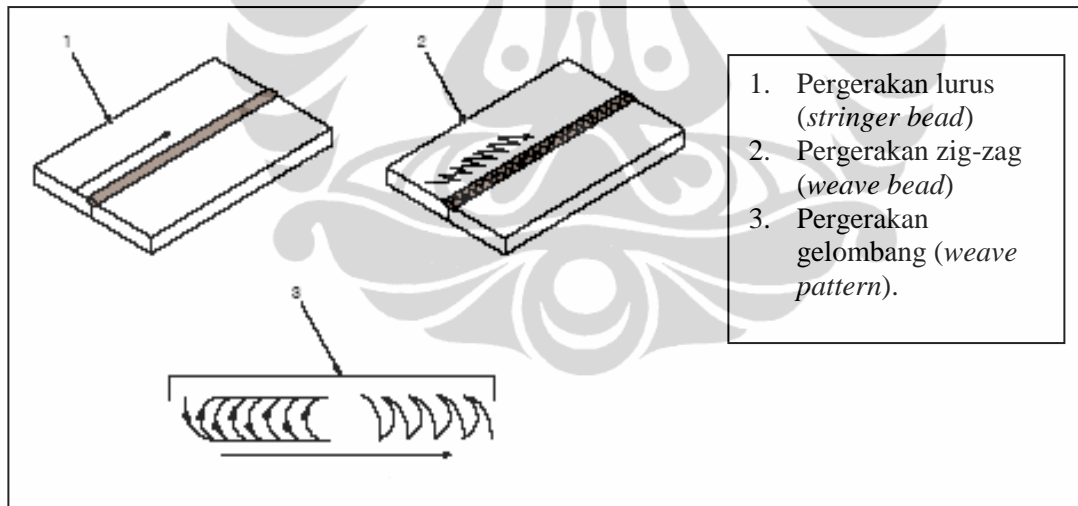
Besarnya arus listrik yang diberikan berbanding lurus dengan ketebalan benda kerja, dalam hal ini lembaran baja, dengan besarnya arus listrik adalah 1 Ampere untuk setiap 0,001 inci ketebalan benda kerja.

Pengaruh besarnya diameter kawat dengan besarnya arus listrik dan kecepatan umpan kawat elektroda ditunjukkan oleh Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Besarnya Ukuran Diameter Kawat Las dengan Besar Arus Listrik dan Kecepatan Umpan Kawat Elektroda^[13]

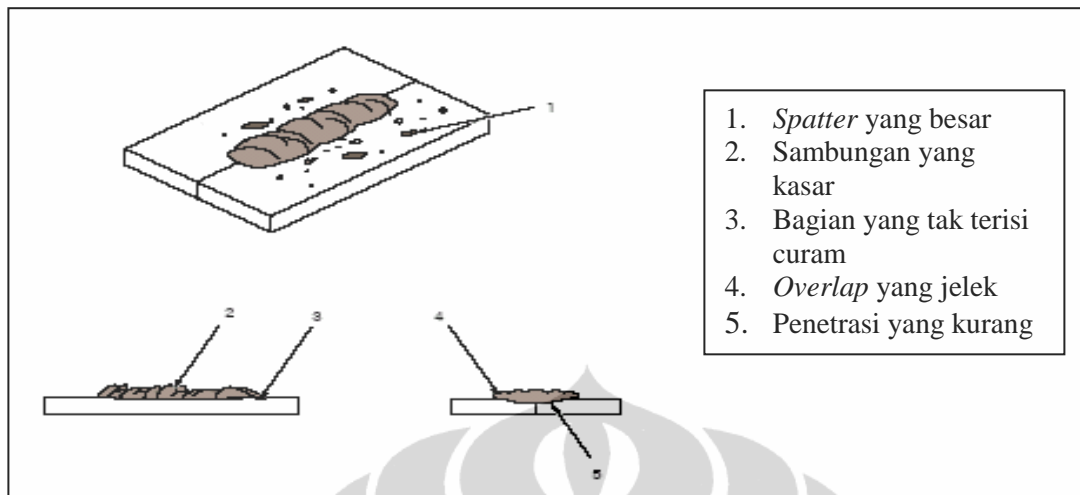
Ukuran Diameter Kawat Las (milimeter)	Besar Arus Listrik (Ampere)	Kecepatan Umpan Kawat (inci per menit)
0,7	40 – 145	50 x Besar Arus Listrik
0,8	50 – 180	40 x Besar Arus Listrik
1,2	75 – 250	25 x Besar Arus Listrik

Pergerakan *weld gun* pada pengelasan GMAW terdiri dari 3 macam, yaitu pergerakan lurus (*stringer bead*), zig-zag (*weave bead*), dan gelombang (*weave pattern*). Pergerakan lurus umumnya dipakai pada sambungan dengan *groove* (alur) yang sempit. Sementara itu, pergerakan zig-zag dipakai pada sambungan dengan *groove* lebar. Ketiga macam pergerakan tersebut digambarkan secara skematis pada Gambar 2.18.



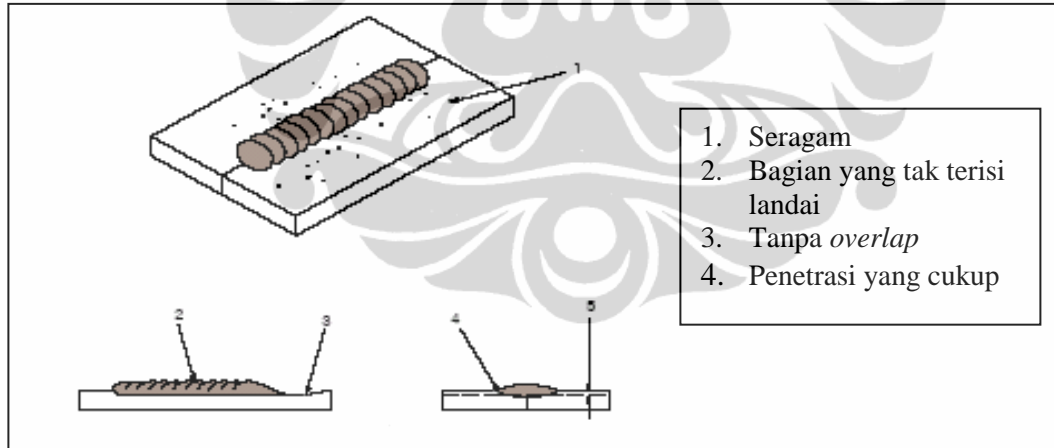
Gambar 2.18 Skema Pergerakan *Weld Gun*

Hasil sambungan (*weld bead*) yang buruk biasanya ditandai oleh percikan logam (*spatter*) yang besar, sambungan yang kasar, bagian yang tidak terisi curam, *overlap* yang jelek dan penetrasi yang kurang. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Karakteristik dari Sambungan (*Weld Bead*) yang Buruk

Hasil sambungan (*weld bead*) yang baik ditandai oleh percikan logam (*spatter*) yang halus, sambungan yang seragam, bagian yang tidak terisi landai, tanpa *overlap* dan penetrasi yang cukup ke dalam logam induk. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 2.20.



Gambar 2.20. Karakteristik dari Sambungan (*Weld Bead*) yang Baik

Berbagai macam kandungan dari gas pelindung (*shielding gas*) dan penggunaannya yang dipakai pada pengelasan GMAW ditunjukkan oleh Tabel 2.2. Adapun variasi dari campuran gas-gas tersebut telah berkembang beberapa tahun belakangan ini.

Tabel 2.2. Kandungan Gas Pelindung dan Pemakaiannya pada Pengelasan GMAW

Gas	<i>Spray Arc</i>	<i>Short Circuit</i>	<i>Spray Arc</i>	<i>Short Circuit</i>	<i>Spray Arc</i>	<i>Short Circuit</i>
	Baja	Baja	Baja Stainless	Baja Stainless	Aluminum	Aluminum
Argon	--	--	--	--	Semua Posisi ⁵	Semua Posisi
Argon + 1 % O ₂	<i>Fillet Datar & Horizontal</i> ⁵	--	<i>Fillet Datar & Horizontal</i> ⁵	--	--	--
Argon + 2 % O ₂	<i>Fillet Datar & Horizontal</i> ⁵	--	<i>Fillet Datar & Horizontal</i> ⁵	--	--	--
Argon + 5 % O ₂	<i>Fillet Datar & Horizontal</i> ⁵	--	--	--	--	--
Argon + 8 % CO ₂	<i>Fillet Datar & Horizontal</i> ⁵	Semua Posisi	--	--	--	--
Argon + 25 % CO ₂	<i>Fillet Datar & Horizontal</i> ¹	Semua Posisi	--	Semua Posisi ³	--	--
Argon + 50 % CO ₂	--	Semua Posisi	--	--	--	--
CO ₂	<i>Fillet Datar & Horizontal</i> ¹	Semua Posisi	--	--	--	--
Helium	--	--	--	--	Semua Posisi ²	--
Argon + Helium	--	--	--	--	Semua Posisi ²	--
Tri-Mix ⁴	--	--	--	Semua Posisi	--	--

Keterangan : 1. *Transfer Globular*

2. *Ketebalan besar*

3. *Pengelasan single pass saja*

4. *90% Helium + 7-1/2% Argon + 2-1/2% CO₂*

5. *Juga untuk GMAW – P, semua posisi*

2.3. *High Strength Low Alloy Steel (HSLA)*

Dari sudut pandang mampu las, baja karbon dan baja paduan rendah dapat dikelompokkan atas lima yaitu : baja karbon, *high strength low alloy steel*, *quenched*

and tempered steel, heat treatable low alloy steel dan chromiun-molybdenum steel. Untuk pengelasannya, maka ada tiga faktor yang harus diketahui sebelum dilas yaitu : komposisi kimia, sifat mekanis dan kondisi perlakuan panas.

Secara umum, baja karbon merupakan material dengan bahan dasar Fe dengan kandungan karbon (C) maksimum 2 % serta mengandung unsur pengikat (Si, P, S, Mn) dan unsur paduan (Cr, Ni, Mo, dan lain-lain). *High Strength Low Alloy Steel* (HSLA) atau yang disebut juga *microalloyed steels* merupakan salah satu jenis baja karbon paduan rendah yang memiliki kekuatan tinggi (*high strength*) dibanding baja karbon dimana kekuatan *yield* minimumnya adalah 275 ~ 550 MPa ^[11]. Meskipun HSLA memiliki kandungan karbon yang relatif rendah (<0.3 %), namun berkurangnya kekuatan karena penurunan kadar karbon dikompensasi dengan kenaikan kadar Mangan (>1%). Selain itu, HSLA juga mengandung unsur lain dalam jumlah yang sangat sedikit (maksimum 0,1 %) yaitu Nb, V, Ti, Cr, dan Cu. Baja HSLA digunakan terutama dalam kondisi *as rolled* atau *normalized*. Penguatan baja HSLA disebabkan oleh kombinasi penghalusan butir ferit, *precipitation hardening* dan *structural strengthening*. Baja HSLA digunakan pada *pipelines, buildings, bridges, offshore structures, construction equipment and machinery, railroad equipment, automobile dan truck frame*.

Pada umumnya, kemampuan HSLA hampir sama dengan baja karbon struktural *mild steel* ^[6]. Pada pengelasan material HSLA, meskipun kekuatan menjadi faktor dominan dari aplikasi material HSLA, namun logam pengisi (*filler metal*) sering dipilih disesuaikan dengan kekuatan logam induknya (HSLA) ^[11]. Selain itu, sering pula digunakan *low hydrogen consumable* pada proses pengelasan material HSLA.

Persyaratan *preheat* tergantung pada jenis baja HSLA, logam pengisi dan proses las. Berdasarkan *the Structure Welding Code-Steel* (ANSI/AWS D1.1) *pre heat* tergantung pada ketebalan, karbon ekuivalen dan proses las yang digunakan. *Preheat* berfungsi untuk mengontrol laju pendinginan logam las yang dapat mengurangi atau menghindari terbentuknya martensit pada HAZ, mengurangi

welding stress dan membantu mengevolusikan hidrogen dari weld (logam las). Rekomendasi temperatur preheat dapat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Rekomendasi Temperatur *Preheat* ^[14]

Type of steel	Specification	Plate thickness (mm)	Temperature (°C) 1)
Mild steel	Bridge and high-way	$t < 25$	not specified 2), 3)
		$25 \leq t < 38$	40 ~ 60
		$38 \leq t < 50$	40 ~ 60
490 N/mm ² class high strength steel	Bridge and high-way	$t < 25$	not specified 2)
		$25 \leq t < 38$	40 ~ 60
		$38 \leq t < 50$	80 ~ 100
540, 590 N/mm ² class high strength steel	Bridge and high-way	$t < 25$	40 ~ 60
		$25 \leq t < 38$	80 ~ 100
		$38 \leq t < 50$	80 ~ 100
780 N/mm ² class high strength steel	AWS AISC AASHO	$t \leq 19$	≥ 10
		$19 < t \leq 38$	≥ 50
		$38 \leq t < 63.5$	≥ 80
		$63.5 \leq t$	≥ 110