

keseluruhan dari atom-atom tadi disebut sebagai difusi dengan mekanisme kekosongan. Hal ini dapat disebabkan oleh karena faktor-faktor sebagai berikut :

1. terdapat adanya kekosongan atau cacat kristal lainnya pada sisi kristalnya
2. memiliki energi aktivasi yang cukup
3. fraksi jari-jari atom, di mana perbedaan antara ukuran atom terlarut dan pelarut adalah kurang dari 15 %.

Pada peristiwa difusi, berlaku Hukum Ficks I dan II yang dijelaskan sebagai berikut:

- Hukum Ficks I

Hukum ini berbunyi: “laju difusi berbanding lurus dengan gradien konsentrasinya”^[3]. Kondisi dari hukum ini adalah tanpa adanya perubahan konsentrasi akibat pengaruh waktu difusi, sehingga pemakaiannya terbatas pada difusi *steady state* (dengan konsentrasi yang dianggap sama pada

setiap posisi), atau $\frac{dc}{dt} = 0$.

$$J = -D \frac{dc}{dx} \dots\dots\dots (2.1),$$

di mana: J : banyaknya atom yang berdifusi

D : koefisien difusi (m²/s)

$\frac{dc}{dx}$: gradien konsentrasi.

- Hukum Ficks II

Hukum Ficks II berbunyi sebagai berikut: “laju difusi tidak hanya bergantung pada gradien konsentrasi saja, tetapi juga dengan waktu ”^[3].

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \dots\dots\dots (2.2),$$

dengan $\frac{dc}{dt}$: perubahan konsentrasi persatuan waktu.

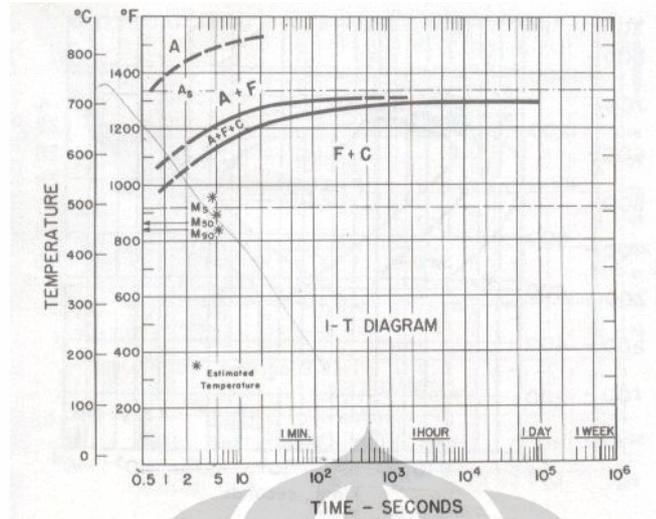
2.2 BAJA KARBON

Baja yang digunakan sebagai sampel pengelasan adalah baja karbon rendah. Kadar karbon dalam baja ini adalah 0,1 %. Pengelompokan baja berdasarkan kadar karbonnya ditunjukkan oleh Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Pengelompokan Baja Karbon^[4]

Jenis dan Kelas		Kadar Karbon (%)	Kekuatan Luluh (MPa)	Kekuatan Tarik (MPa)	Perpanjangan (%)	Kekerasan Brinell	Penggunaan
Baja Karbon Rendah	Baja Lunak Khusus	0,08	180 – 280	320 – 360	40 – 39	95 -100	Plat tipis
	Baja Sangat Lunak	0,08 – 0,12	200 – 290	360 – 420	40 – 30	80 – 120	Batang, kawat
	Baja Lunak	0,12 – 0,20	220 – 300	380 – 480	36 – 24	100 – 130	Konstruksi umum
	Baja Setengah Lunak	0,20 – 0,30	240 – 360	440 – 550	32 – 22	112 – 145	Konstruksi umum
Baja Karbon Sedang	Baja Setengah Keras	0,30 – 0,40	300 – 400	500 – 600	30 – 17	140 – 170	Alat-alat mesin
Baja Karbon Tinggi	Baja Keras	0,40 – 0,50	340 – 460	580 – 700	26 – 14	160 – 200	Perkakas
	Baja Sangat Keras	0,50 – 0,80	360 – 470	650 - 1000	20 – 11	180 – 235	Rel, pegas dan kawat piano

Secara umum, baja karbon rendah memiliki sifat yang sangat baik untuk proses pengelasan. Hal ini dikarenakan pada diagram CCT (Gambar 2.2), baja karbon rendah memiliki hidung yang sangat sempit dan relatif lebih ke kiri, sehingga tidak memudahkan terbentuknya struktur martensit yang getas yang dapat mempengaruhi hasil pengelasan (*low hardenability*).



Gambar 2.2. Diagram CCT baja karbon rendah^[5]

2.3 BAJA KARBON LAPIS SENG

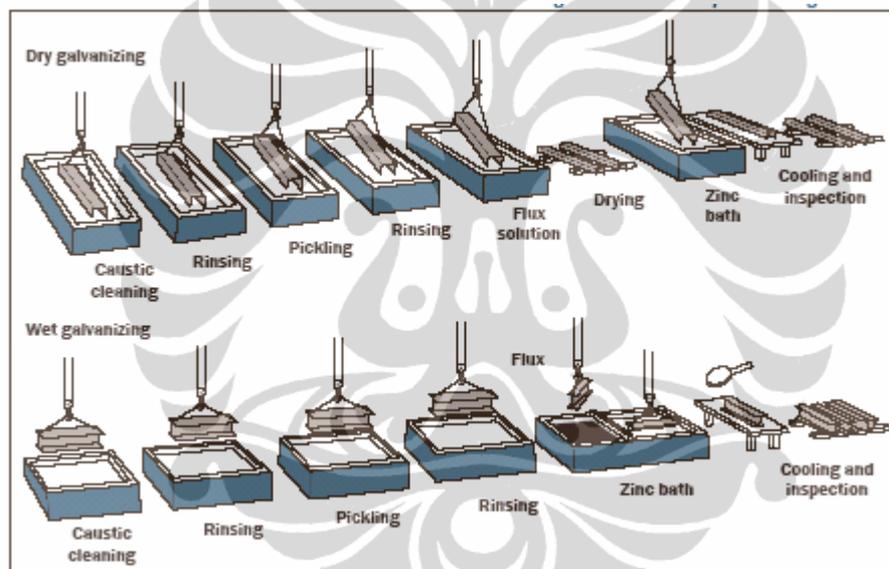
Pelapisan logam dengan seng (*zinc*) memiliki beberapa keunggulan dalam melindungi besi dan baja dari reaksi korosi (karat) pada berbagai jenis keadaan lingkungan. Hal ini disebabkan karena sifatnya yang mudah membentuk lapisan tipis tahan karat yang padat di atas permukaan logam dan laju korosi yang lebih rendah (hampir 100 kali lebih rendah dari logam lainnya). Lapisan tipis seng tersebut terbentuk dengan cepat ketika ia bereaksi dengan oksigen yang terdapat di udara, sehingga dapat melindungi logam induk di bawahnya.^[6]

Selain berfungsi sebagai pembatas antara baja dengan lingkungan, lapisan seng juga berfungsi sebagai pelindung katodik (*cathodic protection*) terhadap logam baja tersebut. Seng memiliki sifat lebih anodik dibandingkan dengan besi dan baja, akan berkarat terlebih dahulu bila lapisan tipisnya rusak, sehingga logam di bawahnya tetap terlindungi.^[6]

Pelapisan seng terhadap logam besi dan baja dapat dilakukan dengan tujuh cara, yaitu dengan metode *Batch Hot Dip Galvanizing*, *Continuous Sheet Galvanizing*, *Electro galvanizing*, *Zinc Plating*, *Mechanical Plating*, *Zinc*

Spraying dan *Zinc Painting*. Metode pelapisan seng *Continuous Sheet Galvanizing* dan *Electrogalvanizing* banyak dipakai untuk melapisi lembaran-lembaran baja. [6]

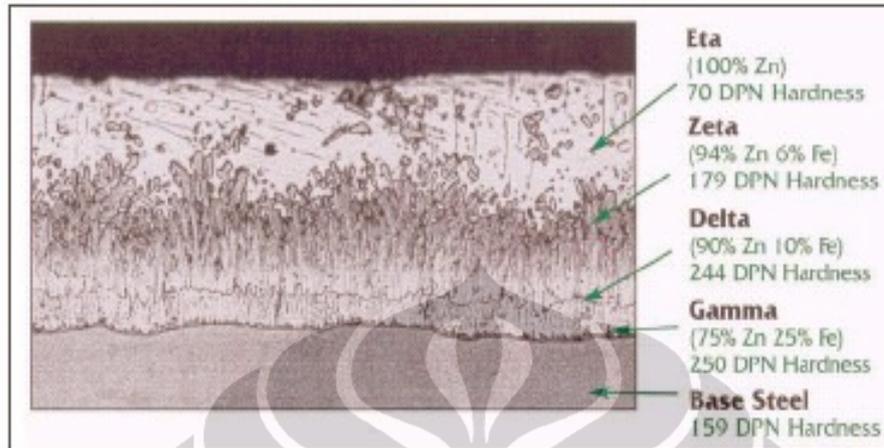
Secara skematis, proses pelapisan lembaran baja dengan metode *Continuous Sheet Galvanizing* ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Proses dimulai dengan membersihkan lembaran tersebut dengan alkalin. Lalu lembaran baja tersebut dimasukkan ke dalam tungku pemanas (*heating furnace*) untuk meningkatkan kekuatan mekanisnya. Setelah itu lembaran baja langsung dicelupkan ke dalam lelehan (*molten*) seng secara berlanjut. Suhu proses pelapisan tersebut adalah sekitar 450°C. [7]



Gambar 2.3. Skema proses pelapisan lembaran baja dengan metode *Continuous Sheet Galvanizing* [6]

Ketebalan lapisan yang dihasilkan melalui proses *Continuous Sheet Galvanizing* dapat mencapai 76 μm . Foto penampang dari lapisan seng dengan metode ini ditunjukkan oleh Gambar 2.4. Fasa intermetalik yang terbentuk dari

proses pelapisan baja (Fe) dengan Seng (Zn) ada 4, yaitu fasa Eta (η), fasa Zeta (ζ), fasa Delta (δ) dan Gamma (γ).



Gambar 2.4. Foto mikro penampang lapisan seng pada baja lembaran dengan metode *Continuous Sheet Galvanizing* ^[6]

Karakteristik dari keempat fasa intermetalik yang terbentuk di atas permukaan baja adalah ^[8]:

- Fasa Eta (η)
Memiliki kandungan seng hampir murni, karena pada suhu lebur seng (420°C) kelarutan Fe maksimumnya hanya 0,02% dan kelarutan Fe pada suhu ruang adalah 0,008%. Struktur kristalnya *Hexagonal Close Packed* (HCP). Kekerasannya mencapai 52 VHN.
- Fasa Zeta (ζ)
Fasa ini mengandung Fe 6,0 – 6,2 %. Stabil pada suhu di bawah $530 - 644^{\circ}\text{C}$. Struktur kristalnya monoklinik dan kekerasannya mencapai 208 VHN.
- Fasa Delta (δ)
Fasa ini mengandung Fe dengan kadar 7 – 12 % dan stabil pada suhu di bawah $620 - 644^{\circ}\text{C}$. Struktur kristalnya *hexagonal* dan kekerasannya mencapai 358 VHN.

- Fasa Gamma (γ)

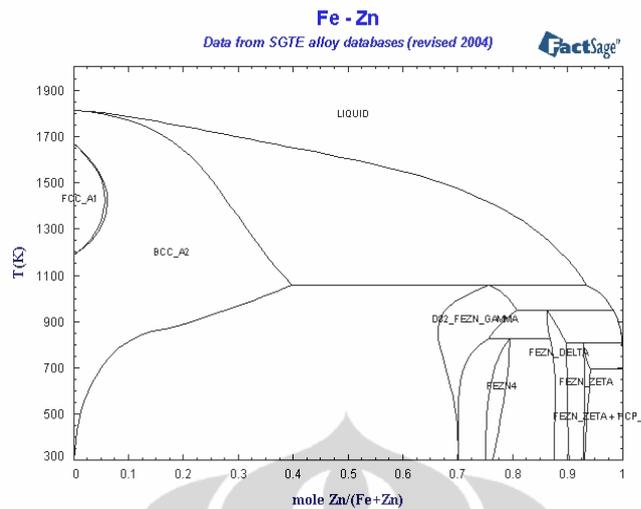
Fasa ini mengandung Fe dengan kadar 20,5 – 29 % dan stabil pada suhu di bawah 668 – 780 °C. Struktur kristalnya *Body Center Cubic* (BCC) dengan kekerasan mencapai 326 VHN.

Proses pelapisan lembaran baja dengan metode *Electro galvanizing* memakai prinsip elektrokimia. Lembaran baja yang berfungsi sebagai katoda dicelupkan ke dalam larutan seng sulfat ($ZnSO_4$). Lempengan timbal dan perak digunakan sebagai anoda. Ion seng dari dalam larutan $ZnSO_4$ kemudian tereduksi menjadi logam seng dan menempel pada lembaran baja. Proses ini biasa ditambahkan dengan larutan kimia lain yang berfungsi memperhalus lapisan seng dan meningkatkan daya rekat dengan lembaran baja. Ketebalan lapisan yang dihasilkan dapat mencapai 3,6 μm .^[6]

2.4 KEMAMPULASAN BAJA KARBON LAPIS SENG

Baja karbon yang dilapisi seng dapat disambung atau dilas dengan metode pengelasan busur listrik.^[9] Contoh dari pengelasan dengan metode busur listrik adalah *Shielded Metal Arc Welding*, *Gas Metal Arc Welding*, *Gas Tungsten Arc Wleding* dan *Plasma Arc Welding*.

Seng pada permukaan baja lapis seng memiliki titik lebur 450 – 460 °C dan titik uap sebesar 906 °C, jauh lebih rendah dari titik lebur baja (1530 °C), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.5. Maka, pada proses pengelasan logam, seng yang ada di bagian atas permukaan logam baja sebagian akan menguap^[11] dan sebagian lagi akan larut ke dalam logam las^[12].



Gambar 2.5. Diagram fasa Fe-Zn^[10]

Karena pada pengelasan baja lapis seng hasil dari *Hot Dip Galvanizing* memiliki ketebalan yang lebih besar dibandingkan dengan hasil dari pelapisan *Elctro galvanizing*, maka uap seng oksida yang dihasilkan akan lebih banyak. Uap seng oksida tersebut akan meninggalkan lubang-lubang (*porosity*) pada daerah lasan.^[9]

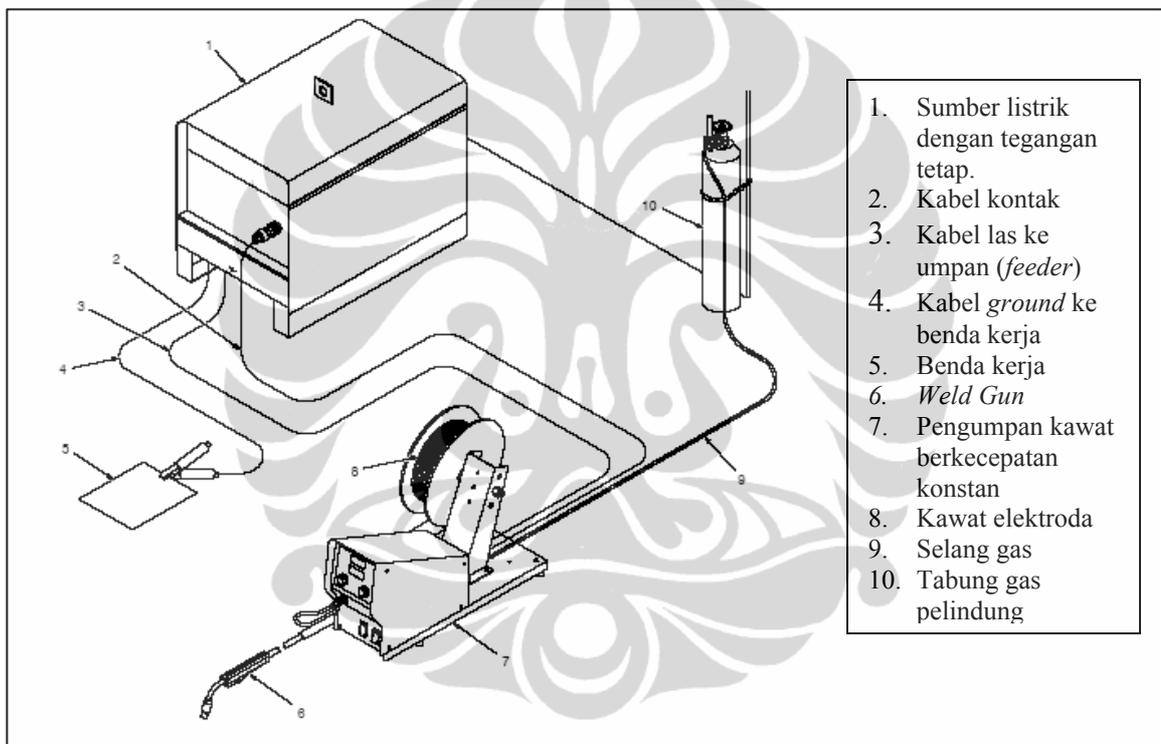
2.5 PENGELASAN BAJA KARBON LAPIS SENGG

Baja karbon yang dilapisi seng dapat disambung atau dilas dengan metode pengelasan busur listrik.^[9] Contoh dari pengelasan dengan metode busur listrik adalah *Shielded Metal Arc Welding*, *Gas Metal Arc Welding*, *Gas Tungsten Arc Welding* dan *Plasma Arc Welding*.

2.5.1 Metode Las *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)¹

Gas Metal Arc Welding (GMAW) 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 2.6. 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 2.6. Skema peralatan las semi otomatis

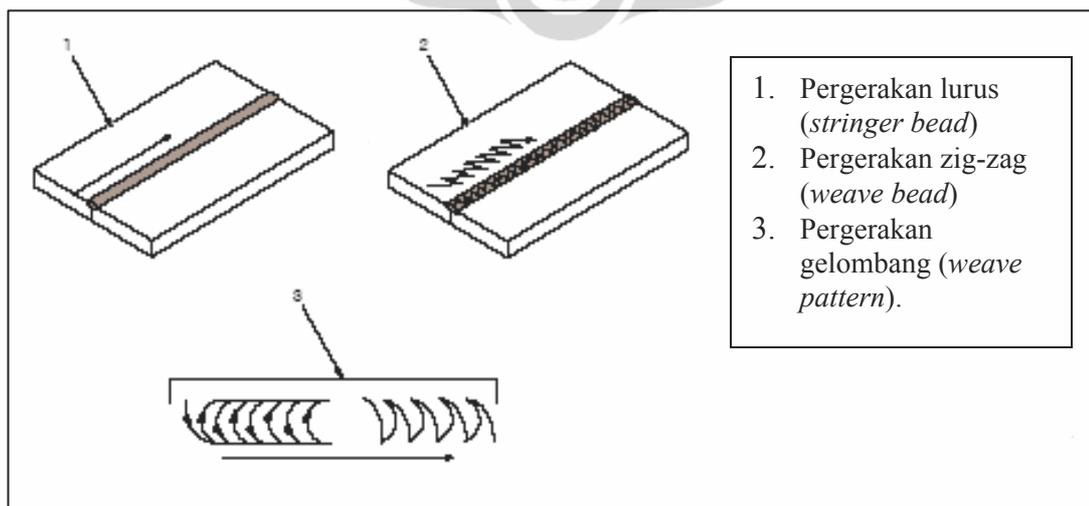
Besarnya arus listrik yang diberikan berbanding lurus dengan ketebalan benda kerja, dalam hal ini lembaran baja, dengan besarnya arus listrik adalah 1 Ampere untuk setiap 0,001 inci ketebalan benda kerja.

Pengaruh besarnya diameter kawat dengan besarnya arus listrik dan kecepatan umpan kawat elektroda ditunjukkan oleh Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Besarnya Ukuran Diameter Kawat Las dengan Besar Arus Listrik dan Kecepatan Umpan Kawat Elektroda^[1]

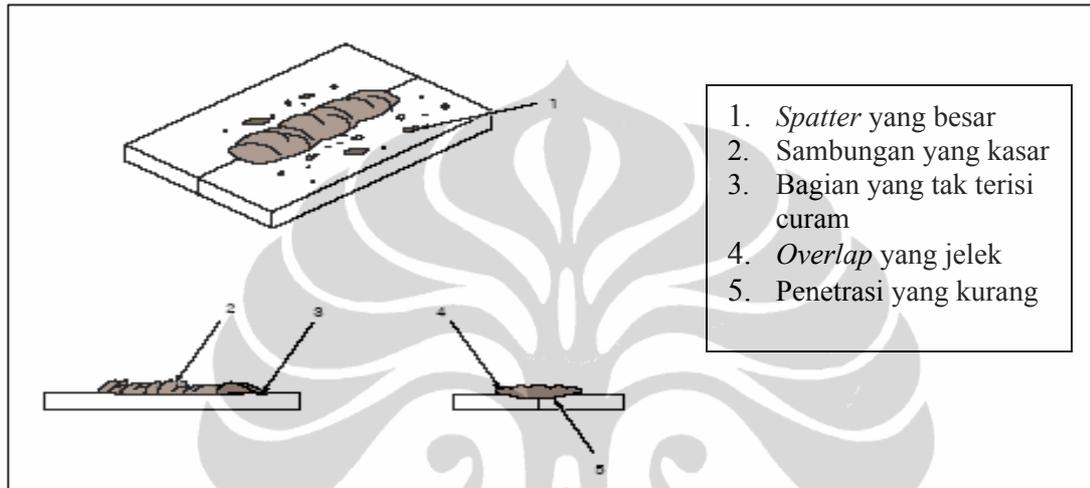
Ukuran Diameter Kawat Las (milimeter)	Besar Arus Listrik (Ampere)	Kecepatan Umpan Kawat (inci per menit)
0,7	40 – 145	50 x Besar Arus Listrik
0,8	50 – 180	40 x Besar Arus Listrik
1,2	75 – 250	25 x Besar Arus Listrik

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 2.7.



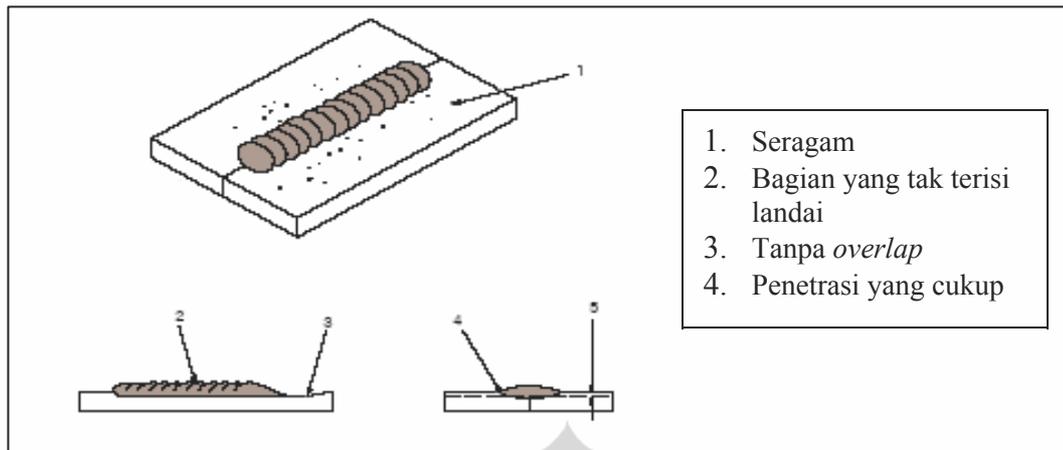
Gambar 2.7 Skema pergerakan *weld gun*

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 2.8.



Gambar 2.8. 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 2.9.



Gambar 2.9. Karakteristik dari sambungan (*weld bead*) yang baik

Bermacam-macam kandungan dari gas pelindung (*shielding gas*) dan penggunaannya yang dipakai pada pengelasan GMAW ditunjukkan oleh Tabel 2.3. Adapun variasi dari campuran gas-gas tersebut telah berkembang beberapa tahun belakangan ini.

Tabel 2.3. 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 %	<i>Fillet Datar &</i>	Semua Posisi	--	--	--	--

CO ₂	Horizontal ⁵					
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. *Trasfer Globular*

2. *Ketebalan besar*

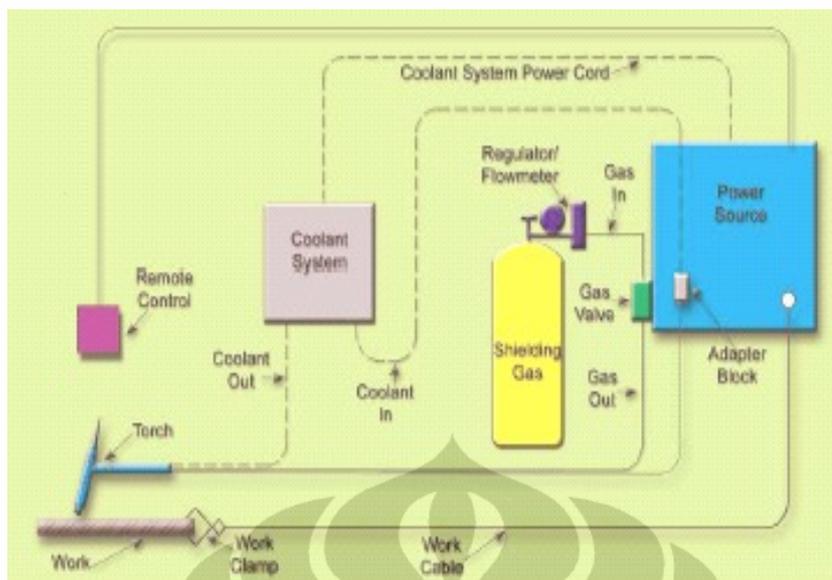
3. *Pengelasan single pass saja*

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

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

2.5.2 Metode Las Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)¹³

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) adalah suatu proses pengelasan logam di mana elektroda yang dipakai adalah paduan logam Tungsten yang bersifat tak habis pakai (*non consumable*), sementara logam pengisinya (*filler*) dimasukkan oleh operator secara manual ataupun dengan mesin pengumpan (*feeder*). Gas pelindung yang bersifat lembam (*inert*) diberikan pada saat proses pengelasan untuk melindungi logam las maupun elektrodanya. Skema sistem peralatan dari pengelasan metode ini ditunjukkan oleh Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Sistem pengelasan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW)

Dalam pemakaian elektroda Tungsten, besarnya arus yang dipakai dan tipe sumber listrik yang dipakai ditunjukkan oleh Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Besar Arus Listrik dan Tipe Sumber Listrik pada Pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan Elektroda Paduan Tungsten (2 % Thorium)

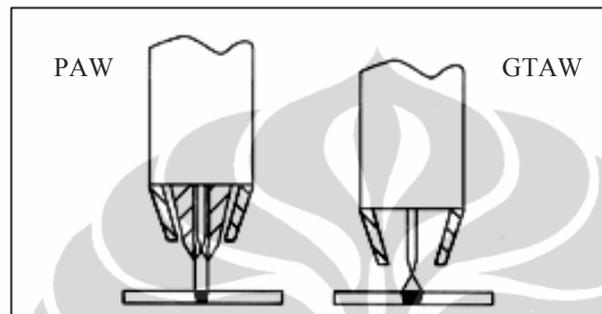
Diameter Elektroda (milimeter)	Besar Arus Listrik – Tipe Gas – Polaritas			
	DC – Argon – Elektroda Negatif Searah	DC – Argon – Elektroda Positif Bolak-balik	AC – Argon – Frekuensi Tinggi	AC – Argon – Gelombang Seimbang Frekuensi Tinggi
1,6	50 – 160	10 – 20	50 – 150	60 – 120
2,4	135 – 235	15 – 30	130 – 250	100 – 160
3,2	250 – 400	25 – 40	225 – 360	160 – 250
4	400 – 500	40 – 55	300 – 450	200 – 320
4,8	500 – 750	55 – 80	400 – 500	290 – 390

2.5.3 Metode Las *Plasma Arc Welding* (PAW)²

Plasma Arc Welding (PAW) adalah pengembangan dari metode pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Metode ini berkembang karena adanya kelemahan dari pengelasan GTAW. Pengelasan dengan metode GTAW memiliki busur listrik yang relatif tidak stabil dan cenderung menyimpang pada

arus listrik yang rendah. Seiring dengan kenaikan besar arus listrik, kekuatan dan diameter dari busur pun akan membesar, sehingga akan memperbesar daerah sambungan dan *Heat Affected Zone* (HAZ).

Metode PAW memakai pipa semprot (*nozzle*) yang mampu mengalirkan dua aliran gas yang berbeda, sehingga mengakibatkan busur plasma yang dihasilkan lebih terfokus dan bentuknya lebih sempit. Perbandingan antara metode GTAW dan PAW ditunjukkan oleh Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Perbandingan Ujung Weld Gun antara Metode PAW dengan GTAW

Kunci dari metode PAW adalah aliran gas yang terbatas melewati pipa semprot gas. Hal ini mengakibatkan kecepatan alir gas dan suhu busur listrik yang terbentuk meningkat. Busur plasma membuat jalur lubang yang menembus benda kerja yang akan disambung. Di belakang lubang tersebut, logam cair mengalir mengisi jalur lubang yang ada akibat gaya gravitasi, tegangan permukaan dan tekanan gas dari gas pelindung.

Kelebihan dari metode PAW adalah kemampuan untuk membuat sambungan *butt* I dalam sekali proses sampai pada ketebalan benda kerja (plat) 8 mm. Kelebihan lainnya adalah adanya batasan distorsi yang dihasilkan sehingga panas yang ada dapat menembus benda kerja dengan efisien.