

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Las Tandem TIG-MIG merupakan suatu terobosan baru dalam bidang pengelasan aluminium sehingga perlu dikembangkan lebih lanjut untuk mendapatkan hasil pengelasan yang optimal. Metode pengelasan tandem TIG-MIG adalah gabungan dari las TIG dan las MIG yang digunakan bersama-sama untuk mendapatkan satu buah *weld pool*. Las TIG berfungsi sebagai *leading wire* yang memiliki beban kerja yang lebih berat karena harus mencairkan logam induk untuk membuat *weld pool*. Las MIG berfungsi sebagai *trail wire* yang mengisi alur *weld pool* dengan elektroda cair dan menghaluskan permukaan *weld pool*, serta mengurangi munculnya *spatter* (Hedegard, 2001). Beberapa penelitian sebelumnya yang telah dilakukan untuk mendapatkan hasil yang optimal dalam pengelasan aluminium menggunakan TIG dan atau MIG dapat ditinjau sebagai berikut :

Haelsig dkk (2012) telah melakukan penelitian tentang *effective efficiency* pada beberapa metode pengelasan yang menggunakan gas pelindung, diantaranya yaitu GTAW (TIG), GMAW (MIG), dan T-GMAW (Tandem MIG-MIG). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh metode pengelasan terhadap *effective efficiency* pengelasan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan *wire feed* atau tegangan las akan menurunkan *effective efficiency* jika dinaikkan. Selain itu hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan bahwa las T-GMAW (Tandem MIG-MIG) mempunyai *effective efficiency* yang lebih besar dari las GMAW (MIG) konvensional.

Kumar dkk (2013) meneliti pengaruh besarnya *heat input* saat proses las GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) terhadap struktur mikro dan nilai kekerasan aluminium paduan AA7079 dengan variasi arus pengelasan. Variasi arus pengelasan yang digunakan oleh Kumar dkk yakni mulai dari 150 A sampai dengan 210 A. Hasil struktur mikro pada penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi arus pengelasan yang digunakan maka semakin besar pula *heat*

*input* sehingga ukuran butir pada bagian *weld metal* menjadi semakin besar. Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai acuan untuk menganalisa hubungan *heat input* yang diterima logam las terhadap kualitas hasil pengelasan berdasarkan sifat fisis yang meliputi struktur mikro pada daerah HAZ dan WM.

Qin dkk (2015) melakukan penelitian tentang Tandem GTAW (Tandem TIG-TIG) pada pelat tipis SS409L. Dalam penelitian ini digunakan variasi arus pengelasan pada kedua elektroda GTAW (TIG). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada jumlah arus yang sama, dengan porsi arus pada *leading wire* lebih besar dibanding *trail wire*, kecepatan las dapat ditingkatkan hingga 1,5 kali lebih cepat tanpa mengurangi sifat mekanis dan struktur mikro pada logam las.

Sproesser dkk (2016) meneliti penggunaan las TGMAG (Tandem MIG-MIG) untuk meningkatkan performa dan efisiensi energi las. Penelitian ini menganalisa nilai *wall plug efficiency* dan *Electrical Deposition Efficiency* (EDE) pada las MIG dan Tandem MIG-MIG. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai EDE maka semakin bagus pula performanya. Performa yang didapat berasal dari analisa nilai *wall plug efficiency* yang digunakan untuk mengetahui total konsumsi energi pengelasan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa efisiensi energi dan performa pengelasan meningkat secara signifikan pada penggunaan las Tandem MIG-MIG.

Oktavian dkk (2016) meneliti tentang pengaruh sudut *torch* las TIG terhadap sifat fisis dan mekanis dengan material AA5083H116. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sudut *torch* 60°, 70°, dan 90°. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi sudut *torch* 60° memiliki sifat mekanis yang terbaik. Namun untuk sifat fisis yang terbaik didapat dari variasi sudut *torch* 90°.

Mudjijana dkk (2017) melakukan penelitian untuk mengetahui karakterisasi pengaruh kecepatan las pada pengelasan MIG (*Metal Inert Gas*) dengan bahan AA5083H116 dan elektroda ER5356. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah kecepatan las dengan variasi 8 mm/s, 10 mm/s dan 12 mm/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan las 10 mm/s menghasilkan logam las

dengan nilai kekuatan tarik, kekuatan *bending* dan efisiensi las paling besar, meskipun memiliki nilai kekerasan paling kecil.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, proses pengelasan Tandem TIG-MIG mempunyai potensi yang baik untuk dikembangkan. Pengembangan yang dapat dilakukan antara lain dengan menemukan parameter yang tepat untuk mendapatkan hasil pengelasan yang optimal berdasarkan sifat fisis dan mekanisnya.. Faktor yang dapat mempengaruhi hasil pengelasan adalah penggunaan parameter yang tepat diantaranya yaitu kecepatan las dan arus pengelasan. Penggunaan parameter yang tepat akan meminimalisir terjadinya cacat pada logam las yang tidak diinginkan. Berdasarkan hasil penelitian diatas maka parameter yang digunakan dalam proses pengelasan Tandem TIG-MIG yaitu kecepatan las dengan asumsi bahwa *heat input* yang dihasilkan oleh las Tandem TIG-MIG lebih tinggi dari las TIG dan MIG konvensional sehingga kecepatan las Tandem TIG-MIG harus lebih tinggi dari kecepatan las TIG dan MIG konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisa pengaruh kecepatan las pada proses pengelasan Tandem TIG-MIG terhadap kualitas hasil pengelasan logam las yang meliputi sifat fisis, sifat mekanis, dan distorsi yang terjadi.

## 2.2 Aluminium

Aluminium (Al) adalah unsur terbanyak ketiga dan merupakan mineral logam yang paling banyak terdapat di permukaan bumi (Smith dan Javad, 1993). Aluminium bersifat reaktif terhadap oksigen sehingga hampir tidak mungkin dapat ditemukan aluminium murni di permukaan bumi. Aluminium akan membentuk senyawa aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) atau biasa disebut alumina. Lapisan alumina yang terbentuk akan melindungi permukaan aluminium yang terpapar oleh oksigen ( $\text{O}_2$ ) dari korosi sehingga aluminium memiliki sifat ketahanan korosi yang baik dalam lingkungan normal (udara dan air tawar) maupun lingkungan khusus (air laut dan petrokimia) (AWS, 2001). Prosentase kandungan unsur yang ada di permukaan bumi dapat dilihat pada Table 2.1.

Tabel 2.1 Unsur-unsur utama di permukaan bumi (Smith dan Javad, 1993)

Unsur	Prosentase (%)
Oksigen (O)	46,6
Silikon (Si)	27,72
Aluminium (Al)	8,13
Besi (Fe)	5,00
Kalsium (Ca)	3,63
Natrium (Na)	2,83
Kalium/Potasium (K)	2,70
Magnesium (Mg)	2,09
Lain-lain	2,30
Jumlah	100

Aluminium ditemukan sebagai unsur pada tahun 1809 oleh Sir Humphrey Davy dan baru dapat direduksi pada tahun 1825 oleh H.C. Oerstad (Surdia dan Saito, 2000). Proses produksi aluminium dalam skala industri dimulai oleh Charles Hall dari USA dan Poul Heroult dari Prancis pada tahun 1886. Bijih bauksit dilarutkan dalam cairan *cryolite* dengan penambahan garam florida untuk mengontrol temperatur cairan. Saat arus listrik mengalir ke dalam cairan, alumina

yang larut akan terelektrolisis dan oksigen yang terbentuk akan bereaksi dengan anoda karbon. Aluminium sebagai logam akan berkumpul pada katoda. Logam aluminium yang terkumpul pada katoda akan tersedot keluar menuju tempat peleburan logam secara periodik dan setelahnya akan tercetak dalam bentuk batang (*ingot*). Aluminium yang diperoleh dari proses ini biasa disebut aluminium primer, sedangkan aluminium yang didapat dari sisa-sisanya disebut aluminium sekunder. Batang aluminium kemudian diproses dan dibentuk sesuai dengan permintaan industri seperti plat, lembaran, pipa, dan bentuk-bentuk ekstrusi lainnya untuk selanjutnya diproses lagi menjadi barang siap pakai (Singh, 2016).

### 2.2.1 Karakteristik Aluminium

Aluminium merupakan logam *non ferrous* yang tergolong logam ringan karena memiliki massa jenis sebesar  $\pm 2,7 \text{ gr/cm}^3$  dibandingkan dengan massa jenis baja ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ), kuningan ( $8,53 \text{ g/cm}^3$ ), dan tembaga ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ). Selain itu aluminium memiliki sifat *malleabilitas* (mampu tempa), *formabilitas* (dapat dibentuk), ketahanan korosi, penghantar panas dan listrik yang baik. Aluminium memiliki titik lebur sekitar  $\pm 650^\circ \text{C}$  dan bersifat *non magnetic* (tidak dapat ditarik magnet), serta *non toxic* (tidak beracun) (Singh, 2016). Aluminium juga memiliki sifat fisis dan sifat mekanis seperti yang terlampir dalam Tabel 2.2 dan Tabel 2.3

Tabel 2.2 Sifat fisis aluminium (Surdia dan Saito, 1992)

Sifat- sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,96	>99,0
Massa jenis (g/cm <sup>3</sup> ) (20°C)	2,6989	2,71
Titik cair (oC)	660.2	653-657
Panas jenis (cal/g. <sup>o</sup> C) (100 <sup>o</sup> C)	0,2226	0,2297
Hantaran listrik (%)	64,94	59 (dianil)
Koefisien Suhu Tahanan listrik (°C)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuaian (20-100°C)	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$
Jenis Kristal, konstanta kisi	Fcc, a = 4,013 kX	Fcc, a=4,04 kX

Tabel 2.3 Sifat mekanis aluminium (Surdia dan Saito, 1992)

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		>99	
	Dianil	75% rol dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm <sup>2</sup> )	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur, 0,2% (kg/mm <sup>2</sup> )	1,3	11	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44

### 2.2.2 Klasifikasi Aluminium dan Paduannya

Aluminium dan paduannya dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu berdasarkan cara pembuatan dan perlakuan panas. Klasifikasi aluminium berdasarkan cara pembuatannya terbagi menjadi dua, yaitu aluminium tempa (*wrought*) dan aluminium cor (*cast*). Aluminium tempa adalah aluminium yang dibuat dengan proses penempaan bijih aluminium, sedangkan aluminium cor adalah aluminium yang dibuat dengan proses pengecoran bijih aluminium. Aluminium paduan proses tempa dan cor dikelompokkan seperti pada table 2.4.

Tabel 2.4 Kelompok Paduan Aluminium (Mandalf, 2005)

Aluminium Paduan Tempa (Wrought)		Aluminium Paduan Cor (Cast)	
Nomor Seri	Paduan Aluminium	Nonor Seri	Paduan Aluminium
1xxx	Al ( $\geq 99,00\%$ )	1xx.x	Al ( $\geq 99,00\%$ )
2xxx	Al-Cu	2xx.x	Al-Cu
3xxx	Al-Mn	3xx.x	Al-Si + Cu dan/atau Mg
4xxx	Al-Si	4xx.x	Al-Si
5xxx	Al-Mg	5xx.x	Al-Mg
6xxx	Al-Mg-Si	6xx.x	Tidak digunakan
7xxx	Al-Zn	7xx.x	Al-Zn
8xxx	Al+ Elemen lain	8xx.x	Al+ Sn
9xxx	Tidak digunakan	9xx.x	Al+ Elemen lain

Klasifikasi aluminium berdasarkan perlakuan panas dibagi menjadi dua yakni aluminium paduan yang tidak bisa diberi perlakuan panas (*non heat treatable alloy*) dan aluminium paduan yang dapat diberi perlakuan panas (*heat treatable alloy*). Kelompok aluminium paduan yang dapat menerima perlakuan panas yaitu seri 2xxx (Al-Cu), seri 6xxx (Al-Mg-Si), dan seri 7xxx (Al-Mg-Zn). Perlakuan panas yang digunakan untuk meningkatkan sifat mekanis dari aluminium paduan. Kelompok aluminium paduan yang tidak dapat menerima perlakuan panas diantaranya yaitu seri 1xxx (Al murni), seri 3xxx (Al-Mn), seri 4xxx (Al-Si), dan seri 5xxx (Al-Mg). Pada kelompok aluminium paduan ini peningkatan sifat mekanis dilakukan dengan cara pengerjaan dingin (*cold working*), contohnya yaitu proses ekstrusi. Pada table 2.5 dapat dilihat kode penandaan perlakuan yang digunakan untuk meningkatkan sifat mekanis dari aluminium paduan.

Tabel 2.5 Penandaan perlakuan lanjut aluminium paduan (Callister, 2013)

<i>Designation</i>	<i>Description</i>
<b>Basic Tempers</b>	
F	As-fabricated—by casting or cold working
O	Annealed—lowest strength temper (wrought products only)
H	Strain-hardened (wrought products only)
W	Solution heat-treated—used only on products that precipitation harden naturally at room temperature over periods of months or years
T	Solution heat-treated—used on products that strength stabilize within a few weeks—followed by one or more digits
<b>Strain-Hardened Tempers<sup>a</sup></b>	
H1	Strain hardened only
H2	Strain-hardened and then partially annealed
H3	Strain-hardened and then stabilized
<b>Heat-Treating Tempers<sup>b</sup></b>	
T1	Cooled from an elevated-temperature shaping process and naturally aged
T2	Cooled from an elevated-temperature shaping process, cold-worked, and naturally aged
T3	Solution heat treated, cold worked, and naturally aged
T4	Solution heat treated and naturally aged
T5	Cooled from an elevated-temperature shaping process and artificially aged
T6	Solution heat treated and artificially aged
T7	Solution heat treated and overaged or stabilized
T8	Solution heat treated, cold worked, and artificially aged
T9	Solution heat treated, artificially aged, and cold worked
T10	Cooled from an elevated-temperature shaping process, cold worked, and artificially aged

### 2.3 Aluminium Paduan AA5083H116

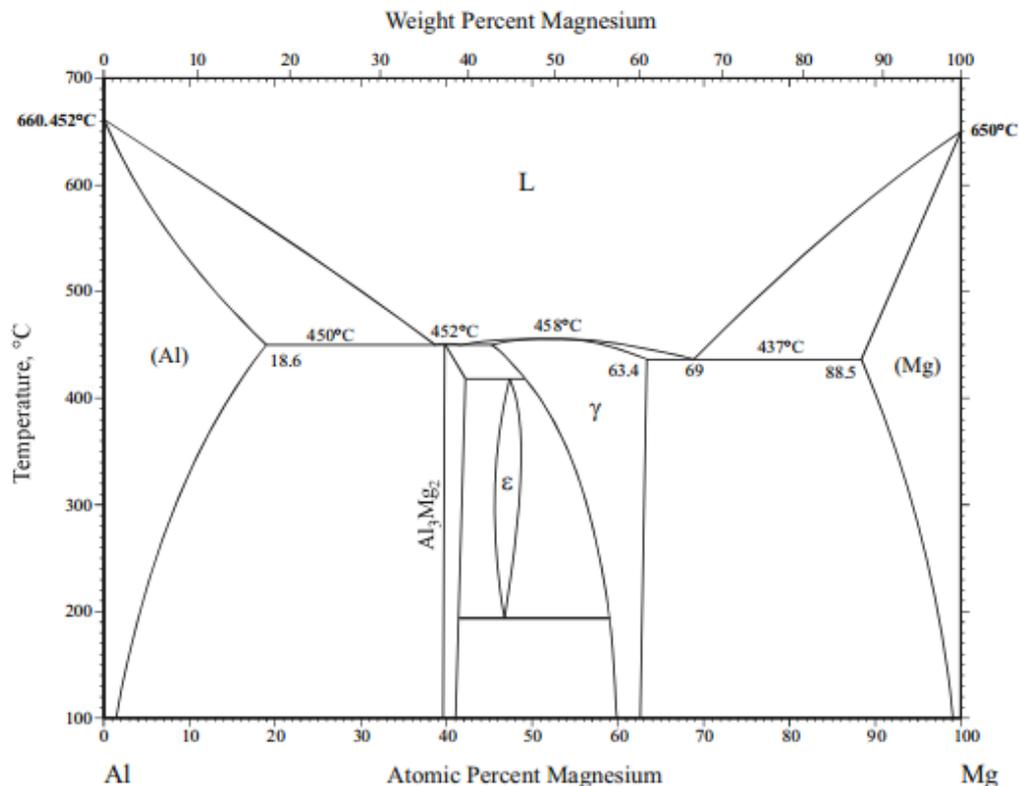
Aluminium seri 5xxx adalah aluminium paduan dengan Magnesium (Mg) sebagai unsur paduan utama. Komposisi paduan dalam AA5083 dapat dilihat dalam table 2.6. Penambahan Mg sebagai unsur paduan utama menjadikan aluminium seri 5xxx menjadi mudah untuk diekstrusi, dirol, ditempa, dan difabrikasi (dibentuk). Karakteristik aluminium seri ini yaitu memiliki ketahanan korosi yang sangat baik terhadap lingkungan air laut dan bahan kimia industri, serta bersifat *weldability* (mampu las) yang baik sehingga sering digunakan dalam industri manufaktur kapal dan konstruksi sekunder bangunan (Wiryosumarto dan Okumura, 2000).

Tabel 2.6 Komposisi kimia aluminium AA5083H116 (Cueca dkk, 2012)

Seri	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Elemen lain
5083	0,40	0,40	0,10	0,40-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15	0,05-0,15

AA5083 merupakan salah satu aluminium paduan yang bersifat *non heat treatable alloy* (tidak bisa diberi perlakuan panas). Kandungan magnesium hingga 15,35% dalam paduan aluminium dapat menurunkan titik lebur logam paduan yang cukup drastis, semula 660 °C menjadi 450 °C. Namun, bukan berarti hal ini dapat menjadikan aluminium paduan dapat ditempa menggunakan panas dengan mudah karena pada suhu di atas 60 °C akan terjadi korosi pada permukaan yang terpapar oksigen. Kandungan magnesium dapat menjadikan logam paduan bertahan dengan baik pada temperatur yang sangat rendah (dingin), dimana sebagian besar logam akan mengalami *failure* akibat penggetasan yang terjadi pada temperatur tersebut.

Paduan biner Al-Mg satu fasa dalam keadaan seimbang dengan larutan padat aluminium pada diagram fasa Al-Mg merupakan larutan padat yang berupa senyawa logam  $Al_3Mg_2$ . Titik eutektik paduan ini berada pada suhu 450°C dan komposisi 35,6% Mg dengan batas kelarutan padatnya pada titik eutektik adalah 17,1% Mg, dan menurun pada temperatur biasa sampai kira-kira 1,9% Mg. Diagram fasa paduan Al-Mg dapat dilihat pada Gambar 2.1.



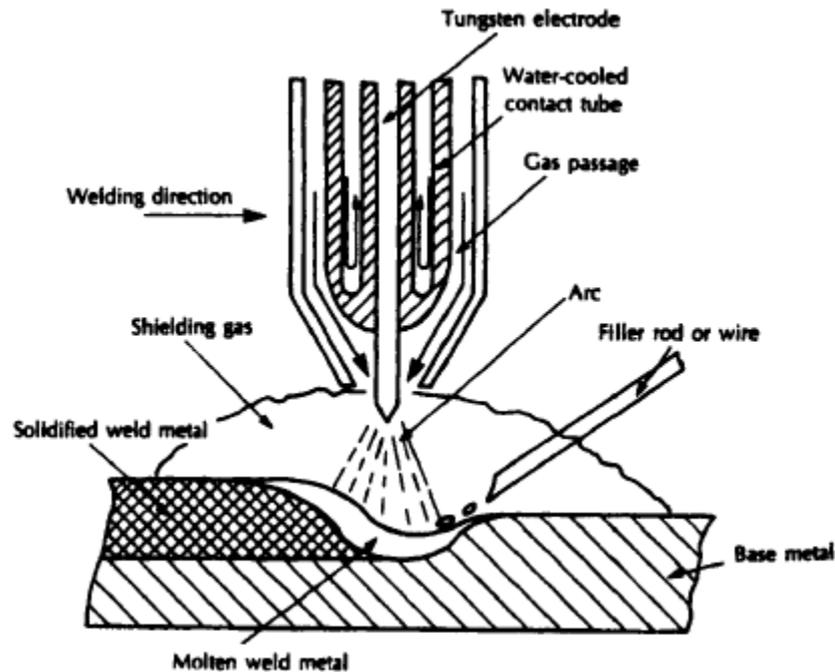
Gambar 2.1 Diagram fase paduan Al-Mg (Okamoto, 2015)

AA5083H116 adalah aluminium paduan (AA5083) dengan perlakuan pengerjaan dingin (*coldworking*). Kode H116 dalam paduan ini menunjukkan pengerjaan dingin yang dilakukan yaitu pengerasan (*hardening*) pada lembaran aluminium dengan proses penarikan (*strain hardened only*, H1) sehingga panjangnya bertambah 16% dari panjang mula-mula (Cueca. dkk, 2012).

#### 2.4 GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*)

*Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) atau biasa dikenal dengan nama *Tungsten Inert Gas* (TIG) merupakan las busur listrik yang menggunakan sebuah elektroda tungsten permanen untuk menghasilkan busur listrik pada benda kerja. Elektroda ini dilindungi oleh gas inert, seperti Argon atau Helium (maupun campuran keduanya), untuk melindungi pengikisan elektroda. Seperti yang terlihat pada gambar 2.2, arus dari *power supply* dialirkan melalui elektroda tungsten dalam *torch* yang terbungkus sebuah *contact tube*. GTAW dapat dilakukan dengan atau tanpa filler. Ketika GTAW yang digunakan tanpa filler,

benda kerja yang disambung harus tipis dan memiliki sambungan dengan bentuk *close-fitting square-butt (butt joint)*.



Gambar 2.2 Skema proses las TIG (Messler, 1999)

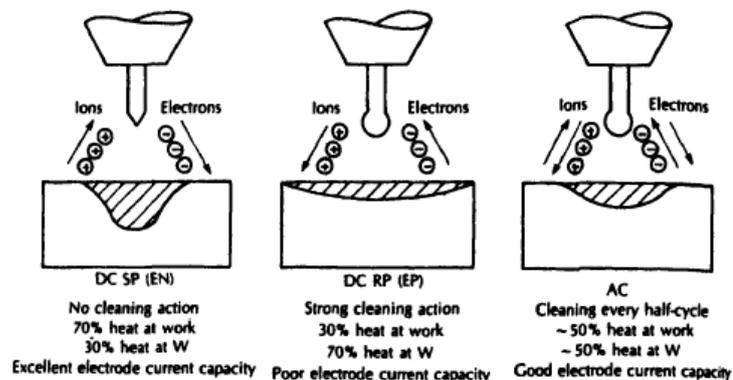
Proses las TIG dapat beroperasi dengan beberapa mode operasi berdasarkan aliran arus listriknya, termasuk arus langsung (DC), dengan elektroda negative (EN) atau positif (EP), atau arus bolak balik (AC). Perbedaan arus atau mode daya menghasilkan karakteristik las dan busur listrik yang berbeda.

Ketika benda kerja atau logam las dihubungkan dengan terminal positif (+) pada *power supply* DC, mode operasi disebut dengan *direct current straight polarity* (DCSP) atau *direct current elektroda negative* (DC- atau DCEN). Ketika benda kerja dihubungkan dengan terminal negative (-) pada *power supply* DC, mode operasi disebut dengan *direct current reverse polarity* (DCRP) atau *direct current elektroda positive* (DC+ atau DCEP). Pada mode operasi DCSP, electron yang dipancarkan dari elektroda tungsten akan berakselerasi dengan kecepatan yang sangat tinggi sehingga menghasilkan energi kinetik ketika mengalir melewati busur listrik. Elektron energi tinggi bertabrakan dengan benda kerja, menghasilkan energi kinetik, dan menghasilkan cukup kalor ke dalam benda

kerja. Konsekuensinya, hasil las mode operasi DCSP memiliki bentuk penetrasi yang dalam, lasan yang sempit, tetapi dengan kalor masukan yang tinggi. Sekitar 2/3 dari kalor kerja yang ada pada busur listrik masuk ke dalam benda kerja. Tinggi kalor masukan dapat disesuaikan dengan kebutuhan, tergantung dari berbagai macam factor seperti misalnya tebal lasan, lebar lasan, berat logam las, *heat-induced defects*, dan pengaruhnya terhadap distorsi atau tegangan sisa.

Pada mode operasi DCRP, efek panas dari elektron lebih banyak berpengaruh pada elektroda tungsten daripada logam las. Mode ini menghasilkan las yang dangkal dan menjaga kalor masukan tetap rendah pada logam las. Mode operasi ini bagus untuk pengelasan material las yang tipis atau logam dan paduan yang mudah meleleh. Mode ini juga menghasilkan aksi penggosokkan pada logam las yang berasal dari ion-ion positif besar yang menyambar permukaan, menghilangkan oksidan, dan membersihkan permukaannya. Mode ini lebih banyak digunakan pada pengelasan logam dan paduan yang mudah teroksidasi, seperti aluminium dan magnesium.

Mode operasi DCSP merupakan proses *nonconsumable electrode* busur listrik yang paling sering digunakan dibandingkan mode operasi DCRP. Bagaimanapun juga ada satu lagi mode yang ada yaitu *alternative current* (AC). Mode AC menghasilkan karakteristik las yang menggabungkan kedua mode DC. Karakteristik las dari beberapa mode arus pada proses las TIG dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Skema Karakteristik mode operasi pada las TIG (Messler, 2000).

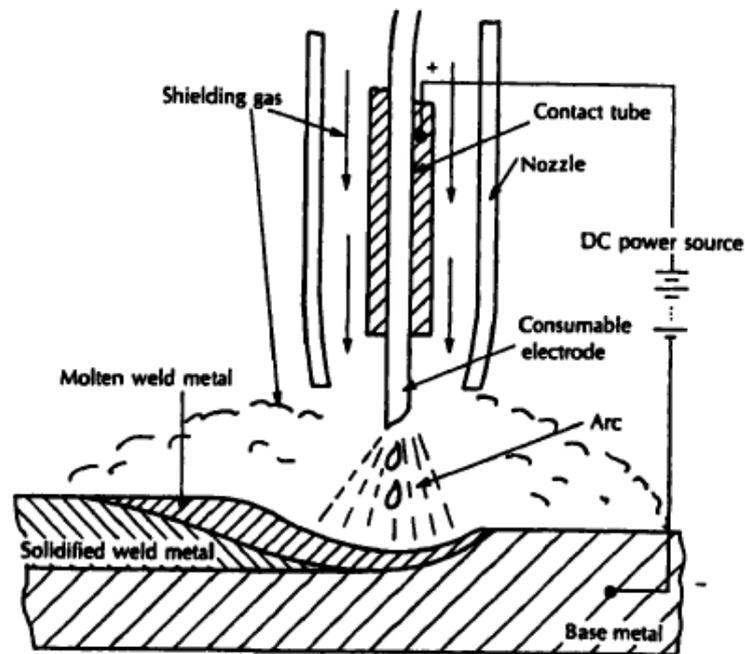
Campuran gas Argon dan Helium dapat digunakan sebagai gas pelindung pada proses las TIG. Argon menawarkan perlindungan yang lebih baik karena memiliki berat jenis yang lebih tinggi daripada Helium dan cenderung tetap eksis (tidak mudah menguap) pada saat proses pengelasan, serta inisiasi busur listrik yang lebih mudah. Kelebihan dari Helium adalah busur listrik yang dihasilkan lebih panas, dan berarti bahwa menghasilkan energi potensial yang lebih besar dibanding Argon. Sehingga dengan mencampur dua gas inert ini diharapkan dapat menggabungkan keunggulan dari dua gas tersebut.

## 2.5 GMAW (*Gas Metal Arc Welding*)

GMAW (*gas metal arc welding*) atau biasa dikenal dengan las MIG (*metal inert gas*) dikembangkan pada tahun 1948 oleh Battele Memorial Institute dan disponsori Air Reduction Company (Sutrimo, 2008). Las MIG adalah salah satu las busur listrik dengan elektroda yang bersifat *consumable* (habis pakai). Elektroda yang digunakan berupa kawat gulungan yang diumpankan secara otomatis (terus menerus) dan menggunakan gas pelindung untuk melindungi *weld pool* dan busur listrik dari kontaminasi udara disekitar area pengelasan. Karena udara dapat menyebabkan oksidasi pada benda kerja atau logam las. Las MIG menggunakan gas pelindung berupa gas inert, seperti Argon dan Helium. Las jenis ini sering digunakan untuk proses pengelasan baja tahan karat dan aluminium. Las MIG bila gas pelindungnya adalah gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) disebut juga dengan las MAG (*metal active gas*) dan biasa digunakan pada pengelasan baja maupun baja lunak.

Keunggulan las MIG diantaranya yaitu dapat digunakan dengan kecepatan tinggi, menghasilkan *Heat Affected Zone* (HAZ) yang lebih kecil dibandingkan dengan las TIG, pembersihan lapisan oksida yang baik pada saat proses pengelasan, dan dapat digunakan untuk semua posisi pengelasan. Karena keunggulan-keunggulan tersebut, las MIG adalah metode las yang paling sering dipakai dalam pengelasan aluminium (Mathers, 2002). Kekurangan dari las MIG yaitu perlengkapan las yang digunakan saat proses pengelasan lebih kompleks dan

susah jika dipakai untuk pengelasan di luar ruangan. Skema las MIG ditunjukkan oleh Gambar 2.4.

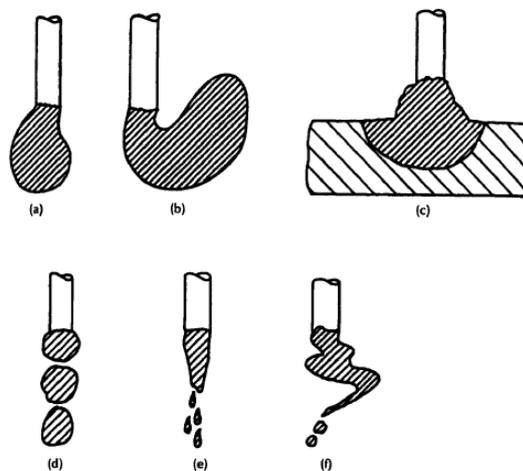


Gambar 2.4 Skema proses Las MIG (Messler, 2000)

Proses pengelasan MIG menggunakan sumber tenaga dengan arus searah (DC), dimana elektroda dihubungkan dengan terminal positif (+) dan benda kerja atau logam las dihubungkan dengan terminal negatif (-). Sebagian besar panas yang timbul pada busur listrik berasal dari terminal positif (elektroda). Pengelasan menggunakan arus rendah akan menyebabkan ujung kawat filler tidak langsung meleleh sehingga busur listrik terlebih dahulu melakukan kontak dengan *weld pool* dan terjadi *short circuit*. *Short circuit* yang terjadi menyebabkan kawat filler meleleh dan lelehan filler tersebut masuk ke *weld pool*. Proses ini disebut model transfer logam “*dip transfer*”. Model ini biasanya digunakan untuk menyambung material yang tipis pada semua posisi pengelasan.

Pada penggunaan arus yang lebih tinggi, filler meleleh dari ujung kawat dan ditransferkan melalui busur listrik berupa semburan lelehan filler, yang sering disebut model transfer logam “*spray transfer*”. Kondisi ini menghasilkan *spatter* yang lebih sedikit dan lebih kecil, serta penetrasi lelehan filler yang lebih dalam

ke *weld pool* dibandingkan dengan model *dip transfer*. Model *spray transfer* ini sering digunakan untuk menyambung logam yang memiliki ketebalan lebih besar dari model *dip transfer* (Mathers, 2002). Masukan panas yang tidak diatur dengan benar akan menyebabkan filler meleleh di ujung kawat dan lelehan tersebut berukuran jauh lebih besar dibandingkan dengan model *spray transfer*. Lelehan filler berukuran besar tersebut dinamakan *spatter*, dan termasuk dalam cacat las. Model transfer logam dengan lelehan berukuran besar ini dinamakan “*globular transfer*”. Skema lelehan filler las MIG dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema transfer lelehan filler pada las MIG : (a) drop globular, (b) repelled globular, (c) short circuiting, (d) projected spray, (e) streaming spray, (f) rotating spray (Messler, 2000).

### 2.5.1 Elektroda Las MIG

Las MIG menggunakan elektroda yang bersifat *consumable* yaitu elektroda yang akan habis jika digunakan. Elektroda las MIG berupa gulungan kawat yang diumpankan terus menerus ke logam las. Saat proses pengelasan, elektroda akan meleleh dan menjadi logam pengisi (*filler*) pada sambungan las (Messler, 2000). Jenis elektroda yang digunakan pada las MIG ditentukan berdasarkan logam yang akan dilas. Elektroda yang sering digunakan dalam pengelasan aluminum seri AA5083 adalah elektroda dengan seri ER5356. Elektroda ER5356 memiliki komposisi kimia seperti pada Tabel 2.7 sebagai berikut :

Tabel 2.7 Komposisi kimia elektroda ER5356 (ASME 2001)

Unsur	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Berat (%)	0,25	0,4	0,1	0,2	5,5	0,2	0,1	0,2

## 2.6 Las Tandem TIG-MIG

Salah satu variasi metode las yang sering digunakan adalah las tandem. Proses pengelasan tandem diharapkan dapat menggabungkan keunggulan-keunggulan yang ada pada masing-masing metode las yang digunakan. Las tandem yang dapat digunakan pada proses pengelasan aluminium yaitu las Tandem TIG-MIG. Metode pengelasan Tandem TIG-MIG adalah gabungan dari las TIG dan las MIG yang digunakan bersama-sama untuk mendapatkan satu buah *weld pool*. Proses las Tandem TIG-MIG memiliki prinsip kerja yang sama dengan las TIG dan MIG konvensional. Las TIG berfungsi sebagai *leading wire* yang memiliki beban kerja yang lebih berat karena harus mencairkan logam induk untuk membuat *weld pool*. Las MIG berfungsi sebagai *trail wire* yang mengisi alur *weld pool* dengan elektroda cair dan menghaluskan permukaan *weld pool*, serta mengurangi munculnya *spatter* (Hedegard, 2001).

## 2.7 Parameter Las

### 2.7.1 Besar Arus Pengelasan

Besarnya arus las yang diperlukan tergantung dari bahan dan ukuran dari lasan, geometri sambungan, posisi pengelasan, jenis elektroda, dan diameter inti elektroda (Wiryosumarto dan Okumura, 2000). Apabila logam las memiliki kapasitas kalor yang tinggi maka diperlukan arus las yang besar dan mungkin juga diperlukan pemanasan tambahan. Untuk mengelas logam paduan sebaiknya menggunakan arus yang kecil untuk menghindari terbakarnya unsur-unsur paduan.

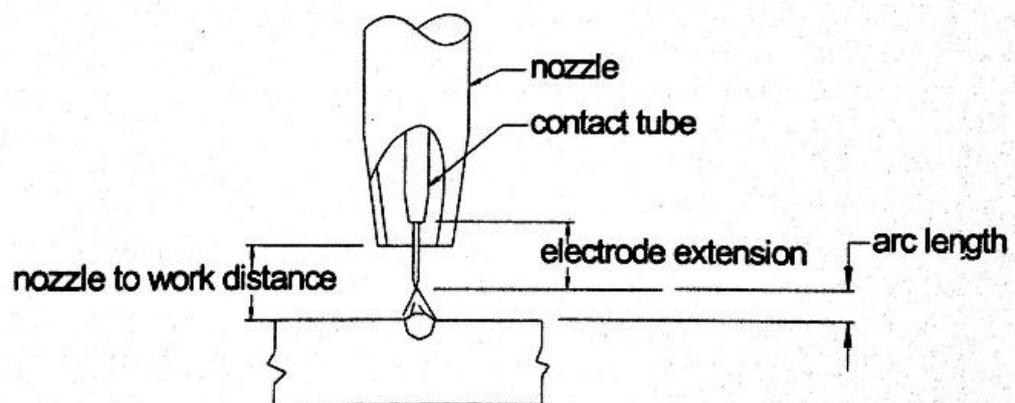
Arus pengelasan akan mempengaruhi tingkat penetrasi logam las, bentuk manik las, lebar HAZ, dan campuran logam induk. Semakin besar arus las maka semakin dalam penetrasi logam las dan semakin lebar pula HAZ yang terbentuk, serta semakin banyak juga campuran logam induk yang terbentuk. Berlaku pula kebalikannya. Arus pengelasan pada las TIG dipengaruhi oleh pengaturan

tegangan yang digunakan. Sedangkan pada las MIG, arus pengelasan dipengaruhi oleh diameter elektroda dan pengaturan tegangan, serta *feed rate filler* yang digunakan.

### 2.7.2 Tegangan Busur Las

Tegangan busur las tergantung dari panjang busur yang dikehendaki dan jenis elektroda yang digunakan (Wiryosumarto dan Okumura, 2000). Pada elektroda yang sejenis dengan logam las, tegangan busur las berbanding lurus dengan panjang busur, dimana panjang busur adalah jarak antara ujung elektroda las dengan permukaan logam induk seperti pada Gambar 2.6. Secara umum panjang busur yang terlalu tinggi tidak dikehendaki karena akan mengganggu stabilitas aliran arus pengelasan sehingga menyebabkan pengelasan tidak rata.

Panjang busur yang dianggap baik diperkirakan sama dengan panjang diameter elektroda yang digunakan. Pada saat pengelasan manual (dengan tangan) panjang busur sukar untuk dipertahankan agar tetap stabil sehingga pada pengelasan ini digunakan proses semi otomatis (dengan bantuan mesin) agar panjang busur dapat dipertahankan tetap stabil.

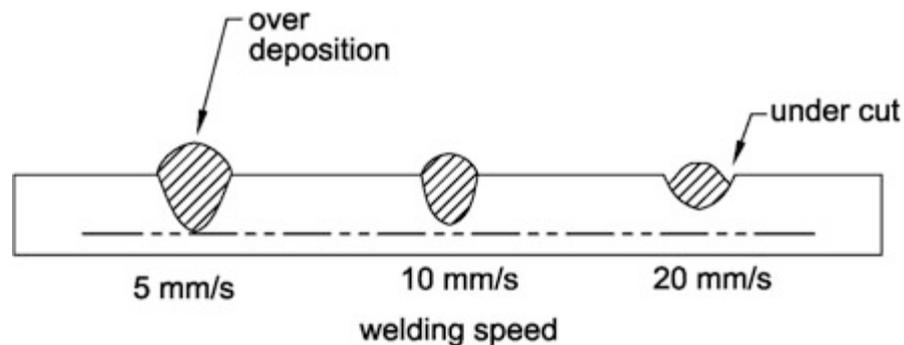


Gambar 2.6 Skema panjang busur las terhadap spesimen (Mandalf, 2005)

### 2.7.3 Kecepatan Pengelasan

Kecepatan pengelasan tergantung pada jenis elektroda, diameter inti elektroda, bahan yang dilas, geometri sambungan, ketelitian sambungan dan lain-lainnya. Kecepatan las berbanding lurus dengan arus las (Wiryosumarto dan

Okumura, 2000). Semakin cepat pengelasan maka dibutuhkan arus las yang semakin tinggi. Apabila tegangan dan arus dalam proses pengelasan tetap dan kecepatan las dinaikkan maka total masukkan panas per satuan panjang las jadi menurun sehingga pendinginan akan berjalan terlalu cepat yang memungkinkan daerah HAZ pada logam las akan semakin keras. Selain itu, kecepatan las juga akan mempengaruhi penetrasi *weld metal* jika kecepatan las bertambah tanpa disertai penambahan arus dan tegangan. Namun akan sampai pada suatu kecepatan tertentu yang akan memperbesar penetrasi *weld metal*. Pengaruh kecepatan las terhadap bentuk *weld bead* dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Pengaruh kecepatan las terhadap bentuk *weld bead* (Mandalf, 2017)

Secara umum dalam proses pengelasan diusahakan menaikkan kecepatan las setinggi-tingginya tetapi jangan sampai merusak kualitas manik las. Semakin tinggi kecepatan las maka semakin kecil pula perubahan sifat metalurgi yang terjadi.

## 2.8 Distorsi

Distorsi adalah perubahan dimensi pada struktur las yang disebabkan oleh pemuaian dan penyusutan logam las dan sekitarnya yang berlangsung sangat cepat karena tegangan sisa yang berasal dari proses pemanasan dan pendinginan selama siklus termal las berlangsung. Besar dan arah distorsi dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain yaitu adanya distribusi massa disekitar garis las (momen inersia), medan gaya karena tegangan sisa, dan adanya penambahan logam las lain (*filler*) (Singh, 2012).

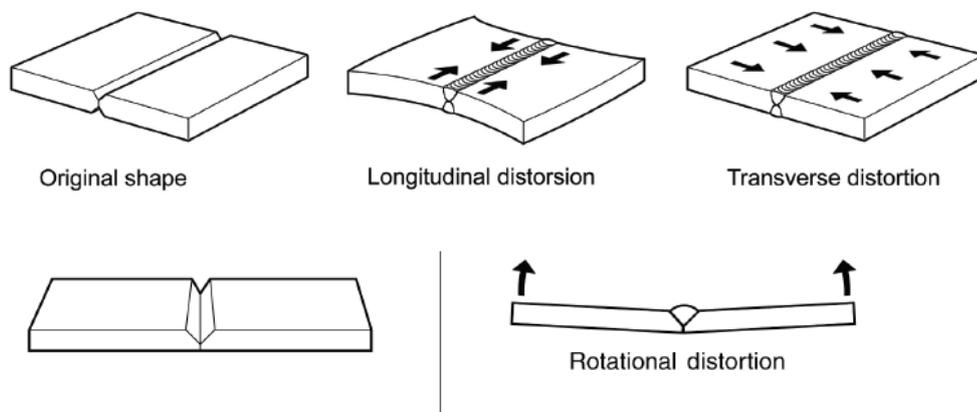
### 2.8.1 Faktor Penyebab Distorsi

Faktor yang mempengaruhi terbentuknya distorsi atau deformasi pada logam las dapat dibagi dalam dua kelompok. Kelompok pertama yaitu deformasi yang erat hubungannya dengan masukan panas pengelasan. Faktor yang termasuk dalam kelompok ini adalah masukan panas pengelasan yang dipengaruhi oleh tegangan pengelasan, arus pengelasan, kecepatan pengelasan, dan ukuran elektroda serta jenis elektroda yang digunakan. Kelompok kedua yaitu deformasi yang disebabkan oleh adanya penahan atau penghalang pada sambungan las. Faktor yang termasuk dalam kelompok ini adalah bentuk, ukuran, serta susunan penahan dan urutan pengelasan (Wirjosumarto dan Okumura, 2000).

Distorsi yang terjadi pada hasil pengelasan akan menyebabkan bentuk akhir yang tidak sesuai dengan keinginan, mengurangi estetika, dan mengakibatkan penambahan biaya untuk pelurusan perubahan bentuk.

### 2.8.2 Perubahan Bentuk dalam Proses Pengelasan

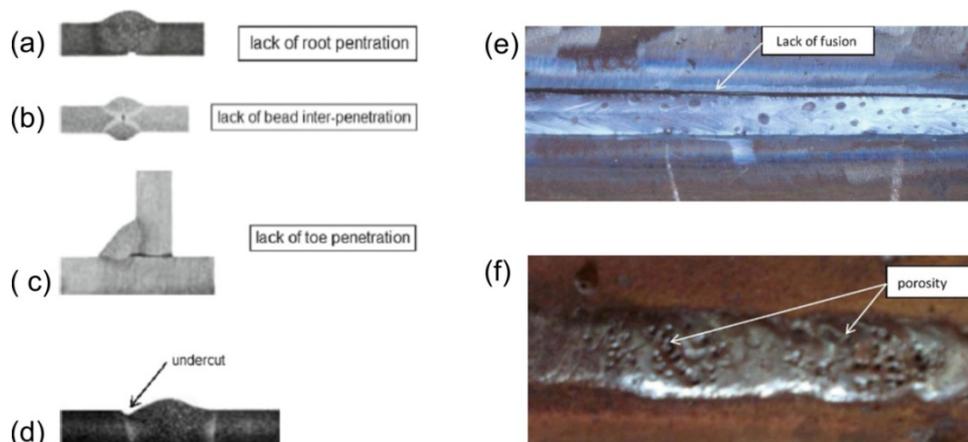
Perubahan bentuk atau biasa disebut dengan deformasi akan mengakibatkan perubahan dimensi dan penyimpangan material seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Beberapa macam perubahan bentuk pada proses pengelasan diantaranya yaitu penyusutan yang terjadi searah garis las (*Longitudinal distortion*), penyusutan yang terjadi tegak lurus dengan garis las (*Transverse distortion*), dan rotasi terhadap garis las (*Rotational* atau *angular distortion*).



Gambar 2.8 Bentuk-bentuk distorsi (Weman, 2012)

## 2.9 Cacat Las

Selama proses pengelasan, sering terjadi kekurangan pada sambungan las. Kekurangan yang tergantung dari ukuran, lokasi, dan tipe ini dianggap sebagai cacat. Sekali cacat ini terdeteksi, tindakan perbaikan harus dilakukan untuk menghilangkan cacat tersebut karena sebuah produk tidak mentolerir adanya cacat pada dirinya. Cacat hanyalah ketidaksempurnaan dalam sambungan las. Prosedur pengelasan, jenis sambungan, akses dan teknik pengelasan berpengaruh langsung terhadap ketidaksempurnaan produksi. Prosedur yang salah atau teknik yang jelek akan menghasilkan cacat yang menjadi penyebab utama kegagalan teknik pada suatu produk. Jika cacat yang terjadi diketahui maka teknisi dapat dengan mudah menghilangkannya. Cacat yang sering terjadi pada sambungan las antara lain yaitu, *lack of penetration*, *lack of fusion*, *slag inclusion*, *undercutting*, dan porositas. Beberapa bentuk cacat pada las dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Cacat yang sering terjadi pada sambungan las : (a) *lack of penetration*, (b) *lack of bead inter-penetration*, (c) *lack of toe penetration*, (d) *undercut*, (e) *lack of fusion*, dan (f) *porosity* (Mandalf, 2017)