



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Karakteristik *Austenitic Stainless Steel 316L*

Baja tahan karat merupakan kelompok baja paduan tinggi yang berdasarkan pada sistem Fe-Cr, Fe-Cr-C, dan Fe-Cr-Ni dengan unsur paduan utama minimal 10,5% Krom (Cr) dan Nikel (Ni) dengan sedikit unsur paduan lain seperti Molibdenum (Mo), Tembaga (Cu) dan Mangan (Mn). Kadar kromium tersebut merupakan kadar minimum untuk pembentukan permukaan pasif oksida yang dapat mencegah oksidasi dan korosi^[15].

Salah satu kelompok baja tahan karat yang banyak digunakan adalah baja tahan karat austenitik^[15]. *Austenitic stainless steel* memiliki *single phase, face centered cubic* (fcc). Elemen yang mendukung pembentukan austenit, paling dominan adalah nikel, yang ditambahkan ke baja dalam jumlah yang sangat banyak (pada umumnya lebih dari 8 %wt). Elemen pendukung lainnya adalah C, N dan Cu. Adapun range komposisi standard dari baja tahan karat jenis ini adalah sebagai berikut : 16-25 %wt Cr, 8-20 %wt Ni, 1-2 %wt Mn, 0,5-3 %wt Si, 0,02-0,08 %wt C (<0,04 %wt untuk *grade L*), 0-2 %wt Mo, 0-0,15 %wt N dan 0-0,2 %wt Ti dan Nb^[15].

Universitas Indonesia

Baja tahan karat austenitik mempunyai kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan baja tahan karat lainnya dan dikenal secara luas dengan nama 18-8 (Cr-Ni) steel. Baja tahan karat austenitik mempunyai sifat ketahanan korosi dan mampu las yang lebih baik dibandingkan baja tahan karat lainnya. Temperatur servis dapat mencapai 760 °C bahkan lebih, tetapi ketahanan oksidasinya terbatas pada temperatur tinggi.

2.1.1. Pengaruh Unsur-Unsur Paduan

Di bawah ini akan diuraikan pengaruh unsur-unsur paduan yang terkandung pada baja austenitik tipe 316 L.

Karbon

Karbon merupakan elemen stabilisator austenit yang kuat dan juga pembentuk karbida yang biasanya terjadi pada batas butir. Karbon merupakan elemen yang penting yang terlibat dalam sensitisasi. Kestabilan karbida meningkat dengan cepat dengan bertambahnya kadar karbon^[25].

Kromium

Kromium ditambahkan terutama untuk mencegah korosi pada baja. Dengan penambahan kromium, stoikiometri oksida $(Fe,Cr)_2O_3$ terbentuk pada permukaan baja. Kehadiran kromium akan meningkatkan kestabilan oksida karena tingginya afinitas terhadap oksigen dibandingkan dengan *iron*. Tingginya kadar kromium dibutuhkan untuk kestabilan oksida dalam lingkungan yang lebih agresif.

Selain karbon, kromium juga merupakan elemen yang paling penting yang terlibat dalam pengembangan sensitisasi. Kromium merupakan pembentuk karbida yang kuat. Kromium dapat ditemukan dalam bentuk karbida $M_{23}C_6$, Cr_7C_3 , $M_{23}(C,N)_6$. Kromium juga merupakan kunci dalam pembentukan senyawa

intermetalik. Senyawa yang paling umum adalah *sigma phase* (σ), dimana dalam sistem Fe-Cr merupakan senyawa (Fe,Cr) yang terbentuk pada suhu di bawah 815 °C. Selain itu, kromium juga hadir dalam fasa-fasa intermetalik chi (χ) dan Laves^[15].

Molibdenum

Molibdenum merupakan unsur pembentuk karbida yang dalam pemakaiannya akan meningkatkan kecenderungan pengendapan karbida pada batas butir, sehingga daerah yang berbatasan dengan batas butir menjadi kekurangan molibdenum, meskipun umumnya ada dalam konsentrasi yang lebih kecil dibandingkan krom (misalnya, dalam baja tahan karat 316).

Binder^[12] mengatakan, bahwa penambahan unsur ini ke dalam baja tahan karat austenitik dapat mengurangi kepekaan baja tersebut terhadap sensitasi. Semakin tinggi kadar molibdenum, maka daerah austenit (γ) semakin sempit, sehingga dibutuhkan lebih banyak nikel untuk mempertahankan struktur austenit pada temperatur ruang^[25].

Mangan

Merupakan suatu elemen penstabil austenit terutama pada temperatur rendah karena dapat mencegah transformasi martensit. Mangan dapat berinteraksi dengan sulfur membentuk mangan sulfida, dimana morfologi dan komposisi dalam sulfida ini dapat memberikan efek yang baik pada ketahanan korosi^[15].

Nikel

Fungsi utama nikel adalah untuk mem-*promote* fasa austenit. Dengan menambahkan nikel, fasa austenit dapat secara luas terekspansi sehingga austenit dapat stabil pada dan di bawah temperatur ruang.

Nikel meningkatkan aktivitas karbon dalam baja tahan karat austenit. Oleh

Universitas Indonesia

karena itu, peningkatan konsentrasi nikel dapat meningkatkan sensitivitas untuk kadar karbon yang diberikan dan latar belakang termalnya. Nikel bukanlah merupakan pembentuk karbida yang kuat dan tidak juga mem-*promote* pembentukan senyawa intermetalik^[15].

Silikon

Silikon terdapat pada semua jenis baja tahan karat dan terutama ditambahkan untuk deoksidasi selama pelelehan (*melting*). Untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi, silikon ditambahkan 4-5 %wt dan jika ditambahkan pada beberapa paduan tahan panas 1-3 %wt dapat meningkatkan ketahanan terhadap *scalling* oksida pada temperatur *elevated*. Keberadaan silikon di batas butir merusak oksidasi lingkungan.

Dalam baja tahan karat austenitik, kadar silikon sampai 1 %wt tidak memiliki pengaruh terhadap keseimbangan fasa, tetapi jika dalam kadar yang tinggi akan mem-*promote* ferit. Silikon terdapat dalam senyawa *iron silicides* (FeSi, Fe₂Si, Fe₃Si, Fe₅S₃) dan senyawa intermetalik Cr₃Si. Silikon juga dapat membentuk *sigma phase* jika berada pada komposisi senyawa yang berlebihan^[15].

Elemen Pembentuk Karbida^[15]

Elemen-elemen pembentuk karbida perlu ditambahkan untuk mencegah terjadinya presipitasi karbida krom dan pengurangan kadar krom dalam baja tahan karat austenitik. Penambahan beberapa elemen seperti niobium, titanium, tungsten tantalum dan vanadium kedalam Cr dan Mo akan mem-*promote* pembentukan karbida.

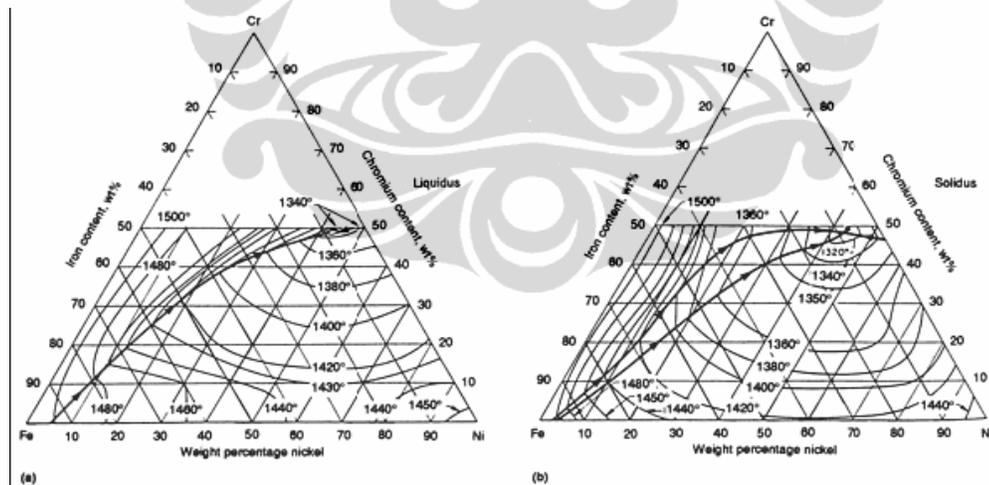
Pada paduan dengan tambahan elemen ini, karbon tidak akan berpresipitasi pada batas butir selama proses pendinginan, karena telah berpresipitasi terlebih dahulu membentuk karbida dengan elemen-elemen pembentuk karbida, seperti karbida titanium, karbida niobium atau karbida

Universitas Indonesia

tantalum pada temperatur yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan afinitas karbon terhadap unsur-unsur tersebut lebih besar dari unsur krom. Karbida-karbida ini tidak berakibat negatif, karena dengan terikatnya karbon, maka karbida krom tidak terbentuk, selain itu karbida ini tidak menimbulkan aksi galvanis pada batas butir.

2.1.2. Diagram Fasa Sistem Fe-Cr-Ni

Diagram fasa digunakan untuk menjelaskan transformasi fasa dan kestabilan fasa dalam baja tahan karat. Seperti yang telah kita ketahui, bahwa baja tahan karat austenitik mempunyai unsur paduan utama krom dan nikel. Penambahan nikel kepada sistem Fe-Cr akan meningkatkan daerah fasa austenit dan dapat menstabilkan austenit pada temperatur kamar^[15]. Untuk itu perlu kiranya di sini diuraikan mengenai diagram fasa terner besi-krom-nikel seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Skema Isotermal Diagram Terner pada Fe-Ni-Cr (a) Liquidus dan (b) Solidus^[4]

Menurut penelitian yang dilakukan Farrar^[9], dinyatakan bahwa

transformasi delta ferit menjadi karbida dan fasa sigma sangat bergantung pada awal segregasi kromium, molibdenum dan nikel dalam kondisi hasil las. Jika baja tahan karat austenitik tipe 316L dipanaskan pada temperatur 700 °C untuk waktu lama maka bila komposisinya berada pada daerah delta ferit, austenit dan fasa sigma, transformasi berjalan sangat lambat dan kebanyakan delta ferit terurai menjadi austenit dan karbida dan sisanya tetap stabil sebagai delta ferit. Sedangkan bila komposisinya berada pada daerah delta ferit dan fasa sigma, transformasi berjalan cepat dan kebanyakan delta ferit terurai menjadi austenit dan fasa sigma.

Pada pemanasan yang lebih lama lagi, karbon akan terlarut dalam austenit, batas butir austenit bergerak masuk ke dalam ferit serta dengan adanya Mo yang terdifusi ke batas butir karbida akan mempercepat transformasi $M_{23}C_6$ menjadi M_3C . Maka pengaturan Cr, Mo dan C akan menyebabkan transformasi berjalan lambat pada temperatur kerja.

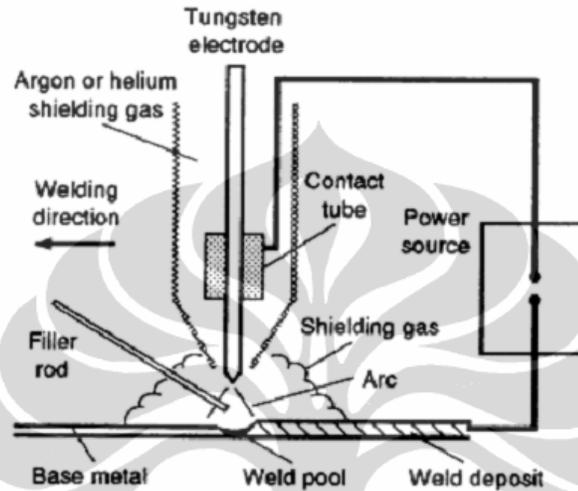
2.2. PENGELASAN

Menurut DIN (*Deutsche Industrie Normen*) pengelasan adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dengan kata lain, las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas, dengan atau tanpa menggunakan tekanan (*pressure*), atau hanya tekanan, dengan atau tanpa menggunakan logam pengisi (*filler*).

Salah satu teknik pengelasan yang dikenal dalam penyambungan baja tahan karat adalah proses pengelasan busur las (*Arc Welding*) diantaranya adalah GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) dan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), yang digunakan dalam penelitian ini.

Universitas Indonesia

Skema sistem peralatan dari pengelasan metode ini ditunjukkan oleh gambar 2.3. Filler yang digunakan menggunakan standar AWS A5.9. ER316L dengan diameter 1,6 mm.



Gambar 2.3. Skema Proses GTAW ^[4]

Gas Pelindung

Gas pelindung yang digunakan pada proses pengelasan GTAW adalah argon murni. Argon murni memiliki konduktivitas termal yang rendah, menghasilkan kolom busur yang sempit, terbatas; yang memungkinkan variasi yang lebih besar dalam panjang busur dengan memberikan sedikit efek pada busur listrik atau bentuk las manik (*bead*).

Gas Back Shielding/Purging^[17]

Ketika pengelasan dilakukan hanya pada satu sisi permukaan saja, maka penting kiranya untuk melindungi *root pass* sambungan las dari oksidasi selama pengelasan dengan menggunakan gas *inert* (umumnya argon). Teknik *shielding* tersebut disebut *back purging/shielding*. *Gas back shielding/purging* digunakan pada pengelasan GTAW dengan *solid filler rod* agar *root pass* dapat penetrasi ke

sisi belakang sambungan las dengan baik.

Penetrasi yang jelek dapat menyebabkan oksidasi yang disebabkan tingginya kadar kromium lasan. Oleh karena itulah harus menggunakan gas inert seperti argon (Ar) sebagai *gas back shielding*. Gas argon tidak akan bereaksi dengan logam panas/lelehan logam.

Gas Back Shielding dapat memiliki resiko karena alur gas pada sistem dapat menyebabkan udara masuk ke dalam gas argon. Kontaminasi udara dapat menyebabkan kurang cukupnya fusi dan penetrasi yang dapat menyebabkan permukaan bagian belakang pada *root pass bead* teroksidasi. Oleh karena itu, penggunaan *gas back shielding* harus dilakukan dengan hati-hati.

Filler TGX ^[17]

Filler TGX merupakan salah satu produk PT. X. Filler ini merupakan *flux-cored stainless steel filler rods* untuk pengelasan GTAW tanpa penggunaan *gas back shielding purging*. Filler TGX mengandung flux di dalam baja tahan karat *tubular rod*.

Ketika terjadi fusi oleh panas busur, flux menjadi lelehan slag yang mengalir secara perlahan ke bagian belakang *root* untuk menutupi penetrasi *bead* secara homogen. Lelehan slag melindungi lelehan *Weld Metal* dari efek nitrogen dan oksigen di atmosfer.

Efek lapisan oksida terhadap ketahanan korosi pada *root pass weld* dan permukaan bagian belakang dipengaruhi oleh penggunaan *gas back shielding*. Permukaan *root pass bead* dengan filler rod TGX tanpa *gas back shielding* akan teroksidasi, sebaliknya menggunakan filler solid umum untuk GTAW dengan *gas back shielding*, tidak akan menyebabkan permukaan *root pass bead* teroksidasi jika penggunaan *back shielding* dijaga sampai akhir pengelasan.

2.3. Metalurgi Pengelasan

Selama proses pengelasan terjadi reaksi-reaksi yang mempengaruhi pembentukan fasa pada deposit las dan pembentukan karbida di daerah pengaruh

panas yang pada akhirnya akan mempengaruhi sifat-sifat dari lasan khususnya sifat ketahanan korosi. Deposit lasan austenitik sering digunakan untuk menggabungkan berbagai paduan besi. Deposit lasan austenitik memadat sebagai ferit primer, yang juga dikenal sebagai (δ) delta ferit^[3].

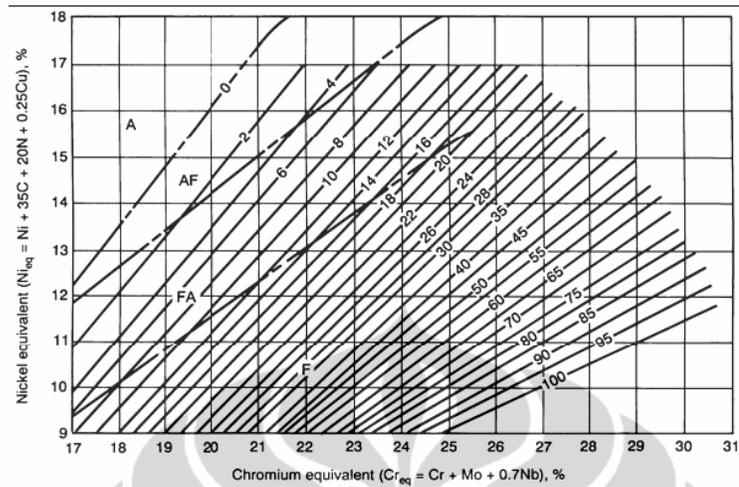
Delta ferit merupakan bcc-iron yang disisipi *interstitial* larutan padat atom karbon selama solidifikasi dan struktur bcc ditahan pada suhu ruangan. Struktur mikro memiliki bentuk dendrit kasar dengan ketidakhomogenan kimia yang menyebabkan logam lasan bersifat anodik dan logam dasar bersifat katodik di lingkungan korosif. Keberadaan daerah anodik dan katodik memberikan kondisi korosi galvanik.

Beberapa kemungkinan metalurgi yang terjadi selama pengelasan adalah sebagai berikut^[4]:

- Presipitasi intergranular, $M_{23}C_6$ yang kaya kromium, kromium karbida di dalam HAZ, yang dapat menyebabkan kerentanan terhadap korosi.
- Transformasi lasan dari ferit – *sigma phase* selama temperatur *elevated*.

Untuk memprediksi struktur mikro digunakan diagram berdasarkan pada komposisi aktual atau perkiraan. Sebagai contoh diagram WRC-1992, untuk memprediksi kadar lasan ferit dalam baja tahan karat seperti pada gambar 2.4.

Gambar 2.4. dapat digunakan untuk memprediksi jenis ferit (primer atau eutektik) dan kadar ferit. Diagram ini menunjukkan rentang komposisi untuk solidifikasi primer yang diinginkan. Karena tidak semua ferit adalah ferit primer (yakni, beberapa adalah komponen fase dari austenit-ferit eutektik), diagram ini dapat digunakan untuk memastikan bahwa ferit merupakan fasa padatan pertama (primer) yang terbentuk. Kondisi ini terjadi ketika deposit las memiliki komposisi pada rentang berlabel FA. Dengan demikian, pengetahuan tentang kadar ferit diperlukan untuk memprediksi perilaku korosi.

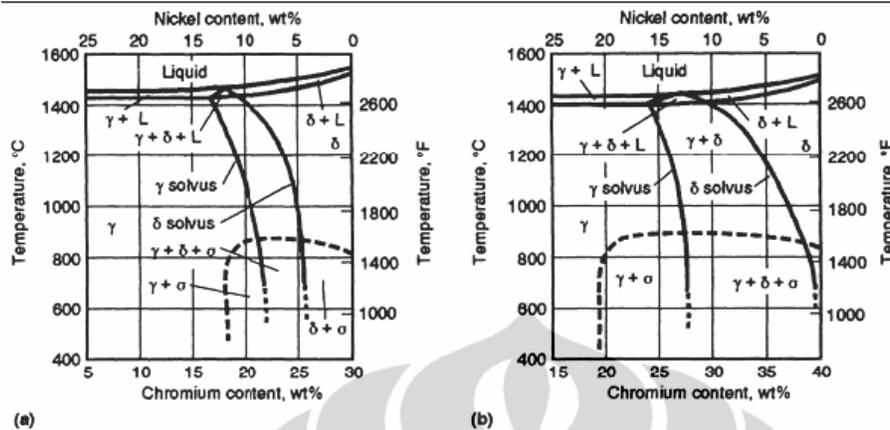


Gambar 2.4. Diagram WRC-1992^[4]

Kadar Ferit dinyatakan oleh Ferrite Number (FN), dimana FN 100 adalah sekitar sampai 65% ferit. Batas yang menyatakan perubahan mode solidifikasi (A: Austenit Primer; AF : Austenitik-Feritik; FA : Feritik-Austenitik; F : Ferit Primer) ditunjukkan oleh garis putus-putus. Konsep kromium ekuivalen (Cr_{eq}) dan nikel ekuivalen (Ni_{eq}) digunakan untuk menormalkan efek berbagai penambahan paduan pada pembentukan ferit dan austenit. Rasio kromium-nikel yang tinggi mendorong pembentukan ferit primer, sedangkan rasio rendah mendorong austenit primer.

2.3.1. Evolusi Struktur Mikro Zona Fusi dan Morfologi Ferit

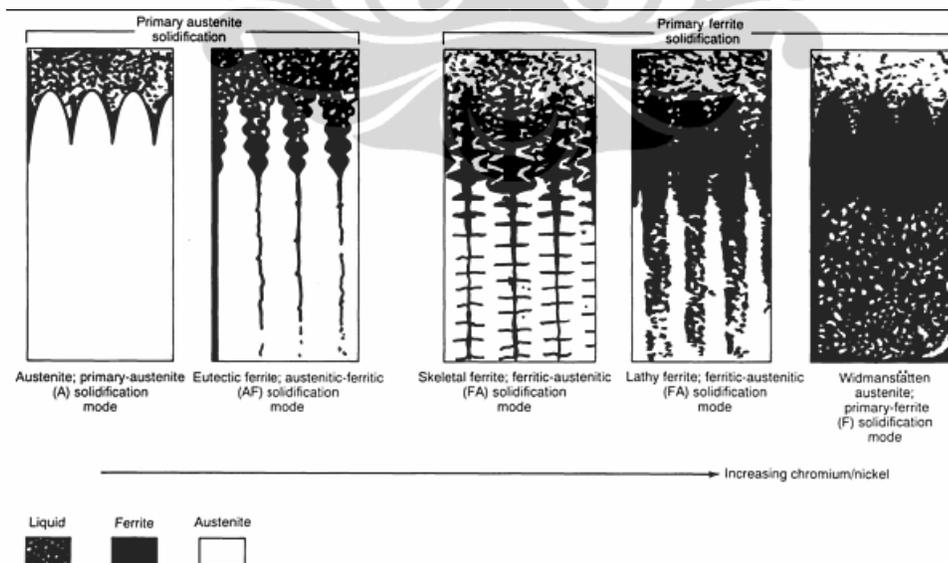
Struktur mikro logam las umumnya dipengaruhi oleh kadar karbon, unsur paduan, perlakuan panas yang diberikan, *heat input* dan laju pendinginannya^[1]. Baja tahan karat austenitik secara termo mekanik memiliki struktur mikro austenit primer. Transformasi baja tahan karat austenitik dapat dijelaskan menggunakan diagram *pseudobiner* Fe-Cr-Ni pada kadar besi konstan 70% dan 60% seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Potongan Vertikal Diagram Terner Besi-Nikel-Kromium, pada Kadar Besi Konstan (a) 70% Fe. (b) 60% Fe ^[4]

2.3.2. Reaksi Solidifikasi

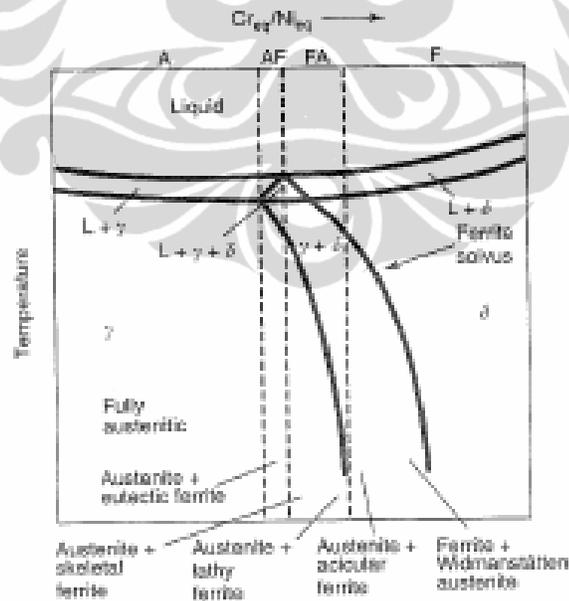
Struktur mikro akhir lasan dikontrol oleh perilaku solidifikasi dan transformasi keadaan padat, seperti pada gambar 2.6. Terdapat 4 kemungkinan solidifikasi dan transformasi keadaan padat pada *Weld Metal* baja tahan karat austenitik seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1 dan gambar 2.7.



Gambar 2.6. Skematik Perilaku Solidifikasi dan Transformasi Keadaan Padat pada Lasan dengan Peningkatan Rasio Cr_{eq}/Ni_{eq} [4]

Tabel 2.1. Tipe Solidifikasi, Reaksi dan Struktur Mikro [15]

Jenis Solidifikasi	Reaksi	Struktur Mikro
A	$L \rightarrow L + A \rightarrow A$	Struktur <i>fully</i> austenitik, solidifikasi <i>well-defined</i>
AF	$L \rightarrow L + A \rightarrow L + A + (A + F)_{eut} \rightarrow A + F_{eut}$	Ferit pada sel dan batas dendrite
FA	$L \rightarrow L + F \rightarrow L + F + (F + A)_{per/eut} \rightarrow F + A$	Ferit <i>skeletal</i> dan/atau <i>lathy</i> hasil dari transformasi ferit-austenit
F	$L \rightarrow L + F \rightarrow F \rightarrow F + A$	Matriks ferit <i>acicular</i> atau ferit dengan batas butir austenit dan <i>Widmanstätten side plates</i>



Gambar 2.7. Hubungan Tipe Solidifikasi dengan Diagram Fasa Pseudobiner [15]

2.3.3. Presipitat

Pada keadaan setimbang, baja tahan karat austenitik tipe 316L sepenuhnya berbentuk austenit dalam proses pendinginan sampai temperatur kamar. Delta-ferit dalam logam las mengalami pembentukan seperti dendrit sebelum proses pembekuan austenit pada temperatur peritektik 1450 °C dan bertahan selama proses pendinginan yang cepat^[8].

Ketika HAZ dipanaskan sampai temperatur mendekati temperatur solidus paduan, berbagai presipitat yang terdapat dalam *Base Metal* terlarut. Hal tersebut akan mendorong kepada supersaturasi matriks austenit selama pendinginan.

Karbida merupakan presipitat yang paling banyak terbentuk dalam HAZ pada baja tahan karat austenitik. Berbagai macam presipitat juga dapat hadir dalam baja tahan karat austenitik, bergantung pada komposisi dan perlakuan panas. Ditemukan hasil-hasil transformasi yang terdiri dari berbagai fasa intermetalik dan karbida $M_{23}C_6$. Fasa sigma, chi, eta, G dan Laves juga terbentuk dalam baja tahan karat austenitik, khususnya dalam kondisi penambahan Mo, Nb, dan Ti. Fasa-fasa tersebut terbentuk pada waktu paparan yang sangat lama pada temperatur *elevated*. Daftar jenis-jenis presipitat, struktur dan stoikiometrinya ditunjukkan dalam tabel 2.2.

Tabel 2.2. Jenis-Jenis Presipitat dalam Baja Tahan Karat Austenitik^[15]

Precipitate	Crystal Structure	Lattice Parameters (nm)	Stoichiometry
MC	FCC	$a = 0.424-0.447$	TiC, NbC
M_6C	Diamond cubic	$a = 1.062-1.128$	$(FeCr)_3Mo_3C$, Fe_3Nb_3C , Mo_3SiC
$M_{23}C_6$	FCC	$a = 1.057-1.068$	$(Cr,Fe)_{23}C_6$, $(Cr,Fe,Mo)_{23}C_6$
NbN	FCC	$a = 0.440$	NbN
Z phase	Tetragonal	$a = 0.307, c = 0.7391$	$CrNbN$
Sigma phase	Tetragonal	$a = 0.880, c = 0.454$	Fe-Ni-Cr-Mo
Laves phase (η)	Hexagonal	$a = 0.473, c = 0.772$	Fe_2Mo_6 , Fe_3Nb
Chi phase (χ)	BCC	$a = 0.8807-0.8878$	$Fe_{23}Cr_{12}Mo_{10}$
G phase	FCC	$a = 1.12$	$Ni_{10}Nb_9Si_7$, $Ni_{10}Ti_9Si_7$
R	Hexagonal	$a = 1.0903, c = 1.9342$	Mo-Co-Cr
	Rhombohedral	$a = 0.9011, \alpha = 74^\circ 27.5'$	Mo-Co-Cr
ϵ Nitride (Cr_2N)	Hexagonal	$a = 0.480, c = 0.447$	Cr_2N
Ni_3Ti	Hexagonal	$a = 0.9654, c = 1.5683$	Ni_3Ti
$Ni_3Al(Ti)$	FCC	$a = 0.681$	Ni_3Al

Karbida $M_{23}C_6$

Karbida terdapat dalam setiap baja tahan karat austenitik, karena kromium merupakan pembentuk kuat karbida. Penambahan beberapa pembentuk karbida, seperti Mo, Nb, Ti juga mendukung pembentukan karbida.

Presipitasi karbida $M_{23}C_6$ memiliki pengaruh terhadap ketahanan korosi. Presipitat karbida tumbuh cepat di sepanjang batas butir pada temperatur 700-900 $^{\circ}C$ dan paling banyak terbentuk dalam HAZ pada baja tahan karat austenitik. Pada umumnya presipitat karbida tumbuh di sepanjang batas butir atau *interface* ferit – austenit^[15].

Karbida ini biasanya terdapat pada baja tahan karat yang diberi perlakuan panas dan biasanya terbentuk sebelum fasa intermetalik. Hal ini disebabkan sifat difusi yang cepat dari atom C. Karbida $M_{23}C_6$ membentuk inti dan tumbuh ke dalam matriks ferit. Pada pemanasan 700 $^{\circ}C$ pengendapan $M_{23}C_6$ dalam austenit terbatas. Hal ini menunjukkan bahwa larutan lewat jenuh karbon dalam ferit lebih kecil dari pada dalam austenit.

Sigma Phase

Pada *Base Metal* dan *Weld Metal* baja tahan karat austenitik sangat rentan terhadap pembentukan *sigma phase*. *Sigma phase* dapat terbentuk dalam berbagai jenis baja tahan karat, tetapi paling umum cenderung terjadi dalam kadar Cr yang tinggi pada austenitik, feritik, dan paduan duplex.

Pembentukan fasa sigma bergeser ke kandungan Cr yang lebih rendah dan temperatur yang lebih tinggi. Nikel dapat meningkatkan interval temperatur pembentukan fasa sigma dari 815-926 °C, tetapi pengaruh nikel dalam meningkatkan pembentukan fasa sigma tidak seefektif Mn atau unsur-unsur kuat pembentuk ferit seperti Mo, S dan Al.

Fasa Chi^[8]

Fasa chi adalah suatu senyawa intermetalik stabil yang mengandung Fe, Cr dan Mo. Secara teoritis fasa chi dapat merupakan suatu senyawa pelarut karbon dengan tipe $M_{18}C$. Komposisi fasa chi bervariasi dengan toleransi yang tinggi, sehingga sulit dibedakan dengan fasa sigma melalui metoda EDX. Dengan penambahan karbon perbandingan unsur dalam fasa chi bergeser ke arah Mo, yang mana berarti bergeser ke arah pembentukan karbida kuat.

Fasa R^[8]

Fasa R mempunyai struktur heksagonal dengan jarak antar kisi yang cukup lebar. Fasa R adalah fasa intermetalik Fe, Cr dan Mo yang mirip dengan fasa sigma dan chi. Dyson dan Keown^[26] membahas pergerakan atomik dalam ferit untuk mengakomodasikan struktur fasa R. Ditemukan bahwa hanya sedikit pergerakan atom kecil dan pergerakan kisi dibutuhkan untuk terbentuknya fasa R dari ferit. Secara teoritis transformasi delta ferit menjadi fasa R lebih mudah terjadi dibandingkan fasa sigma.

2.4. Perpindahan Panas

Pada kebanyakan pengerjaan, diperlukan pemasukan atau pengeluaran panas, untuk mencapai dan mempertahankan keadaan yang dibutuhkan sewaktu proses berlangsung. Panas dapat diangkut dengan beberapa macam cara diantaranya yang berhubungan dengan material logam adalah "hantaran", sering juga disebut konduksi^[34]. Proses pengelasan logam termasuk ke dalam contoh perpindahan panas dengan cara konduksi.

Pemanasan pada logam berarti pengaktifan gerakan molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul [McCabe,1993]. Rumus laju perpindahan panas adalah sebagai berikut ^[23]:

$$q = -k A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad q \sim A \sim t \text{ (tebal material)}$$

dimana; q = Laju perpindahan kalor

$\frac{\partial T}{\partial x}$ = Gradient suhu kearah perpindahan kalor

k = Konduktivitas termal

A = Luas permukaan bidang hantaran

2.5. Korosi

Korosi didefinisikan sebagai serangan yang merusak karena reaksi dengan lingkungan sekitarnya yang merupakan reaksi elektrokimia, bersifat alamiah, berlangsung dengan sendirinya dan biasanya dimulai di permukaan. Proses korosi terjadi jika terdapat faktor-faktor yang terlibat dalam proses, diantaranya adalah : Anoda, katoda, dan larutan elektrolit.

Banyak kasus di mana ketahanan korosi *Weld Metal* lebih tinggi daripada *Base Metal*. Namun, ada kalanya juga *Weld Metal* rentan terhadap korosi. Terkadang sulit untuk menentukan mengapa *Weld Metal* mengalami korosi,

Universitas Indonesia

namun, satu atau lebih faktor berikut sering terlibat, diantaranya^[3] : Lapisan oksida dan *scale*, pilihan filler logam yang tidak tepat, *final surface finish*, dan faktor metalurgi. Siklus pemanas dan pendingin yang terjadi selama proses pengelasan akan mempengaruhi struktur mikro dan komposisi permukaan daerah lasan dan daerah HAZ.

2.5.1. Korosi *Pitting*

Baja tahan karat austenitik 316L sangat rentan terhadap korosi sumuran (*pitting*). Oleh karena itulah, maka dalam penelitian kali ini akan difokuskan pada korosi sumuran (*pitting*).

Pitting adalah bentuk lain dari serangan korosi lokal berbentuk lubang kecil atau lubang besar dengan diameter permukaan sama atau kurang dari kedalaman^[3]. *Pit* biasanya terisolasi atau sangat dekat dengan *pit* yang lain sehingga kelihatan seperti permukaan yang kasar. Korosi ini sangat berbahaya karena sulit dideteksi dan kerusakan yang ditimbulkan dapat terjadi secara tiba-tiba/mendadak.

Pitting adalah bentuk serangan lokal yang disebabkan oleh pecahnya lapisan tipis oksida pasif yang melindungi bahan dari proses korosi. Lubang biasanya hasil dari sel konsentrasi yang dibentuk oleh variasi dalam komposisi larutan yang berhubungan dengan bahan paduan. Variasi komposisi tersebut dihasilkan ketika larutan berada pada permukaan yang tidak teratur, berbeda dari komposisi larutan padat (*bulk*). Setelah lubang terbentuk, lubang bertindak sebagai anoda didukung oleh daerah katodik yang relatif besar.

Pit sering dimulai pada struktur mikro tertentu dalam deposit lasan dan lebih berkembang di dalam material yang secara metalurgi bersifat heterogen. Misalnya, ketika baja tahan karat austenit dipanaskan sampai temperatur di mana terjadi sensitisasi akan menghasilkan *chromium depleted zone* yang merupakan tempat terjadi *pitting*. *Pit* juga dapat dimulai pada antarmuka austenit-ferit dalam logam lasan *stainless steel*. Ketika logam filler yang digunakan sudah tepat, *pitting* masih dapat terjadi di dalam *unmixed zone*.

Universitas Indonesia

Semakin kompleks komposisi struktur suatu material dapat mengakibatkan ketahanan korosi akan semakin menurun. Hal ini dikarenakan semakin banyak komposisi struktur yang dimiliki suatu material akan menyebabkan terbentuknya lebih banyak daerah-daerah yang memiliki perbedaan potensial dalam strukturnya. Perbedaan potensial dalam struktur akan mengakibatkan terbentuknya daerah anoda dan katoda dalam struktur sehingga meningkatkan efek galvanik dalam struktur suatu material sehingga pada akhirnya menurunkan ketahanan korosi suatu bahan khususnya terhadap korosi elektrokimia^[1].

Ukuran *pit* dapat bervariasi, dari yang sangat dangkal, sampai yang sangat dalam dan lebar^[16]. Bentuk *pit* dapat sempit dan dalam, dangkal dan lebar, *elliptical*, kumpulan serangan butir vertikal atau horizontal, atau dari *cavity subsurface*. Kedalaman *pit* maksimum biasanya digunakan untuk mengelompokkan *pit*. Caranya adalah dengan mengukur penetrasi maksimum (p) dan penetrasi spesimen (d) melalui penghilangan berat sampel. Rasio kedua angka tersebut, p/d, disebut *pitting factor*. Jika faktornya adalah 1, maka korosi secara keseluruhan adalah korosi merata (*uniform*). Untuk kedalaman *pit* yang sangat kecil, *pitting factor* memiliki nilai yang sangat besar.

Penghilangan berat (laju korosi) dapat dihitung dengan rumus^[6]:

$$\text{mm/bulan} = \frac{(7290 \cdot W)}{(A \cdot t \cdot d)}$$

Keterangan :

t = *Time of exposure* (jam) = 72 jam

A = Area (cm²)

W = Berat yang hilang atau *weight loss* (gram)

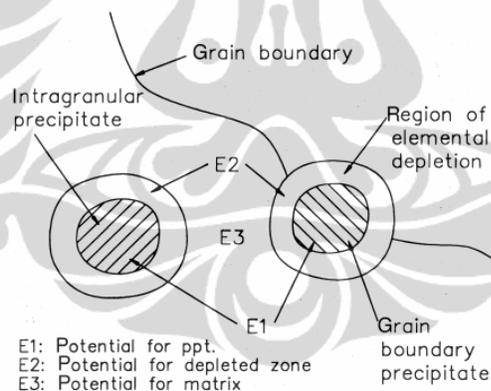
d = Densitas (gram/cm³)

2.5.2. Sensitisasi

Selama pengelasan baja tahan karat, zona sensitisasi lokal (yaitu, daerah rentan korosi) sering berkembang. Baja tahan karat austenitik bila dipanaskan sampai suhu antara 500 - 800 °C untuk jangka waktu cukup lama, akan mengalami fenomena sensitisasi. Hal ini diyakini bahwa perlakuan panas ini memungkinkan pembentukan partikel presipitat karbida krom kecil di sepanjang batas butir dengan reaksi antara kromium dan karbon dalam *stainless steel*^[34].

Baik kromium dan karbon harus berdifusi ke batas butir untuk membentuk presipitat, meninggalkan *chromium depleted zone* yang berdekatan dengan batas butir. Akibatnya, daerah batas butir ini sekarang sangat rentan terhadap korosi.

Sensitisasi terjadi karena pembentukan krom karbida sepanjang batas butir, sehingga kadar kromium menipis di daerah yang berdekatan dengan batas butir. Daerah ini menyebabkan perbedaan potensial elektrokimia yang dapat mempromote terjadinya korosi terlokalisasi pada struktur mikro. Kekurangan kromium tersebut menghasilkan sel galvanik terlokalisasi, seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Daerah *Depleted* yang Berdekatan dengan Presipitat^[3]

Jika pengurangan ini menurunkan kadar krom sampai di bawah 12 %wt yang diperlukan untuk mempertahankan lapisan pasif protektif, daerah akan mengalami sensitisasi dan akhirnya korosi^[3].

Fenomena sensitisasi dapat dihindari antara lain dengan memadukan baja tahan karat dengan logam lain seperti niobium atau titanium, yang memiliki

kecenderungan yang lebih besar untuk membentuk karbida daripada kromium Cr sehingga tetap dalam larutan padat.

2.5.3. Oksidasi Permukaan Pengelasan

Oksida pengelasan cepat terbentuk dan memiliki komposisi yang jauh dari keseimbangan. Oksida permukaan pada baja tahan karat pada umumnya mengurangi ketahanan korosi. Proses pengelasan, terutama dengan sedikit gas pelindung atau tanpa *gas back shielding/purging*, dapat menghasilkan variasi ketebalan dari oksida pasivator.

Kromium oksida terbentuk akibat meningkatnya laju difusi kromium. Kromium mendominasi oksida pengelasan pada temperatur tinggi dan mencapai maksimum di atas 900 °C. Variasi dalam oksidasi akan menghasilkan gradien di tingkat *chromium depletion* yang berdekatan dengan lasan baja tahan karat. Perilaku ini akan menyebabkan beberapa kecenderungan korosi lokal. Sebuah indikasi masalah ini dapat dilihat dengan terbentuknya *heat-tint oxide*^[3].

Ketahanan meningkat dengan permukaan yang semakin halus. Oksida pengelasan menyebabkan beberapa kegagalan pada baja seperti serangan lokal *pitting* pada sisi *root*, yang diawali oleh pembersihan setelah pengelasan (*post-weld cleaning*) yang tidak tepat^[32].

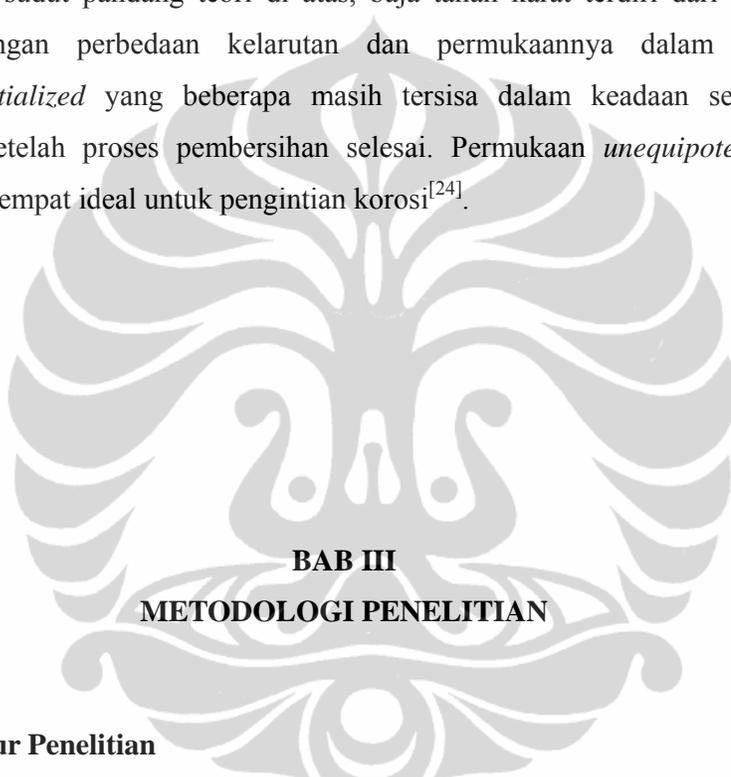
Praktek pengelasan untuk meminimalkan korosi, salah satunya adalah dengan pembersihan permukaan lasan. Deposit lasan harus diperiksa secara visual segera setelah pengelasan. Maksimum ketahanan korosi biasanya menuntut permukaan yang teroksidasi halus secara seragam, bebas dari partikel asing dan ketidakteraturan. Deposit biasanya memiliki variasi kekasaran dan tingkat *spatter* lasan, yang dapat diminimalkan dengan *grinding*. Untuk deposit las halus, dapat diminimalkan cukup dengan sikat kawat. Namun, untuk *stainless steel*, menyikat akan mengganggu lapisan pasif yang ada dan dapat memperburuk serangan korosi^[3].

Untuk menghilangkan campuran-campuran oksida (*welding scale*), dilakukanlah prosedur pembersihan. Temperatur oksida yang tinggi dimana

Universitas Indonesia

komposisi tidak homogen akan memiliki perbedaan kelarutan dalam pembersihan, sehingga beberapa daerah ada yang lebih terlarut dibandingkan dengan daerah yang lainnya. Ketika oksida dihilangkan dari permukaan, pembersihan mulai melarutkan matriks-paduan dengan evolusi hidrogen, dan juga beberapa akan masuk ke dalam logam^[24].

Dari sudut pandang teori di atas, baja tahan karat terdiri dari beberapa elemen dengan perbedaan kelarutan dan permukaannya dalam keadaan *unequipotentialized* yang beberapa masih tersisa dalam keadaan seperti itu walaupun setelah proses pembersihan selesai. Permukaan *unequipotentialized* merupakan tempat ideal untuk pengintian korosi^[24].



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Prosedur Penelitian

Tahapan-tahapan prosedur yang akan dilakukan pada penelitian ini diuraikan pada diagram alir Gambar 3.1.