

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **II.1. BAJA HSLA (*HIGH STRENGTH LOW ALLOY*)**

Baja HSLA (*High Strength Low Alloy Steel*) atau biasa disebut juga dengan *microalloyed steel* adalah baja yang di desain untuk dapat memberikan sifat mekanis dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan baja karbon biasa. Baja jenis ini bukanlah jenis baja paduan pada umumnya melainkan baja yang didesain sedemikian sehingga memiliki sifat mekanis yang unggul. Baja jenis ini memiliki tegangan luluh (*yield strength*) sebesar lebih dari 275 MPa atau 40 Ksi. Komposisi kimia dari baja HSLA dapat bervariasi tergantung dari sifat yang ingin dicapai. Baja HSLA dalam bentuk lembaran biasanya memiliki kadar karbon yang rendah berkisar antara 0.05% C hingga 0.25% C dengan tujuan meningkatkan mampu bentuk dan mampu lasnya. Unsur mangan (Mn), chromium (Cr), Nikel, Molybdenum, nitrogen, vanadium, niobium, titanium, dan zirconium juga biasanya ditambahkan ke dalam baja jenis ini dalam perbandingan dan kombinasi yang beragam.

##### **II.1.1 Klasifikasi Baja HSLA**

Baja HSLA mempunyai beberapa tipe dan standar yang digunakan tergantung dari sifat-sifat yang dimilikinya seperti ketangguhan, mampu bentuk, mampu las, dan ketahanan korosinya. Baja ini tidak dapat digolongkan ke dalam baja paduan meskipun sifat-sifat yang diinginkan dapat tercapai dengan hanya penambahan sedikit paduan. Adapun penggolongan baja HSLA dapat digolongkan ke dalam enam kategori berikut ini <sup>(12)</sup>:

- *Weathering steels*, Baja yang ditambahkan sedikit Tembaga (Cu) dan Fosfor (P) untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi atmosferik dan kemampuan untuk dikuatkan melalui mekanisme penguatan larutan padat.

- *Microalloyed ferrite-pearlite steels*, Baja yang ditambahkan sedikit (kurang dari 0.10%) elemen pembentuk karbida dan karbonitrida seperti niobium, vanadium, dan atau titanium untuk penguatan presipitat, penghalus butir, dan kontrol terhadap perubahan temperatur.
- *As-rolled pearlitic steels*, disebut juga baja C-Mn tetapi dengan penambahan elemen paduan lain untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, mampu bentuk, dan kemampulan.
- *Acicular Ferrite (Low carbon bainite) steels*, Baja dengan kandungan karbon dibawah 0.05%C dan memiliki kombinasi tegangan luluh, mampu bentuk, ketangguhan, kemampulan yang sangat baik.
- *Dual Phase Steels*, Baja dengan mikrostruktur martensite yang tersebar di matriks ferrite dan memiliki kombinasi yang baik dari keuletan dan tegangan luluh yang tinggi.
- *Inclusion-shape-controlled steels*, Penambahan calcium, zirconium, titanium, dan logam-logam jarang sehingga bentuk dari inklusi sulfida berubah menjadi lebih kecil, tersebar dan berbentuk globular yang akan meningkatkan keuletan.

### II.1.2 Aplikasi Baja HSLA

Penggunaan baja HSLA sangat banyak diaplikasikan pada transmisi pipa minyak dan gas, kendaraan berat, Peralatan pertanian, Peralatan industri, gerbong kereta api, Jembatan, struktur lepas pantai. Pemilihan baja HSLA ini ditentukan oleh kebutuhan dari sifat-sifat yang diinginkan seperti ketahanan korosi, mampu bentuk, dan kemampulan yang baik. Untuk kebanyakan aplikasi, faktor yang paling utama dalam pemilihan baja ini adalah perbandingan kekuatan dan berat (*weight*) yang sesuai.

### II.1.3 Pengaruh Elemen Paduan

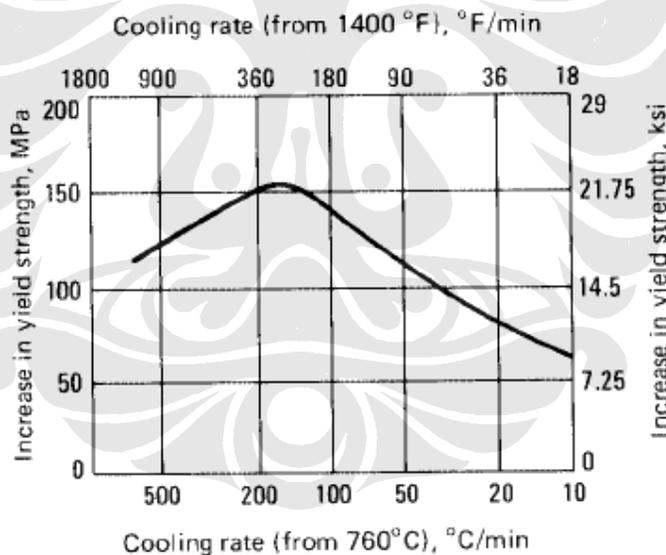
Sifat mekanis yang diinginkan dari baja HSLA dapat dicapai dengan sedikit penambahan dari elemen paduan. Faktor yang sangat mempengaruhi dalam penghalusan butir baja HSLA adalah besar butir austenite awal yang sangat dipengaruhi oleh elemen paduan dan proses canai panas. Penghalusan butir austenite yang dihasilkan dari proses pengerolan terkendali ternyata dapat menghasilkan baja HSLA dengan yield strength yang cukup tinggi yaitu berkisar dari 345 MPa hingga 620 MPa (50 ksi – 90 ksi). Perkembangan proses pengerolan terkendali yang didukung juga dengan desain elemen paduan yang sesuai ternyata dapat meningkatkan nilai tegangan luluh dari baja HSLA. Baja HSLA biasanya memiliki kadar karbon sebesar 0.06% atau bahkan lebih kecil. Namun demikian dengan kadar karbon yang sekecil itu, nilai yield strength dari baja HSLA masih dapat ditingkatkan hingga 485 MPa (70 ksi). Nilai yield strength yang cukup tinggi ini dapat dicapai dengan memadukan pengaruh dari penghalusan butir pada saat proses pengerolan terkendali dan juga penguatan presipitat yang diakibatkan dengan adanya elemen paduan seperti vanadium, niobium, dan titanium. Jenis-jenis baja HSLA berdasarkan elemen- elemen paduannya adalah sebagai berikut <sup>(12)</sup>:

- Vanadium-microalloyed steels
- Niobium-microalloyed steels
- Niobium-molybdenum steels
- Vanadium-niobium microalloyed steels
- Vanadium-nitrogen microalloyed steels
- Titanium-microalloyed steels
- Niobium-titanium microalloyed steels
- Vanadium-titanium microalloyed steels

### a) Pengaruh unsur vanadium

Vanadium memberikan kontribusi terhadap proses penguatan dengan pembentukan partikel presipitat V(CN) didalam matriks ferrite selama proses pendinginan. Presipitat vanadium ini bersifat lebih tidak stabil jika dibandingkan dengan presipitat niobium.

Presipitat vanadium V(CN) ini dapat larut pada temperature pencanaan yang normal dan pembentukannya sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan. Penguatan baja oleh vanadium berkisar antara 5-15 MPa (0.7-2ksi) untuk setiap penambahan 0.01wt% V tergantung dari kadar karbon dan laju pendinginan. Derajat pendinginan ditentukan oleh temperatur pencanaan dan tebal material serta dapat mempengaruhi tingkat penguatan presipitat pada baja dengan 0.15%V seperti ditunjukkan oleh gambar 2.1 berikut ini.



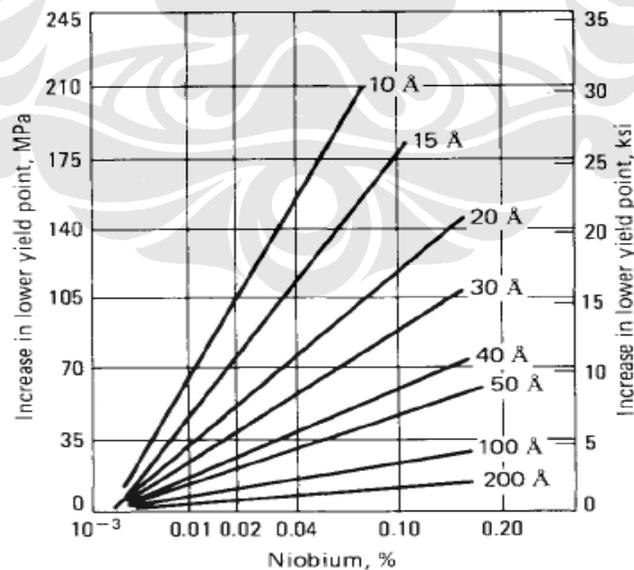
**Gambar 2.1.** Pengaruh kecepatan pendinginan terhadap peningkatan nilai *yield strength* pada baja HSLA 0.15 % V<sup>(12)</sup>.

Penguatan baja dengan paduan ini dapat dicapai pada derajat pendinginan 170°C/menit. Pada derajat pendinginan yang lebih rendah, presipitat V(CN) akan mengalami pengasaran (*coarsening*) dan menjadi kurang efektif untuk penguatan.

Begitu juga pada cooling rate yang lebih tinggi, pada kondisi ini V(CN) berada di dalam larutan dan akibatnya partikel V(CN) yang mengendap akan semakin sedikit sehingga proses penguatan akan menjadi tidak optimal.

### b) Pengaruh unsur niobium

Seperti halnya vanadium, niobium meningkatkan nilai tegangan luluh melalui mekanisme penguatan dengan pembentukan presipitat. Besarnya peningkatan dari yield strength suatu baja dengan paduan niobium ini ditentukan oleh besar dan jumlah dari karbida niobium yang mengendap. Namun demikian niobium merupakan paduan yang lebih baik dalam hal penghalusan butir dibandingkan dengan vanadium. Unsur niobium merupakan unsur paduan yang lebih efektif jika dibandingkan vanadium. Hal ini disebabkan selain pembentukan presipitat Nb(CN) yang dapat menguatkan baja, niobium juga dapat memberikan pengaruh terhadap penghalusan butir ferit. Jumlah niobium yang biasanya ditambahkan kedalam baja berkisar antara 0.02 % hingga 0.04 %. Jumlah ini merupakan sepertiga dari jumlah niobium yang biasa ditambahkan. Sedangkan peningkatan kekerasan yang dapat dicapai adalah 35 MPa hingga 40 MPa untuk setiap penambahan 0.01% niobium.



**Gambar 2.2** Pengaruh karbida niobium terhadap nilai *yield strength* untuk beberapa ukuran karbida<sup>(12)</sup>

Baja yang mengandung elemen paduan niobium dan vanadium dapat menghasilkan baja dengan nilai tegangan luluh yang lebih tinggi dibandingkan baja yang mengandung salah satu paduan yaitu niobium saja ataupun vanadium saja. Baja paduan niobium-vanadium setelah proses pengerolan terkendali akan mengalami peningkatan kekuatan melalui mekanisme penguatan presipitat dan juga menurunkan *ductile-brittle transition temperature*. Pada umumnya baja paduan jenis ini dibuat dengan menggunakan kadar karbon kurang dari 0.10% C dengan tujuan mengurangi jumlah pearlite an meningkatkan ketangguhan, keuletan dan sifat mampu las-nya.

### **c) Pengaruh paduan vanadium dan nitrogen**

Presipitasi yang dibentuk oleh vanadium dan nitrogen (VN) memiliki sifat yang lebih kuat dibandingkan presipitat yang dibentuk oleh niobium (NbN).Maka dapat disimpulkan bahwa dalam hal ini nitrogen berfungsi sebagai unsur pembentuk presipitat yang jika ditambahkan ke dalam baja HSLA akan memberikan pengaruh penguatan presipitat (*Precipitation Hardening*).

## **II.2. PENGUATAN PRESIPITAT BAJA HSLA**

Penguatan presipitat (*precipitation hardening*) pada dasarnya terjadi pada unsur yang memiliki kelarutan yang tinggi pada temperatur tinggi dan unsur tersebut harus dapat membentuk endapan yang dapat menghalangi dislokasi, sehingga akan terjadi mekanisme penguatan . Fenomena ini terjadi pula pada baja HSLA – Nb , dimana pada temperatur pemanasan 1200 °C, Nb pada baja HSLA akan larut pada fasa austenit dan kemudian pada saat pendinginan akan membentuk presipitat Nb(CN). Presipitat Nb(CN) inilah yang disebut karbonitrida, sejenis karbida yang dapat menghalangi pergerakan dislokasi di batas butir sehingga akan terjadi penguatan pada baja HSLA. Unsur niobium dapat membentuk presipitat Nb(CN) sebab unsur ini memiliki afinitas yang tinggi terhadap carbón (C) serta nitrogen (N). Unsur selain niobium yang memiliki pengaruh serupa adalah Vanadium (V) dan Titanium (Ti).

Unsur-unsur seperti niobium, vanadium, dan titanium ternyata membentuk senyawa logam M(CN) yang stabil, yaitu senyawa logam yang tidak larut pada fasa austenit, misalnya presipitat Nb(CN) yang larut dalam jumlah yang sedikit pada temperatur 920<sup>0</sup>C (fasa austenit). Precipita yang larut ini tidak akan menimbulkan efek penguatan (*precipitation hardening*), Namun sebagian besar dari presipitat yang tidak larut ini akan mengunci pergerakan batas butir austenit selama rekristalisasi sehingga mencegah pertumbuhan butir austenit dan menghasilkan butir ferit yang halus. Irvine dkk<sup>13)</sup> telah menemukan temperatur kelarutan presipitat Nb(CN) melalui persamaan<sup>(9,13)</sup> :

$$\log [\text{Nb}] \left[ \text{C} + \frac{12}{14} \text{N} \right] = 2.26 - \frac{6770}{T_s} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana,  
 [Nb] dan [C+12/14N] adalah konsentrasi keseimbangan dari Nb, C, dan N dalam larutan matriks (%berat) pada temperatur absolut.  
 Ts adalah Temperatur Kelarutan Nb(CN) (<sup>0</sup>K).

Niobium dalam bentuk presipitat Nb(CN) juga dapat mempengaruhi butir austenit. Jika presipitat Nb(CN) tidak larut selama pemanasan, maka pertumbuhan austenit tidak terjadi. Hal itu terjadi karena partikel presipitat dalam matriks austenit akan mengunci pergerakan batas butir austenit. Larutnya partikel presipitat itu diawali dengan terjadinya pengkasaran butir pada *grain coarsening temperature*. Temperatur pengkasaran butir tersebut dihitung melalui persamaan yang telah ditentukan oleh L.J Cuddy dkk<sup>15)</sup>.

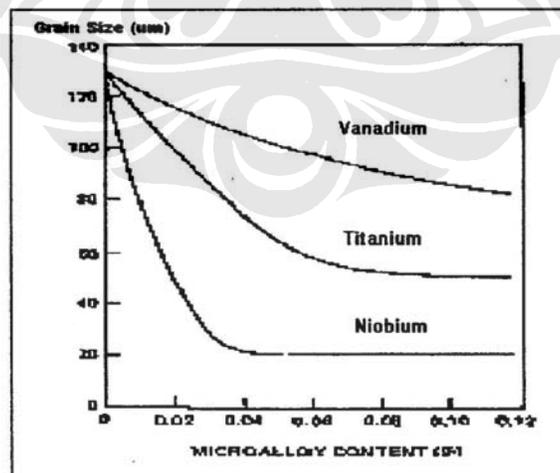
$$T_{gc} = A+B (T_s - 273) \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana,  
 T<sub>gc</sub> adalah temperatur pengkasaran butir  
 T<sub>s</sub> adalah temperatur kelarutan presipitat, yang nilainya dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1

**Tabel 2.1.** Konstanta kelarutan dan pengkasaran butir<sup>(15)</sup>

Presipitat	Solubility Constant		Grain Coarsening Constant	
	F	Q (°K)	A(°C)	B
Al(N)	1.03	6770	385	0.535
V(N)	3.63	8700	616	0.376
Ti(N)	3.82	15020	-279	0.889
Nb(CN)	2.26	6770	460	0.659

Presipitat Nb(CN) akan larut seluruhnya ke dalam fasa austenit apabila dipanaskan diatas temperatur kelarutannya sehingga tidak ada lagi yang menghambat pertumbuhan butir dan lebih lanjutnya, butir akan bertambah besar dengan cepat. Penambahan unsur niobium untuk mencegah perbesaran butir selama proses *rolling* lebih efektif dibandingkan presipitat vanadium V(CN). Dengan kelarutan yang semakin rendah, maka akan semakin banyak presipitat yang tidak larut pada fasa austenit yang dapat mencegah pertumbuhan butir austenit, sehingga akan semakin banyak pula dihasilkan butir ferit yang halus.



**Gambar 2.3** Pengaruh unsur paduan (Niobium, Vanadium, dan Titanium) terhadap ukuran butir ferit<sup>(16)</sup>

### II.3 PENGHALUSAN BUTIR FERIT

Niobium merupakan paduan yang paling efektif untuk penghalusan butir melalui proses pengerolan terkendali (*controlled rolling*). Pada permulaan canai panas (*hot rolling*), semua unsur Nb, C, dan N akan larut dalam fasa austenit, namun akan terbentuk presipitat kembali pada saat temperatur pengerolan turun. Presipitat Nb(CN) yang terbentuk ini dipengaruhi oleh regangan atau sering disebut *Strain-induced Nb(CN) precipitation*<sup>16)</sup>. Adanya presipitat ini pada butir austenit yang terdeformasi akan menghambat rekristalisasi dengan cara menghasilkan inti dalam jumlah besar pada austenit yang terdeformasi sehingga akan dihasilkan butir ferit yang halus selama pendinginan. Namun adanya presipitat ini dalam butir austenit yang terdeformasi ini baru terbentuk apabila dibawah temperatur 900 °C, sebab pada temperatur dibawah 900°C, pembentukan presipitat jauh lebih cepat dibandingkan rekristalisasi. Sehingga semakin banyak terbentuk austenit yang terdeformasi yang mengandung presipitat maka ukuran butir ferit semakin kecil akibatnya sifat mekanis akan semakin baik.

Partikel yang terbentuk pada temperatur tinggi dalam austenit walaupun efektif untuk kontrol pertumbuhan butir, namun tidak akan menyebabkan penguatan karena partikel tersebut terlalu besar.

Partikel yang menyebabkan penguatan adalah partikel yang terbentuk pada temperatur rendah dalam austenit, pada transformasi ferit ke austenit.

### II.4 TRANSFORMASI AUSTENIT MENJADI FERIT

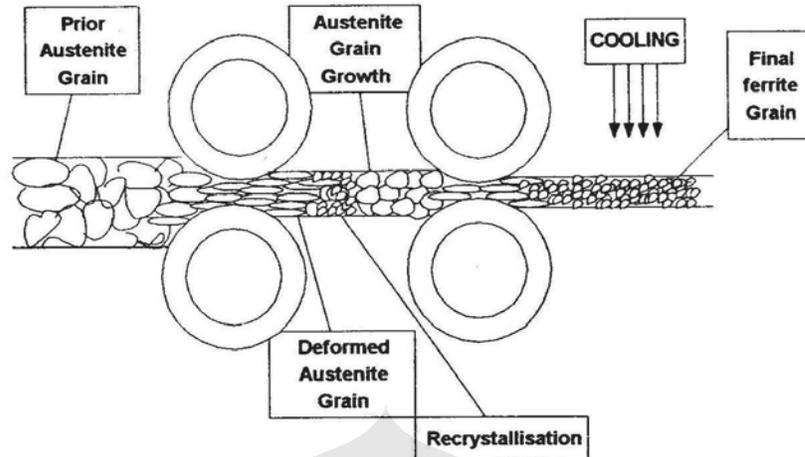
Pada proses transformasi, ferit akan terbentuk selama pendinginan. Pembentukan ferit diawali dengan nukleasi ferit. Adapun tempat-tempat potensial untuk nukleasi ferit diantaranya:

- a. Batas butir austenit, yang merupakan tempat nukleasi ferit terutama pada sisi-sisi butir.

- b. Nukleasi ferit terjadi secara teratur sepanjang batas butir austenit, dimungkinkan karena merupakan tempat yang mempunyai energi yang lebih tinggi karena merupakan cacat kristal. Nukleasi yang lebih sering akan terjadi pada austenit yang terdeformasi.
- c. Pita-pita deformasi, yang merupakan tempat nukleasi ferit intergranular. Pita-pita deformasi merupakan tempat untuk nukleasi ferit. Namun tidak semua pita-pita deformasi potensial dan efektif sebagai tempat nukleasi.
- d. Partikel fasa kedua. Partikel fasa kedua yaitu karbida atau nitrida yang tidak larut merupakan tempat nukleasi.
- e. Sub batas butir, nukleasi yang terjadi pada sub batas butir ini hanya terjadi jika deformasi sub struktur tanpa *recovery*. *Recovery* yang minimal menyebabkan ferit akan potensial untuk ternukleasi. Jadi dengan deformasi yang kecil, sub struktur akan tererecovery dan terbentuk struktur butir ferit karena adanya nukleasi intergranular. Waktu penahanan pada temperatur tertentu yang lebih singkat menghasilkan nukleasi intergranular yang lebih banyak sehingga terbentuk ferit yang lebih seragam, hal ini dipengaruhi oleh partikel presipitat fasa kedua yang mampu menghambat *recovery* dan menghasilkan potensial nukleasi sub batas butir yang tinggi.
- f. Batas butir kembaran, yang terjadi karena energi yang rendah, maka batas butir kembaran yang koheren bertindak sebagai tempat nukleasi ferit.

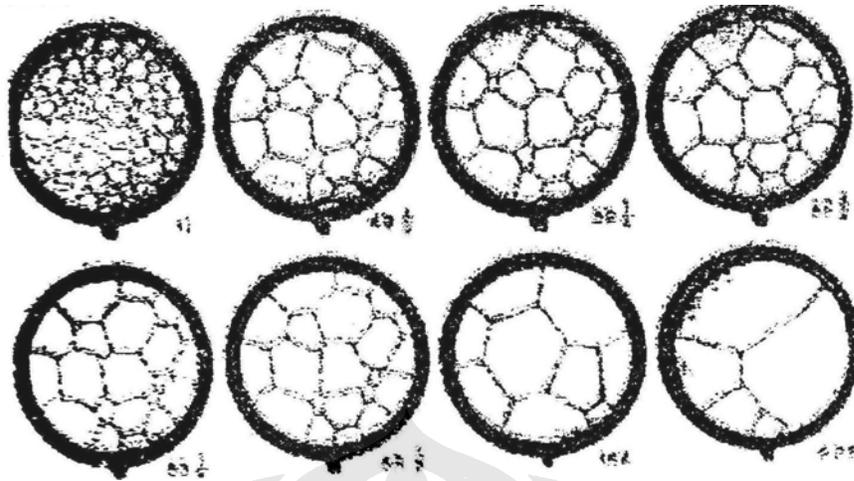
## **II.5 THERMOMECHANICAL PROCESSING**

*Thermomechanical processing* adalah suatu proses yang dapat mengontrol mikrostruktur suatu material selama pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*Hot rolling*), serta transformasi akhir dimana akhirnya akan menghasilkan sifat mekanis yang baik.



**Gambar 2.4** Perubahan mikrostruktur yang terjadi selama TMCP <sup>(17)</sup>

Secara umum, *thermomechanical processing* terdiri dari pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*Hot rolling*) serta pendinginan (*cooling*). Proses pemanasan ini sangat penting dalam menghasilkan sifat mekanis benda jadi sebab dengan pemanasan awal dapat diprediksi mikrostruktur akhir yang terbentuk. Untuk menghasilkan butir ferit dengan ukuran yang halus di akhir proses, maka butir austenit juga harus dibuat menjadi halus. Pengontrolan butir austenit ini terjadi pada saat proses pemanasan awal. Hal yang mempengaruhi pertumbuhan besar butir austenit yaitu temperatur reheating dan waktu tahan. Makin tinggi temperatur, maka ukuran butir menjadi semakin besar. Begitu juga halnya waktu tahan, makin lama waktu tahan, maka besar butir austenit menjadi semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin tinggi temperatur dan waktu tahan, maka kemampuan butir untuk berdifusi ke butir lainnya menjadi semakin besar pula.

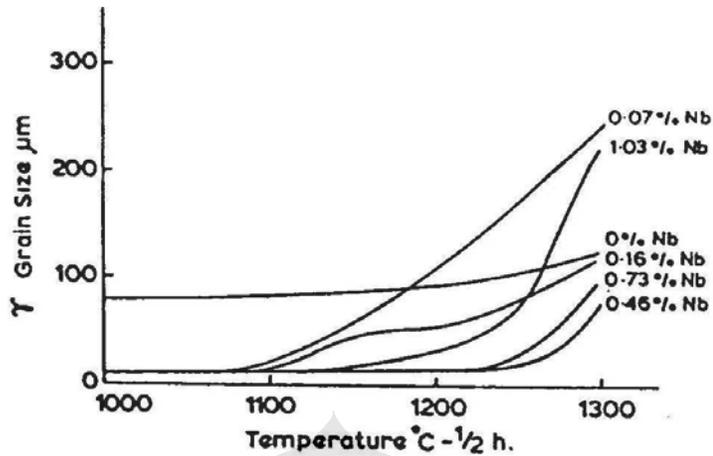


**Gambar 2.5** Proses pertumbuhan butir sejalan dengan peningkatan waktu <sup>(18)</sup>

## **II.6. PENGENDALIAN UKURAN BUTIR DENGAN *CONTROLLED ROLLING***

Mekanisme penghalusan butir utama dalam pengerolan terkendali (*controlled rolling*) adalah rekristalisasi pada austenit selama deformasi panas. Proses ini dipengaruhi oleh komposisi paduan, temperatur pengerolan, dan derajat deformasi yang berlangsung selama pengerolan. Bila austenit tidak memiliki partikel fasa kedua maka dihasilkan pertumbuhan butir yang nyata sehingga mekanisme penghalusan butir menjadi terbatas.

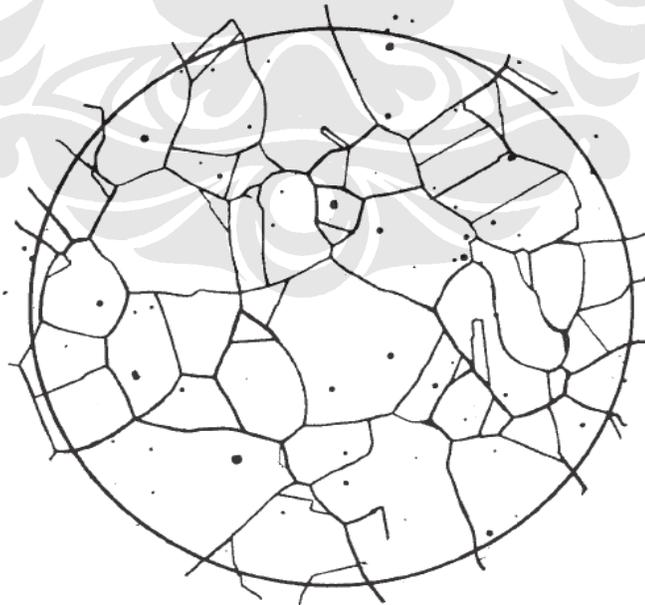
Partikel presipitat dalam matriks austenit akan mengunci pergerakan batas butir austenit yang terekristalisasi. Selain itu dalam pemanasan, partikel presipitat akan menghambat pertumbuhan butir austenit sampai tercapai ukuran partikel kritis sebagai ukuran maksimum bagi partikel untuk bertindak efektif sebagai penghambat pertumbuhan butir austenit. Dengan meningkatnya temperatur maka ukuran partikel presipitat bertambah sebelum akhirnya melarut seluruhnya. Oleh karena itu baja HSLA menunjukkan perilaku pertumbuhan butir yang tidak normal selama pemanasannya. Hal ini ditandai dengan adanya pengkasaran butir austenit. Gambar dibawah ini menunjukkan perilaku butir austenit selama pemanasan pada baja HSLA – Nb.



Gambar 2.6. Pengkasaran butir austenit selama pemanasan <sup>(19)</sup>

## II.7 PERHITUNGAN BESAR BUTIR

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mengukur besar butir dari struktur mikro suatu material salah satunya adalah metode *jefferies* atau biasa disebut dengan planimetri. Metode ini melibatkan jumlah butir yang terdapat dalam suatu area tertentu dilambangkan dengan  $N_A$ . Secara skematis proses perhitungan menggunakan metode ini adalah sebagai berikut.



Gambar 2.7. Ilustrasi perhitungan butir menggunakan metode planimetri. <sup>(7)</sup>

Menurut standar yang telah ditetapkan oleh ASTM E112 perhitungan butir dilakukan dalam sebuah lingkaran yang memiliki luas 5000 mm<sup>2</sup> atau memiliki diameter sebesar 79.8 mm. Kemudian jumlah butir di dalam lingkaran dan yang berada diluar lingkaran dihitung selanjutnya disubstitusikan ke dalam persamaan berikut.

$$N_A = f \left( N_{\text{Inside}} + \frac{N_{\text{Intercepted}}}{2} \right) \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan besar pengali jefferies tergantung dari perbesaran yang digunakan dijelaskan pada tabel 2.1 berikut.

**Tabel 2.2.** Pengali *jefferies* yang digunakan dalam perhitungan besar butir <sup>(7)</sup>

Magnification Used, <i>M</i>	Jeffries' Multiplier, <i>f</i> , to Obtain Grains/mm <sup>2</sup>
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75 <sup>A</sup>	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

Berdasarkan standar ASTM E112 pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali untuk kemudian diambil nilai rata-ratanya.

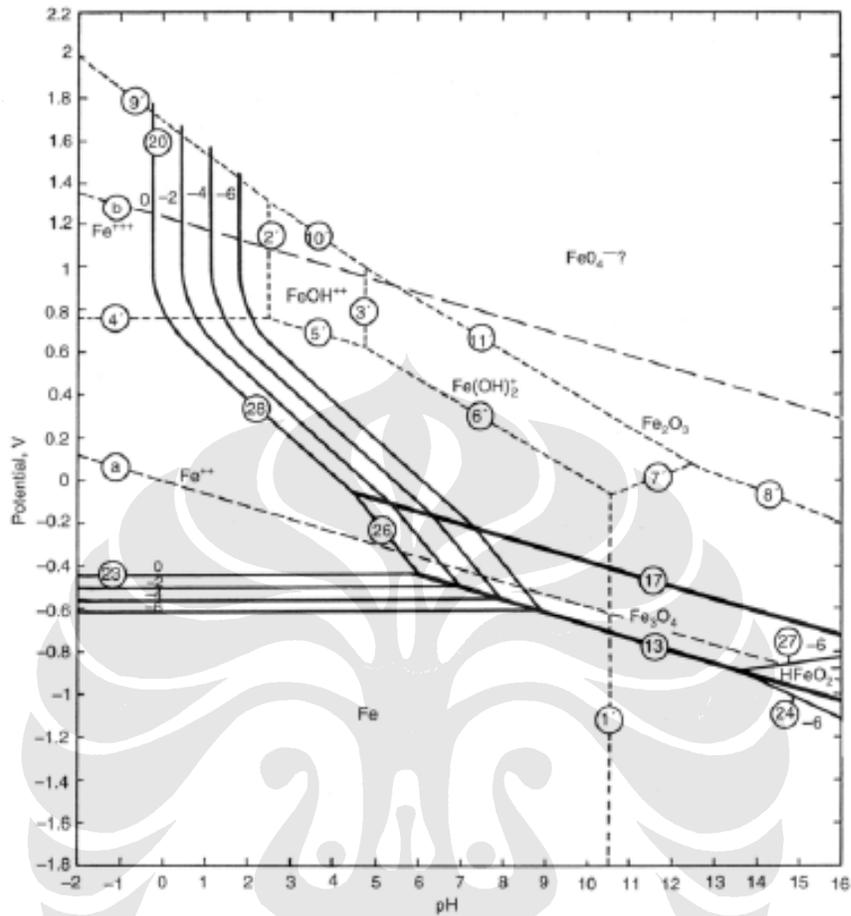
## II.8. PENGERTIAN UMUM KOROSI ELEKTROKIMIA

Korosi secara umum didefinisikan sebagai bereaksinya suatu material dengan lingkungannya. Sebagai akibat maka material tersebut bisa mengalami perubahan sifat, baik sifat fisik maupun sifat mekaniknya. Korosi pada logam terjadi karena adanya reaksi elektrokimia dengan lingkungannya dan mengakibatkan degradasi dari sifat-sifat logam tersebut.

Korosi logam secara sederhana dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu: Korosi basah (*aqueous corrosion*) dan korosi kering/korosi temperatur tinggi (*oxidation corrosion*). Pada korosi basah, akan ditimbulkan arus listrik sehingga jenis korosi ini disebut sebagai korosi elektrokimia. Hal ini mudah terjadi pada logam karena logam merupakan penghantar listrik yang baik, akibatnya logam akan bereaksi secara elektrokimia membentuk senyawa yang sejenis dengan bentuknya semula di alam.

### II.8.1 Termodinamika Korosi

Termodinamika adalah suatu ilmu yang mempelajari perubahan energi dalam suatu system. Dalam suatu sistem korosi, termodinamika dapat dipakai untuk mengetahui apakah logam dapat bereaksi secara spontan dengan lingkungannya. Dan apabila logam tersebut bereaksi, maka dapat diketahui bagaimana reaksi yang terjadi, kemana arah reaksi tersebut serta berapa besar gaya dorongnya. Korosi yang terjadi pada logam ataupun paduannya hampir seluruhnya merupakan reaksi elektrokimia yang berlangsung pada permukaan logam. Salah satu dari reaksi yang terjadi menghasilkan perubahan dari suatu logam ataupun salah satu unsur yang ada dari keadaan *metallic* menjadi ke keadaan *non metallic*. Diagram yang dapat menunjukkan suatu reaksi korosi dapat terjadi secara termodinamika adalah diagram kesetimbangan E-pH atau biasa dikenal dengan *pourbaix diagram*. Diagram ini disusun berdasarkan kesetimbangan termodinamika antara logam dengan air dan dapat menunjukkan kestabilan dari beberapa fasa secara termodinamika. Diagram ini sangat berguna untuk memprediksi suatu reaksi korosi secara termodinamika tetapi tidak dapat menyajikan informasi untuk laju korosi.



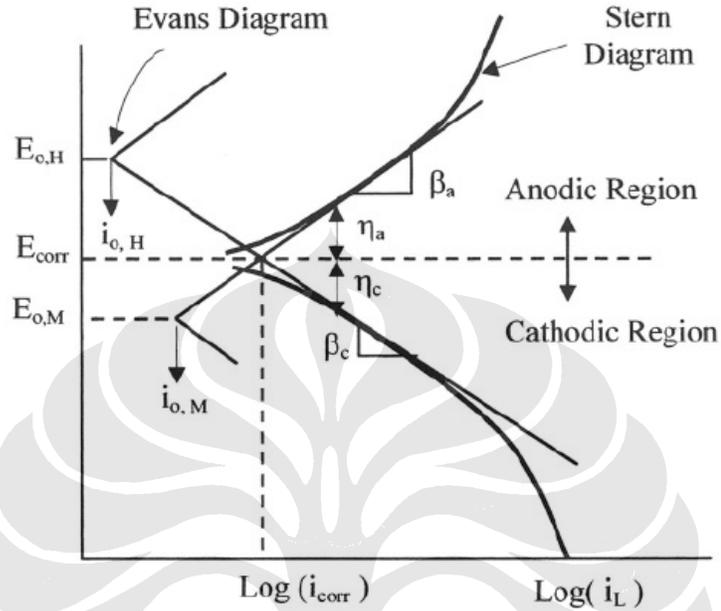
**Gambar 2.8.** Diagram kesetimbangan E-pH untuk besi dan baja <sup>(3,11)</sup>

### II.8.2. Kinetika Korosi

Untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas mengenai sistem korosi, seperti besarnya laju korosi, diperlukan pengetahuan mengenai kinetika dari reaksi korosi. Kinetika korosi adalah suatu yang berhubungan langsung dengan laju korosi, yaitu kecepatan proses korosi dari suatu material. Dalam mempelajari hal ini perlu dipahami mengenai pengertian yang berhubungan dengan kinetika korosi seperti anoda, katoda, polarisasi dan *overpotensial*. Anoda merupakan tempat terjadinya oksidasi katoda merupakan tempat terjadinya reduksi.

Bila elektroda dihubungkan maka akan terjadi proses oksidasi dan reduksi pada permukaan elektroda sehingga potensial elektroda tidak berada pada potensial kesetimbangannya. Penyimpangan potensial ini disebut dengan polarisasi.

Gambar 2.9 dibawah ini menunjukkan kesetimbangan kinetika reaksi anoda dan katoda dari suatu logam.



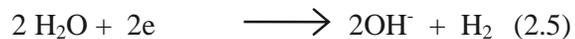
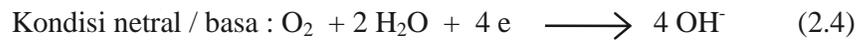
**Gambar 2.9** Diagram Evans <sup>(11)</sup>

Secara teori reaksi pelarutan logam pada suatu larutan bisa disebut sebagai reaksi bolak balik (reversible), dengan notasi reaksi sebagai berikut :



Secara umum reaksi-reaksi korosi dapat dituliskan sebagai berikut:

- (1). Pada daerah katoda dapat terjadi reaksi-reaksi reduksi :



### II.8.3. Pengukuran Laju Korosi

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur laju korosi adalah metode kehilangan berat (*Weight Loss*). Metode ini dilakukan dengan cara mencelupkan benda uji ke dalam media yang korosif. Perbedaan berat benda uji sebelum dan sesudah proses pencelupan dihitung untuk menentukan laju korosi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$MPY = \frac{k \cdot W}{D \cdot A \cdot T} \dots \dots \dots (2.4)$$

W adalah kehilangan berat benda uji (g) ; D adalah berat jenis benda uji (gr/cm<sup>3</sup>) ; A adalah luas permukaan benda uji (cm<sup>2</sup>) dan T adalah waktu pencelupan (jam).

**Tabel 2.3** Konstanta *k* yang digunakan untuk perhitungan laju korosi <sup>(6)</sup>

Corrosion Rate Units Desired	Constant ( <i>k</i> ) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	$3.45 \times 10^6$
inches per year (ipy)	$3.45 \times 10^3$
inches per month (ipm)	$2.87 \times 10^2$
millimetres per year (mm/y)	$8.76 \times 10^4$
micrometres per year ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$8.76 \times 10^7$
picometres per second (pm/s)	$2.78 \times 10^8$
grams per square metre per hour ( $\text{g}/\text{m}^2\text{-h}$ )	$1.00 \times 10^4 \times D^4$
milligrams per square decimetre per day (mdd)	$2.40 \times 10^8 \times D^4$
micrograms per square metre per second ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{-s}$ )	$2.78 \times 10^8 \times D^4$

### II.8.4. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Korosi

Fenomena korosi dipengaruhi oleh banyak faktor, yang dapat diklasifikasikan menjadi 4 kategori. Korosi disebabkan oleh adanya beberapa faktor secara simultan sebagai suatu hasil reaksi antara logam dan paduannya dengan lingkungan yang korosi. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi laju korosi ditunjukkan oleh tabel 2.3 dibawah. Salah satu faktor yang mempengaruhi laju korosi adalah mikrostruktur. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa korosi dipengaruhi oleh termodinamika dan kinetika korosi. Sesuai dengan persamaan 2.4 dibawah ini.

$$\Delta G = -nF\Delta E \dots\dots\dots(2.5)$$

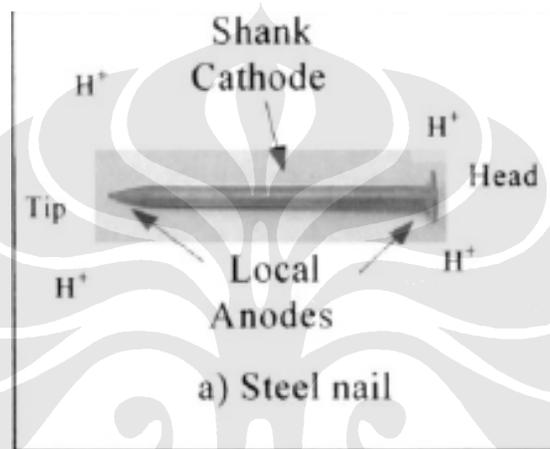
Potensial yang lebih besar adalah berada pada batas butir ( $E_{e(\text{batas butir})} > E_{e(\text{butir})}$ ), oleh karena itu material yang memiliki ukuran butir lebih halus cenderung memiliki laju korosi yang lebih besar dibandingkan material dengan butir yang kasar.

**Tabel 2.4.** Faktor-Faktor yang mempengaruhi korosi

Faktor Lingkungan	Faktor Metalurgis	Faktor Kondisi Pengerjaan	Faktor Ketergantungan Waktu
Konsentrasi Reaktif Kadar Oksigen pH lingkungan Temperatur Tekanan	Komposisi paduan  Proses persiapan  Pengotor Perlakuan Panas Paduan Perlakuan Mekanik	Keadaan Permukaan  Bentuk benda  Pengerjaan Mekanik Penambahan Inhibitor Cara Perakitan	<i>Aging</i>  Kekuatan Tarik  Temperatur Modifikasi lapisan pelindung

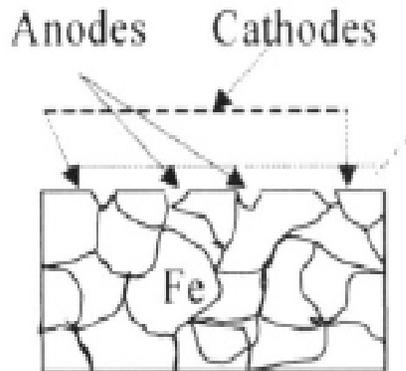
### II.8.5 Pengaruh Mikrostruktur Terhadap Korosi

Logam yang terdeformasi secara mekanis dapat mengalami korosi galvanis yang diakibatkan adanya perbedaan distorsi dan kerapatan dislokasi di dalam atom. Secara umum dislokasi dapat diartikan sebagai cacat kristal. Gambar 2.10 dibawah ini menunjukkan contoh dari korosi galvanis yang dialami oleh paku.



**Gambar 2.10.** Contoh kasus sel galvanis yang disebabkan deformasi mekanis<sup>(20)</sup>

Bagian ujung paku bertindak sebagai anoda dimana reaksi oksidasi terjadi. Daerah ini menjadi anodik dikarenakan memiliki nilai tegangan yang lebih tinggi. Kasus ini merupakan contoh dari material yang mengalami pengerasan regangan yang menyebabkan material ini rentan terhadap korosi galvanik. Proses perlakuan panas atau *heat treatment* juga dapat menyebabkan ketidakseragaman mikrostruktur dalam suatu material. Dalam struktur suatu material korosi galvanis juga dapat terjadi antara butir dan batas butir. Gambar 2.11 menunjukkan fenomena korosi galvanis di dalam struktur mikro.



**Gambar 2.11.** Sel Galvanis Mikro<sup>(20)</sup>

Korosi galvanis dapat terjadi pada paduan polikristalin, contohnya baja perlitik. Perbedaan mikrostruktur dapat menyebabkan sel galvanis mikro. Pada fasa perlit misalnya, sel galvanis dapat terjadi antara ferit dan sementit karena masing-masing fasa memiliki energi bebas dan potensial yang berbeda. Perbedaan inilah yang menyebabkan terbentuknya anoda dan katoda yang dapat mengakibatkan korosi.