

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 BAJA HIGH STRENGTH LOW ALLOY (HSLA)

Menurut *American Society for Metals*<sup>[1]</sup>, baja HSLA merupakan jenis baja yang memiliki kandungan karbon rendah serta unsur paduan yang sangat rendah (umumnya kurang dari 15%) dimana paduan ini menghasilkan kekuatan luluh (*yield strength*) diatas 275 MPa pada kondisi *as rolled* atau normalisasi. Baja HSLA, atau *microalloyed steel*, dibuat untuk menghasilkan sifat mekanis yang baik serta mempunyai ketahanan yang lebih baik terhadap korosi atmosferik dari pada baja karbon konvensional. Komposisi kimia dari baja HSLA berbeda-beda untuk setiap produk dengan ketebalan yang berbeda sehingga menghasilkan sifat mekanis yang diinginkan. Baja HSLA mempunyai kandungan karbon yang rendah (0,05 ~ 0,25% C) sehingga mampu bentuk dan mampu las dari baja ini lebih baik dari baja karbon rendah (*mild steel*). Baja HSLA memiliki kandungan mangan hingga mencapai 2%. Untuk kombinasi biasanya ditambahkan sedikit kromium, nikel, molybdenum, tembaga, dan zirkonium. Penggunaan *microalloyed* niobium dan vanadium ditambah dengan proses pengerolan yang terkendali akan meningkatkan kekuatan luluh, ketangguhan, serta memperbaiki sifat mampu las. Baja HSLA dapat dibagi menjadi 7 kategori sebagai berikut<sup>[1]</sup>:

1. *Weathering Steel*, yaitu baja HSLA yang mengandung sejumlah kecil unsur paduan seperti tembaga dan fosfor yang berfungsi meningkatkan ketahanan korosi serta penguat *solid solution*.
2. *Microalloyed Ferrite-Pearlite Steel*, yaitu baja HSLA yang mengandung unsur paduan kurang dari 0,1% seperti niobium, vanadium, dan titanium sebagai pembentuk karbida yang kuat atau pembentuk karbon-nitrida. Unsur-unsur paduan ini berfungsi untuk penguatan presipitat, penghalusan butir, serta untuk mengontrol temperatur transformasi.
3. *As Rolled Pearlitic Steel*, yaitu baja HSLA yang mengandung unsur karbon-mangan serta penambahan sejumlah kecil unsur paduan lain untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, mampu bentuk serta mampu las.

4. *Acicular Ferrite (Low Carbon Bainite) Steel*, yaitu baja HSLA dengan kandungan karbon rendah (kurang dari 0,08%) tetapi memiliki kekuatan luluh yang tinggi serta sifat mampu las, mampu bentuk, dan ketangguhan yang baik.
5. *Dual Phase Steel*, yaitu baja HSLA yang memiliki mikrostruktur pulau-pulau martensit yang tersebar dalam matriks ferit sehingga mempunyai sifat kombinasi antara keuletan yang baik dengan kekuatan tarik yang tinggi.
6. *Inclusion Shape Controlled Steel*, yaitu baja HSLA yang memiliki keuletan serta ketangguhan yang baik karena adanya sedikit unsur paduan kalsium (Ca), zirkonium (Zr), titanium (Ti) serta logam tanah jarang (*rare earth*) sehingga dapat mengubah bentuk sulfida dari bentuk balok menjadi bentuk yang hampir bulat, kecil serta tersebar.
7. *Hydrogen-Induced Cracking Resistant*, yaitu baja HSLA yang memiliki kandungan karbon (C) dan mangan (Mn) yang rendah, bentuk inklusi yang terkontrol serta kandungan tembaga (Cu) yang lebih besar dari 0,026%.

Komposisi baja HSLA berbeda-beda tergantung penggunaannya. Penambahan unsur paduan akan memberikan pengaruh yang berbeda-beda terhadap sifat mekanisnya. Berikut ini beberapa unsur paduan yang sering ditambahkan pada baja HSLA:

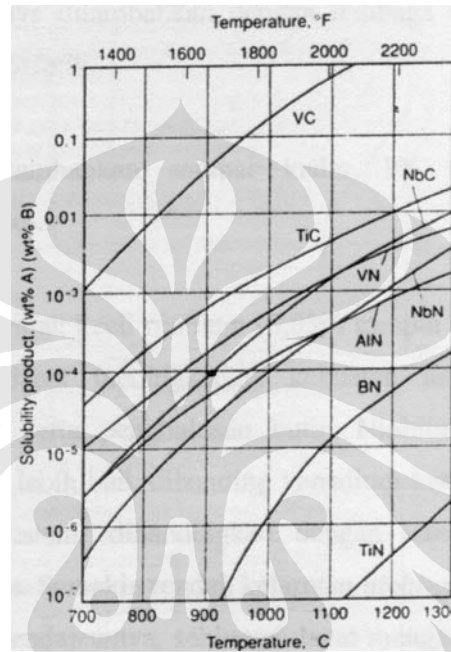
1. Karbon (C)

Karbon meningkatkan jumlah perlit dalam mikrostruktur. Makin tinggi kadar karbon akan menurunkan mampu las dan ketangguhan. Kandungan karbon maksimal pada baja HSLA *as rolled* ialah 0,2%. Semakin tinggi kadar karbon, maka cenderung terbentuk martensit serta bainit pada mikrostruktur hasil pengerolan. Kekuatan material ini disebabkan oleh<sup>[1]</sup>:

- Ukuran butir ferit yang halus dari hasil pengerolan yang terkendali (*controlled rolling*) serta adanya unsur paduan mikro (*microalloyed*) khususnya niobium.
- Penguatan presipitat oleh unsur Vanadium, Niobium, serta Titanium.

## 2. Nitrogen (N)

Penambahan nitrogen pada baja yang mengandung vanadium dapat meningkatkan penguatan presipitat dimana dengan adanya presipitat akan menghalangi dislokasi batas butir sehingga dihasilkan butir ferit yang halus. Semakin tinggi temperatur, kelarutan presipitat akan semakin meningkat.



Gambar 2.1 Grafik kelarutan beberapa karbonitrida dalam austenit terhadap temperatur<sup>[1]</sup>

## 3. Mangan (Mn)

Fungsi utamanya adalah sebagai penguat larutan padat (*solid solution strengthening*) pada ferit serta menurunkan temperatur transformasi austenite-ferit.

## 4. Silikon (Si)

Kandungan silikon maksimal yaitu sebesar 0,035%. Silikon mempunyai pengaruh yang cukup signifikan dalam penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*).

## 5. Tembaga (Cu)

Penambahan tembaga lebih dari 0,5% meningkatkan kekuatan baik pada baja karbon rendah maupun medium dengan sedikit penurunan keuletan.

6. Phospor (P)

Phospor merupakan penguat ferit yang efektif dengan penguatan solid solution. Phospor dapat meningkatkan ketahanan korosi namun menurunkan keuletan. Pada kadar rendah (kurang dari 0,05%) dapat menyebabkan *embrittlement* karena segregasi pada batas butir austenite prior.

7. Kromium (Cr)

Kromium biasanya ditambahkan dengan tembaga untuk meningkatkan ketahanan korosi atmosferik.

8. Nikel (Ni)

Nikel dapat ditambahkan sampai kadar 1% sampai 5% untuk meningkatkan kekuatan.

9. Niobium (Nb)

Penambahan sejumlah kecil niobium (0,03% sampai dengan 0,05%) pada baja *microalloyed* dapat meningkatkan kekuatan luluh dengan adanya penguatan presipitat dan serta penghalusan butir. Niobium merupakan unsur penghalusan butir yang lebih baik daripada vanadium karena *niobium-carbide* lebih stabil pada austenit dibandingkan dengan *vanadium-carbide* pada temperatur pengerolan. Semakin rendah kelarutan *niobium-carbide* di austenit, maka semakin stabil endapannya, sehingga dapat mengunci pergerakan batas butir austenit dan menghambat pertumbuhan butir austenit tersebut.

10. Vanadium (V)

Vanadium berfungsi untuk meningkatkan kekuatan baja HSLA dengan mekanisme penguatan presipitat pada ferit serta memperhalus ukuran butir ferit.

11. Titanium (Ti)

Titanium berfungsi untuk penguatan presipitat. Penambahan sejumlah kecil titanium (kurang dari 0,025%) dapat membatasi pertumbuhan butir austenit.

### 2.1.1 Baja HSLA Nb

Baja HSLA Nb termasuk dalam jenis baja HSLA *microalloyed ferrite-pearlite*, dimana unsur niobium akan meningkatkan kekuatan luluh dengan cara penguatan presipitat, yang besarnya peningkatan kekuatan tersebut bergantung pada ukuran serta jumlah dari presipitat *niobium-carbide*.

Penguatan unsur paduan niobium dalam jumlah yang sangat kecil lebih baik dibandingkan dengan vanadium sebab niobium dapat memberikan efek penguatan presipitat sekaligus penghalusan butir. Tiap penambahan 0,01% Nb akan meningkatkan kekuatan sebesar 35-40 Mpa. Peningkatan kekuatan akan diikuti dengan peningkatan ketangguhan. Temperatur akhir yang tinggi harus dihindari dari baja jenis ini, sebab akan menghasilkan struktur widmanstatten ferit, yang akan mengurangi ketangguhan<sup>[1]</sup>.

### 2.1.2 Penguatan Presipitat Nb

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<sup>[2]</sup>. 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 *carbonitride*, 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 karbon (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°C (fasa austenit). Presipitat 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>[3]</sup> telah menemukan temperatur kelarutan presipitat Nb(CN) melalui persamaan :

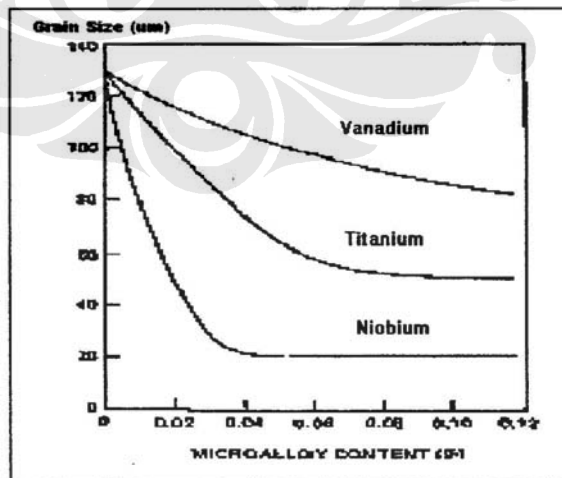
$$\log [\text{Nb}] \left[ \text{C} + \frac{12}{14} \text{N} \right] = 2.26 - \frac{6770}{T_s} \quad (2.1)$$

Dimana,

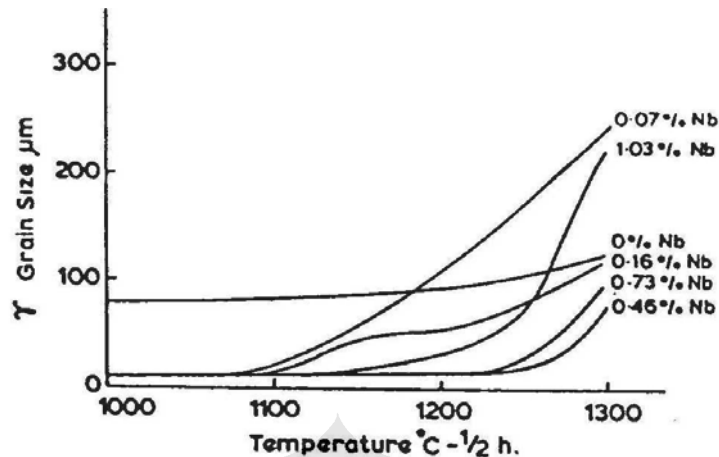
[Nb] dan [C+12/14N] adalah konsentrasi keseimbangan dari Nb, C, dan N dalam larutan matriks (%berat) pada temperatur absolut.  $T_s$  adalah Temperatur Kelarutan Nb(CN) ( $^{\circ}\text{K}$ ).

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 2.2 Pengaruh paduan (Nb, V, dan Ti) terhadap ukuran butir ferit<sup>[3]</sup>.



Gambar 2.3. Pengkasaran butir austenit selama pemanasan<sup>[3]</sup>

### 2.1.3 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*. 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.

## 2.2 BAJA KARBON<sup>[4]</sup>

Baja karbon merupakan logam paduan yang merupakan kombinasi dari besi dan karbon dan paduan elemen lain yang jumlahnya tidak terlalu banyak untuk dapat mempengaruhi sifatnya. Komposisi baja karbon biasanya mengandung tidak lebih dari 1.0% karbon (C) serta sejumlah kecil paduan seperti mangan (Mn) dengan kadar maksimal 1,65%, silikon (Si) dengan kadar maksimal 0,6% dan tembaga (Cu) dengan kadar maksimal 0,6%. Baja dengan kadar karbon yang rendah memiliki sifat yang sama dengan besi, lunak dan mudah dibentuk. Meningkatnya kandungan karbon menjadikan logam lebih keras dan kuat namun keuletannya berkurang dan lebih sulit untuk di las. Baja karbon dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian menurut kadar karbon yang dikandungnya, yaitu baja karbon rendah dengan kadar karbon kurang dari 0,3 %, baja karbon sedang mengandung 0,3 – 0,6 % karbon, dan baja karbon tinggi mengandung 0,6 – 1,0 % karbon.

### 2.2.1 Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah mengandung kurang dari 0,3 % karbon. Kebanyakan dari produk baja ini berbentuk pelat hasil pembentukan canai dingin dan proses *anneal*. Kandungan karbonnya yang rendah dan mikrostrukturnya yang terdiri dari fasa ferit dan pearlit menjadikan baja karbon rendah bersifat lunak dan kekuatannya lemah namun keuletan dan ketangguhannya sangat baik. Baja karbon rendah kurang responsif terhadap perlakuan panas untuk mendapatkan mikrostruktur martensit maka dari itu untuk meningkatkan kekuatan dari baja karbon rendah dapat dilakukan dengan proses canai dingin maupun karburisasi<sup>[5]</sup>. Aplikasi baja karbon rendah antara lain sebagai kerangka kendaraan, pipa, jembatan, konstruksi, dan bangunan.

Tabel 2.1 Komposisi beberapa baja karbon rendah<sup>[5]</sup>.

Jenis Material		Komposisi (wt %)*		
AISI/SAE or ASTM number	UNS number	C	Mn	Lainnya
1010	G10100	0.10	0.45	
1020	G10200	0.20	0.45	



A36	K02600	0.29	1.00	0.2 Cu
A516 grade 70	K02700	0.31	1.00	0.25 Si

\* Juga mengandung maksimal 0,04 wt% P, 0,05 wt% S, dan 0,30 wt% Si.

Tabel 2.2 Karakter mekanis dan aplikasi dari beberapa baja karbon rendah<sup>[5]</sup>

AISI/SAE or ASTM number	Tensile strength [Mpa (ksi)]	Yield strength [Mpa (ksi)]	Ductility [%EL in 50mm (2inc)]	Tipikal Aplikasi
1010	325 (47)	180 (26)	28	Panel automobil, paku dan kawat
1020	380 (55)	205 (30)	25	Pipa, konstruksi dan baja lembaran
A36	400 (58)	220 (32)	23	Konstruksi (bangunan dan jembatan)
A516 Grade70	485 (70)	260 (38)	21	Bejana tekan temperatur rendah

Tabel 2.1 dan tabel 2.2 di atas menunjukkan komposisi dan sifat mekanis dari beberapa jenis baja karbon rendah dengan tipikal kekuatan luluh (*yield strength*) sebesar 275 Mpa (40.000 psi), kekuatan tarik (*tensile strength*) antara 415 dan 550 Mpa (60.000 dan 80.000 psi), dan keuletan sebesar 25% EL

## 2.3 TRANSFORMASI PADA SAAT PENDINGINAN

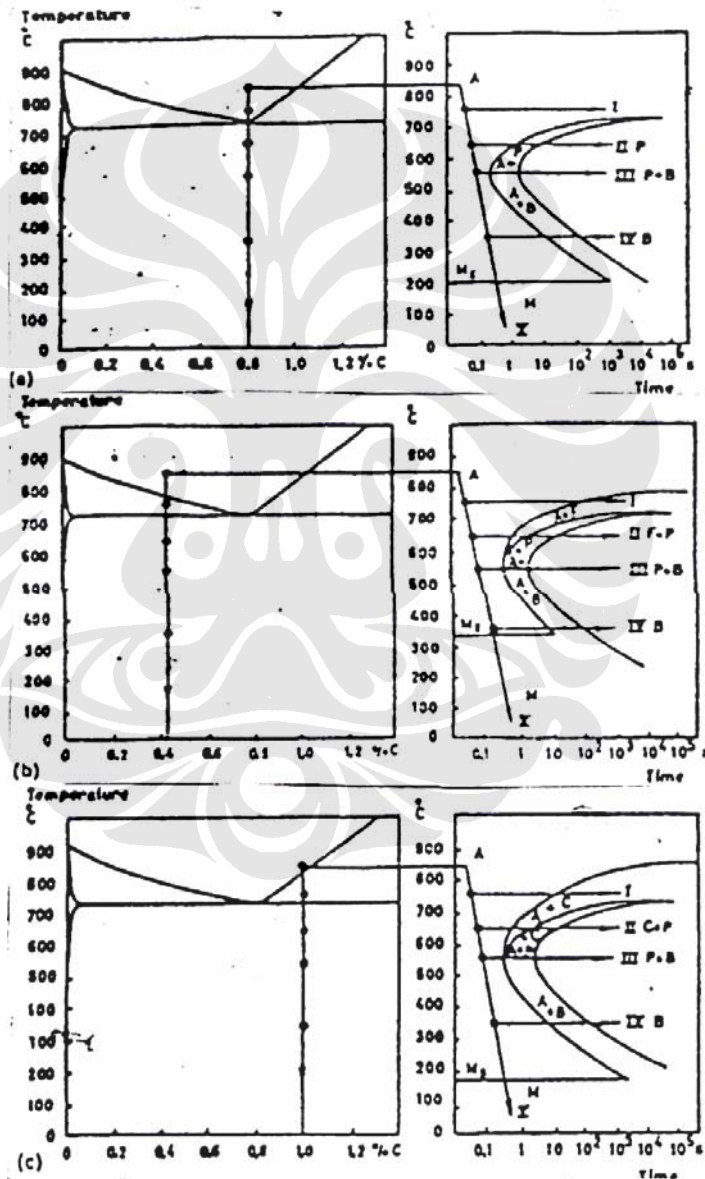
Struktur yang terbentuk pada saat pendinginan baja dari temperatur austenit pada saat proses pemanasan ulang adalah terbentuknya struktur ferit, pearlit dan martensit.

### 2.3.1 Diagram TTT

Diagram TTT (*Time Temperature Transformation*) adalah suatu diagram yang menggambarkan hubungan struktur mikro baja yang terbentuk pada saat pendinginan, dengan memperlihatkan perubahan temperatur dan waktu untuk

bertransformasi. Diagram TTT ini juga dikenal dengan sebutan Isothermal Transformation (IT) karena pembuatannya pada temperatur yang konstan.

Contoh diagram TTT untuk baja karbon dari berbagai komposisi dapat dilihat pada gambar 2.4. Terlihat bahwa untuk baja hipoeutektoid, terdapat daerah pembentukan ferit sedangkan sebaliknya pada baja hipereutektoid daerah pembentukan ferit digantikan oleh pearlit.



Gambar 2.4 Transformasi struktur mikro baja pada saat pendinginan baja (a) eutektoid (b) hipoeutektoid, dan (c) hipereutektoid<sup>[9]</sup>

## 2.3.2 Pembentukan Fasa Ferit

### 2.3.2.1 Nukleasi ferit

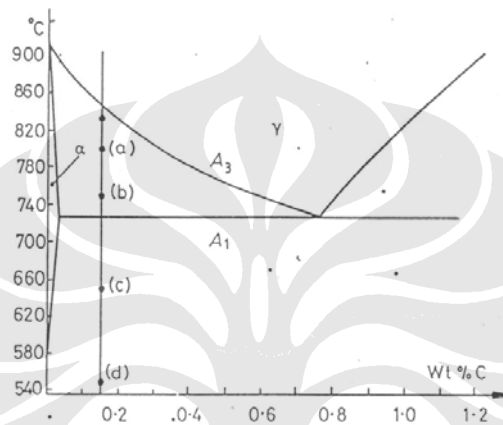
Pada proses transformasi austenit menjadi ferit, ferit akan terbentuk selama pendinginan. Pembentukan ferit diawali dengan nukleasi ferit. Tempat-tempat potensial untuk nukleasi ferit diantaranya<sup>[6]</sup>.

- a. Batas butir austenit, yang merupakan tempat nukleasi ferit terutama pada sisi-sisi butir. 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.
- b. Pita-pita deformasi, yang merupakan tempat nukleasi ferit intragranular. Pita-pita deformasi merupakan tempat untuk nukleasi ferit. Namun tidak semua pita-pita deformasi potensial dan efektif sebagai tempat nukleasi.
- c. Partikel fasa kedua. Partikel fasa kedua yaitu karbida/nitrida yang tidak larut merupakan tempat nukleasi.
- d. 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 *te-recovery* dan terbentuk struktur butir ferit karena adanya nukleasi intragranular. Waktu penahanan pada temperatur tertentu yang lebih singkat menghasilkan nukleasi intragranular 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.

Laju nukleasi selama transformasi dipengaruhi oleh *driving force* yang diperlukan. Semakin kecil *driving force* maka laju nukleasi semakin besar. Pengurangan *driving force* untuk nukleasi dapat dilakukan melalui nukleasi heterogen seperti pada batas butir, dislokasi dan inklusi. Sehingga laju nukleasi heterogen lebih tinggi dibandingkan laju nukleasi homogen yang hanya tergantung pada setiap atom untuk tempat nukleasi potensial<sup>[6]</sup>.

### 2.3.2.2 Pertumbuhan ferit<sup>[6]</sup>

Pertumbuhan ferit diawali dengan proses nukleasi dimana proses difusi karbon sangat menentukan bentuk morfologi dari struktur ferit. Sebagai contoh, baja paduan yang mengandung 0,15% C, dilakukan austenisasi lalu bertransformasi menjadi ferit pada temperatur di bawah  $A_{r3}$  (lihat gambar 2.5.), lalu dicelup dalam air.

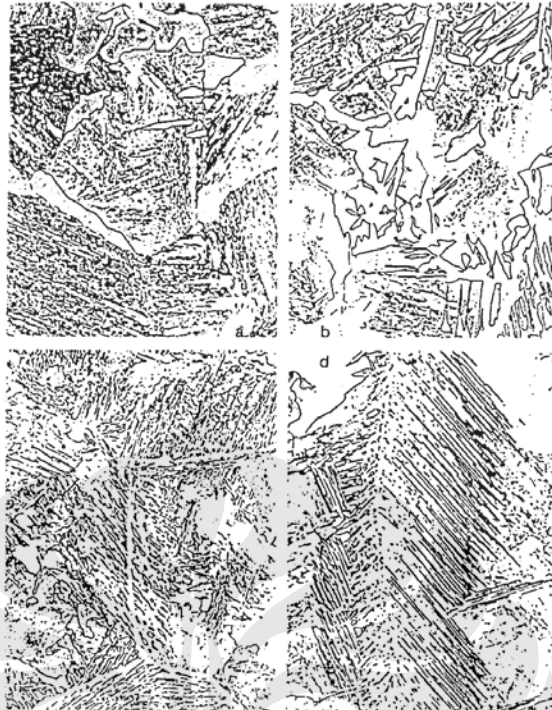


Gambar 2.5 Temperatur tahan untuk baja<sup>[6]</sup>

Struktur mikro yang terbentuk dapat dilihat pada gambar 2.6, dimana daerah penampakan yang putih adalah ferit ( $\alpha$ ) sedangkan penampakan berwarna kelabu adalah martensit yang terbentuk dari austenit ( $\gamma$ ) yang tidak bertransformasi pada saat pencelupan.

Pada pendinginan lambat (*undercooling*) dibawah temperatur  $A_3$ , ferit bernukleasi pada batas butir austenit dan tumbuh secara lokal saja dengan membentuk struktur yang disebut batas butir allotriomorf, seperti diperlihatkan pada gambar 2.6a Pada pendinginan yang lebih cepat, ada kecenderungan ferit akan tumbuh sebagai pelat yang disebut struktur widmanstatten dimana ukurannya lebih kecil (halus), seperti diperlihatkan pada gambar 2.6b,c dan d.

Ferit juga dapat tumbuh dalam matriks austenit yang disebut intragranular ferit. Struktur ferit ini cenderung seragam dengan pendinginan lambat dan berbentuk seperti plat pada pendinginan cepat.



Gambar 2.6 Mikrostruktur Fe-0,15% C alloy pada waktu tahan dan temperatur yang bebrbeda (a) 800°C selama 150 detik; (b) 750°C selama 40 detik; (c) 650°C selama 9 detik; (d) 550°C selama 2 detik<sup>[6]</sup>

### 2.3.3 Pembentukan Struktur Perlit

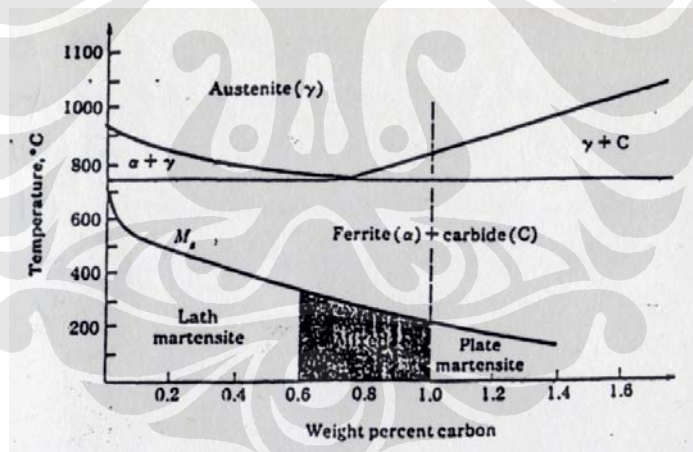
Ketika baja didinginkan dari temperatur austenisasi sampai temperatur di bawah 650 °C, pearlit akan segera terbentuk. Pembentukan struktur perlit dimulai pada daerah batas butir austenit atau daerah acak dari butir austenit. Struktur ini terbentuk dari lamel-lamel ferit dan sementit yang terjadi secara bergantian dalam laju pendinginan lambat. Struktur ini terbentuk pada daerah di atas hidung dari diagram TTT.

### 2.3.4 Pembentukan Martensit

Ketika baja berada dalam fasa austenit kemudian dilakukan pendinginanyang cepat, austenit akan mulai bertransformasi menjadi ferit garis yang disebut garis Ms (*martensite start*). Jika pendinginan diteruskan dibawah Ms, hanya sedikit karbon yang dapat keluar (migrasi) dari kisi kristal austenit.

Oleh karena ato-atom karbon tetap berada dalam larutan fasa ferit. Namun karena ruang yang akan ditempati atom karbon dalam fasa ferit lebih kecil daripada di dalam fasa austenit, maka atom karbon akan memperluas kisi kristal tersebut. Hal ini yang dinamakan distorsi dengan cara transformasi geser yang menyebabkan perubahan kisi kubus pemusatan sisi (FCC) menjadi kisi kristal tetragonal pemusatan ruang (BCT). Hal ini menyebabkan suatu keadaan dimana tegangan baja akan meningkat yang pada akhirnya kekerasan akan meningkat. Fasa baru yang terbentuk ini dinamakan martensit.

Ada dua bentuk martensit yang dikenal, yaitu *lath martensite* dan *plate martensite*. Perbedaan ini disebabkan karena kandungan karbon pada martensit. Untuk baja karbon yang mempunyai kandungan karbon sampai 0,6% akan membentuk lath martensit, kandungan karbon antara 0,6-1% akan membentuk plate martensit. Pengaruh kadar karbon terhadap pembentukan martensit dapat dilihat pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Pengaruh kandungan karbon terhadap jenis martensit<sup>[9]</sup>

## 2.4 TERMODINAMIKA KOROSI

Korosi didefinisikan sebagai kerusakan atau penurunan sifat material diakibatkan reaksi dengan lingkungannya<sup>[7]</sup>. Lingkungan tersebut dapat berupa udara, uap, air, industrial atmosfir ( steam, gas chlor, amoniak, nitrat), air laut, dan lain-lain. Pada proses korosi, reaksi-reaksi yang terjadi diatur oleh perubahan-perubahan energi. Oleh karena termodinamika adalah ilmu yang mempelajari

tentang perubahan energi, maka secara sederhana, termodinamika korosi dapat diartikan sebagai peninjauan proses korosi dilihat dari sisi perubahan energi yang terjadi.

Dalam proses korosi, energi kimia merupakan penggerak terjadinya reaksi korosi. Energi kimia ini diturunkan dari energi yang tersimpan dalam ikatan kimia zat yang disebut energi dalam (*internal energy*), namun tidak semua energi dalam tersebut dapat digunakan untuk menimbulkan reaksi korosi. Sebagian dari energi dalam yang dapat menimbulkan reaksi korosi disebut energi bebas (*free energy*).

Berdasarkan hukum kedua termodinamika, proses korosi yang terjadi secara alamiah berlangsung secara spontan disertai pelepasan energi bebas. Pada proses korosi, logam diubah kedalam suatu bentuk dengan energi bebas yang minimum.

Semua interaksi antara unsur-unsur dan senyawa-senyawa ditentukan oleh perubahan-perubahan energi bebas yang ada. Oleh karena itu, energi bebas merupakan faktor yang menentukan apakah proses korosi dapat berlangsung secara spontan atau tidak.

Agar suatu reaksi dapat berlangsung spontan, maka harus ada energi bebas yang dilepaskan. Proses korosi yang terjadi dari logam menjadi produk korosi mempunyai energi bebas yang negatif.

Perubahan energi bebas yang terjadi, dalam suatu rangkaian sederhana sel korosi, dapat diwujudkan dalam bentuk perbedaan potensial antara anoda dan katoda. Jika didasarkan pada hukum termodinamika maka kemampuan terkorosinya suatu logam tergantung dari perbedaan potensial logam terhadap lingkungannya.

## **2.5 KINETIKA KOROSI**

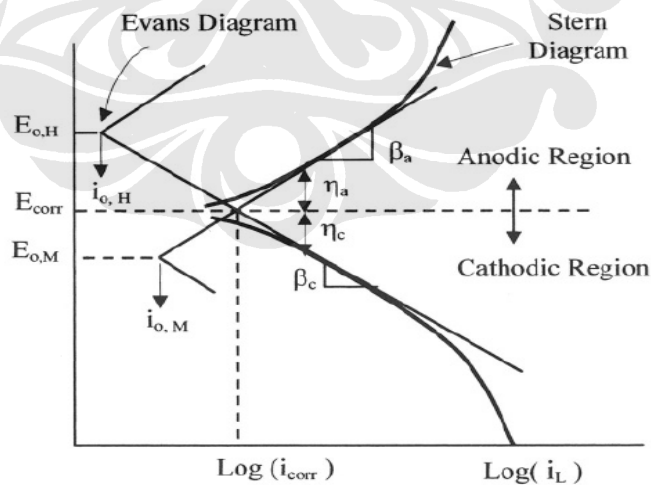
Dalam proses korosi, selain penyebab dan jenis korosi yang terjadi, salah satu hal terpenting yang harus diperhitungkan adalah kecepatan korosi. Pengukuran terhadap kecepatan korosi menjadi penting dalam usaha pengendalian korosi sehingga umur pakai suatu logam dapat diperkirakan.

Dengan menggunakan teori polarisasi maka mekanisme terkorosinya suatu logam dapat diketahui secara kinetika. Teori polarisasi tersebut merupakan faktor pengendali proses korosi.

Bila suatu logam M dicelupkan ke dalam suatu larutan elektrolit yang bersifat korosif, maka akan terjadi reaksi pelarutan logam menjadi ion logam disertai dengan pelepasan elektron. Reaksi tersebut dikenal dengan reaksi anodik (deelektronisasi), dan laju reaksinya diberi simbol  $i_a$ . Reaksi anodik tersebut berlangsung apabila terdapat reaksi lain yang dapat memanfaatkan pelepasan elektron. Reaksi yang terjadi menyusul reaksi anodik itu disebut reaksi elektronisasi atau reaksi katodik yang laju reaksinya diberi simbol  $i_c$ .

Kesetimbangan terjadi apabila  $i_a = i_c$ . Pada keadaan tersebut tidak ada arus yang mengalir. Dalam kenyataannya, arus tetap ada dan mengalir tetapi memiliki nilai yang sama besar dan berlawanan arah sehingga tidak dapat diukur. Arus-arus yang terjadi itu disebut arus pertukaran ( $i_o$ ).

Keadaan tidak seimbang terjadi apabila dalam sistem ada arus mengalir ( $i_a > i_c$ ) sehingga terjadi penyimpangan potensial dari potensial kesetimbangannya. Proses penyimpangan potensial ini disebut polarisasi dan besarnya penyimpangan potensial itu disebut overpotensial.



Gambar 2.8 Diagram polarisasi logam<sup>[14]</sup>



## 2.6 KOROSI BAJA DI LINGKUNGAN NaCl<sup>[8]</sup>

Korosi yang terjadi pada logam akibat pengaruh lingkungan air laut merupakan jenis korosi basah (*aqueous*). Laju korosi logam pada lingkungan laut berbeda-beda diakibatkan komposisi air laut yang kompleks dan sulit diprediksi. Beberapa faktor yang mempengaruhi korosi lingkungan air laut antara lain:

- Temperatur
- Oksigen terlarut
- Konsentrasi garam (NaCl)
- pH
- aktifitas biofouling

Temperatur air laut bervariasi di seluruh bagian di dunia. Pada umumnya berada antara -2 °C sampai 35 °C bahkan lebih tinggi di daerah yang panas. Pengaruh temperatur terhadap korosi logam baja adalah linear. Semakin tinggi temperatur maka kecepatan korosi meningkat.

Oksigen yang terlarut dalam air laut dapat mempengaruhi kecepatan korosi logam, semakin bertambahnya kelarutan oksigen maka akan mempercepat laju korosi.

Laju korosi akan meningkat dengan bertambahnya konsentrasi NaCl sampai 3%. Namun konsentrasi kelarutan garam yang lebih tinggi menurunkan kelarutan oksigen, sehingga laju korosi menurun. Jenis korosi pada baja yang dapat ditimbulkan oleh kelarutan NaCl ini adalah korosi sumuran. Penyebab korosi sumuran dikarenakan ion chlorida cenderung memecahkan lapisan pasif dari logam dengan cara penetrasi melalui lapisan film, sehingga akan terbentuk lubang-lubang kecil. Keadaan ini menyebabkan terjadinya daerah anodik sehingga korosi akan berlangsung dengan sendirinya. Kehadiran oksigen pada permukaan logam dapat mempercepat korosi sumuran karena semakin tingginya kadar oksigen, kecepatan reaksi pada permukaan yang bersifat katodik akan meningkat.

Faktor-faktor yang mempengaruhi pH di permukaan air laut adalah karbon dioksida dan oksigen terlarut yang dipergunakan oleh biokimia untuk beraktivitas. Pada proses fotosintesis diperlukan sejumlah oksigen dan dihasilkan karbon dioksida yang menyebabkan air laut bersuasana lebih asam (pH berkurang) dan kejenuhan karbonat menurun.

Lapisan film yang ditimbulkan oleh aktivitas organisme laut seperti ganggang dan bakteri akan membentuk lapisan yang disebut lapisan *biofouling*. Lapisan tersebut terbentuk saat logam dicelupkan ke dalam air laut, dan kemudian akan berkembang menjadi tumbuhan hidup. Lapisan ini akan merubah sifat kimia pada antar muka logam dengan elektrolit karena lapisan tersebut merupakan sumber konsentrasi sel oksigen pada saat pertumbuhannya. Hal ini akan menyebabkan timbulnya korosi merata atau korosi lokal.

## 2.7 FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KOROSI

Fenomena korosi dipengaruhi oleh banyak faktor, yang dapat diklasifikasikan menjadi empat kategori. Korosi disebabkan oleh adanya beberapa faktor secara simultan, sebagai suatu hasil reaksi antara logam dan paduannya dengan lingkungan

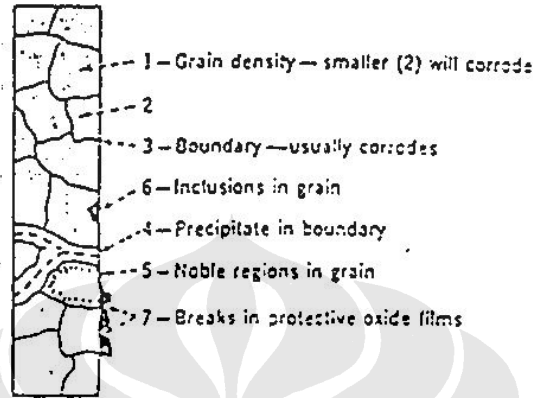
**Tabel 2.3.** Faktor-Faktor yang mempengaruhi korosi<sup>[11]</sup>

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

### 2.7.1 Faktor Metalurgis<sup>[11]</sup>

Prinsip terjadinya korosi adalah karena adanya daerah-daerah yang bersifat anodik-katodik pada permukaan logam, dimana korosi terjadi pada daerah yang bersifat anodik.

Penyebab terjadinya daerah katodik dan anodik ini antara lain adalah ketidakseragaman struktur kristal pada logam tersebut. Hal ini dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.9 Ketidakseragaman struktur logam yang menyebabkan korosi<sup>[11]</sup>

Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui bahwa:

1. Ukuran butir yang tidak merata dapat mengakibatkan butir yang lebih kecil (2) akan bersifat anodik dibandingkan butir yang lebih besar.
2. Timbulnya sel-sel mikro anodik dan katodik yang diakibatkan karena adanya batas butir (3) yang tingkat energinya lebih tinggi dibandingkan dengan kristal di batas butir(2), dimana batas butir akan bersifat lebih anodik dibandingkan daerah butir.
3. Adanya pengendapan fasa (4) dapat mengakibatkan terjadinya korosi interkristalin. Adanya komposisi kimia yang tidak homogen yang diakibatkan terjadinya segregasi unsur-unsur paduan pada waktu pembekuan (5) dapat menimbulkan bagian butir yang bersifat lebih katodik atau inert.
4. Terjadinya inklusi dalam butir (6) yang mengakibatkan daerah-daerah yang bersifat lebih anodik dan katodik dibandingkan dengan bagian butir lain.
5. Rusaknya film oksida (7) juga dapat menimbulkan korosi, karena daerah permukaan logam yang berada di bawah lapisan oksida yang rusak akan

bersifat lebih anodik dibandingkan daerah permukaan yang tertutup oleh lapisan oksida.

### 2.7.2 Pengaruh Perlakuan Panas<sup>[11]</sup>

Pada umumnya material yang memiliki fasa tunggal mempunyai ketahanan korosi lebih tinggi dibandingkan material yang memiliki fasa banyak (*multiphase*) karena salah satu fasa itu akan bersifat anodik sedangkan lainnya bersifat katodik.

Sebagai contoh adalah pengaruh fasa kedua akan menurunkan ketahanan sebagai pengaruh penemperan pada ketahanan korosi baja karbon 0,95% C. ketika baja ini dalam kondisi martensit setelah proses pencelupan (*quenching*) dari kondisi austenit, laju korosi relatif rendah, sebab martensit adalah larutan padat jenuh dalam kisi kristal berbentuk *body center tetragonal* (BCT) merupakan fasa tunggal. Setelah penemperan pada range temperatur 200-500 °C terjadi pengendapan fasa karbida epsilon dan sementit (Fe<sub>3</sub>C). struktur dengan dua fasa ini akan membangkitkan sel galvanik dimana akan mempercepat laju korosi pada baja.

## 2.8 PERHITUNGAN LAJU KOROSI

Dalam setiap kasus korosi, pengukuran secara kuantitatif terhadap laju korosi menjadi sangat penting. Dengan mengetahui laju korosi secara kuantitatif maka kita bisa memperkirakan umur dari suatu logam yang terserang korosi.

Salah satu bentuk pengukuran standar yang sering digunakan adalah *mills per tahun* (*mills per year*, mpy). Bentuk rumuran *mills per year* adalah<sup>[15]</sup>:

$$\text{mpy} = \frac{k.W}{D.A.T} \quad (2.2)$$

W = kehilangan berat (mg)

A = luas daerah yang terkorosi (cm<sup>2</sup>)

D = berat jenis sampel (gr/cm<sup>3</sup>)

T = lamanya waktu ekspose (jam)

K= konstanta dapat berupa:

$$\text{mils per year (mpy)} = 3,45 \times 10^6$$

$$\text{miligram per dm}^2 \text{ / hari (mdd)} = 2,40 \times 10^6$$

Dalam kaitannya dengan rapat arus korosi (misalnya uji polarisasi) maka rumus laju korosinya<sup>[15]</sup>:

$$CR \text{ (mpy)} = \frac{0,13 \cdot i_{kor} \cdot BE}{D} \dots\dots\dots (2.3)$$

$I_{kor}$  = rapat arus korosi ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

CR = laju korosi (mpy)

BE = Berat ekuivalen (BA/n)

D = Berat jenis logam ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

