

BAB II

LANDASAN TEORI

II.1. BAJA PADUAN RENDAH KEKUATAN TINGGI (HSLA)

Baja HSLA adalah baja karbon rendah dengan paduan mikro dibawah 1% yang memiliki sifat mekanis yang baik antara lain: kekuatan, ketangguhan, dan mampu bentuk^[1]. Paduan mikro elemen vanadium, niobium, titanium dan alumunium digunakan sebagai paduan penguat pada baja HSLA. Paduan mikro tersebut efektif untuk membentuk karbida, nitrida atau karbonitrida.

Adapun fungsi pokok elemen paduan mikro adalah:

1. Pembentukan presipitat yang kaya akan karbonitrida yang stabil pada temperatur tinggi
2. Pembentukan karbonitrida pada saat temperatur 1000 C pada temperatur transformasi
3. Pembentukan karbonitrida yang mengendap selama dan setelah temperatur transformasi
4. Pembentukan endapan dalam ferit acicular selama atau setelah pendinginan dipercepat
5. Pembentukan endapan pada transformasi martensit selama perlakuan temper untuk menghasilkan *secondary hardening*
6. Menghambat laju transformasi struktur austenit menjadi ferit
7. Menghambat pembentukan struktur bainit dan mempromosikan pembentukan martensit
8. Membersihkan kandungan nitrogen dan karbon dari larutan ferit

Mekanisme penguatan baja HSLA adalah penghalusan butir dan penguatan presipitat. Penghalusan butir ferit dapat dilakukan dengan pemanasan ulang dan canai panas. Presipitat terbentuk oleh adanya paduan mikro Al, Nb, Ti, atau V yang mudah menjadi karbonitrida yang halus dan tersebar.

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 pearlite pada struktur mikro. Makin tinggi kadar karbon akan menurunkan mampu las dan ketangguhan. Kandungan karbon maksimal pada baja HSLA *as rolled* adalah 0,2%. Semakin tinggi kadar karbon, maka cenderung akan terbentuk martensit serta bainit pada struktur mikro hasil pengerolan. Kekuatan yang baik disebabkan oleh :

- Ukuran butir ferit yang halus hasil dari pengerolan terkendali (*controlled rolling*) serta adanya unsur paduan mikro (*microalloyed*) khususnya niobium.
- Penggunaan 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. Makin tinggi temperatur, kelarutan presipitat akan semakin meningkat.

3. Mangan (Mn)

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

4. Silikon (Si)

Kandungan silikon maksimal yaitu sebesar 0,35%. Silikon mempunyai pengaruh yang cukup signifikan dalam penguatan larutan padat.

5. Tembaga (Cu)

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

6. Phospor

Phospor merupakan penguat ferit yang efektif dengan penguatan *solid solution*. Phospor dapat meningkatkan keahanan korosi tetapi menurunkan keuletan. Pada kadar rendah (<0,05%) dapat menyebabkan embrittlement karena segregasi pada batas butir austenit prior.

7. Chromium

Chromium biasanya ditambahkan dengan tembaga untuk meningkatkan ketahanan korosi atmosferik.

8. Nikel

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 serta penghalusan butir. Niobium merupakan unsur penghalus butir yang lebih baik dibanding vanadium karena niobium-karbida lebih stabil pada austenit dibandingkan vanadium-karbida pada temperatur pengerolan. Semakin rendah kelarutan niobium-karbida di austenit, maka semakin stabil endapannya, sehingga dapat mengunci pergerakan batas butir austenit dan menghambat pertumbuhan butir austenit tersebut.

10. Vanadium

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

11. Titanium (Ti)

Titanium berfungsi untuk penguatan presipitat serta mengontrol bentuk sulfida. Penambahan sejumlah kecil titanium (kurang dari 0.025%) dapat membatasi pertumbuhan butir austenit.

II.1.1. Baja HSLA-Nb

Baja High Strength Low Alloy (HSLA) merupakan baja yang memiliki sifat mekanis yang lebih baik dari baja karbon biasa. Selain itu mampu las dan mampu bentuk baja HSLA lebih baik karena kandungan karbon yang lebih rendah dibandingkan baja karbon biasa. Baja HSLA memiliki kandungan karbon (C) dan mangan (Mn) serta unsur paduan mikro (umumnya kurang dari 0,15%) seperti niobium (Nb), vanadium (V), titanium (Ti) atau kombinasi unsur-unsur tersebut.

Kandungan niobium dalam baja HSLA dapat meningkatkan kekuatan luluh dan juga kekuatan tarik dari hasil canai panas baja tersebut. Niobium meningkatkan kekuatan baja HSLA melalui mekanisme pengaturan presipitat dan juga penguatan dengan penghalusan butir ferit^[2].

II.1.2. Penguatan Presipitat

Penguatan presipitat dapat dipengaruhi oleh berbagai elemen, seperti Nb, V dan Ti^[12]. Elemen tersebut memiliki afinitas yang tinggi terhadap C dan N, sehingga kelarutan padatnya dalam baja menjadi terbatas.

Pada saat pemanasan dengan temperatur 1250⁰C, Nb pada baja HSLA-Nb akan bersifat larut. Pada saat pendinginan, akan terbentuk presipitat Nb(CN) pada bagian muka austenit-ferit selama transformasi yang menyebabkan terjadinya penguatan. Namun pada temperatur 920⁰C, presipitat tersebut akan larut dalam jumlah sedikit dan karenanya tidak terjadi penguatan presipitat. Partikel yang tidak larut akan membatasi pertumbuhan austenit dan menghasilkan butir ferit

yang lebih halus. Maka temperatur pemanasan untuk mengontrol penguatan presipitat adalah antara 920⁰C sampai 1250⁰C^[12].

Irvine dkk^[14] telah menemukan temperatur kelarutan presipitat Nb(CN) melalui persamaan :

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

Dimana :

[Nb] dan $[C + \frac{12}{14}N]$ = Konsentrasi keseimbangan dari Nb, C dan N dalam larutan matriks (% berat) pada temperatur absolute

T_s = Temperatur Kelarutan Nb(CN) (°K)

Niobium dapat membentuk karbida (Nb₄C₃) dan nitrida (NbN) yang bersifat larut dan dapat ditemukan sebagai endapan dalam baja. NbC memiliki kelarutan yang lebih rendah dibandingkan TiC ataupun VC. Sedangkan kelarutan NbN lebih tinggi dibandingkan TiN, AlN, dan VN. Karena kelarutan NbC yang rendah itulah maka Nb menjadi pengendali ukuran butir yang efektif. Sedangkan Al, V dan Ti efektif untuk baja dengan kadar nitrogen yang cukup tinggi.

II.2. PENGHALUSAN BUTIR FERIT

Penghalusan butir ferit dapat dihasilkan dengan memperhalus butir austenit pada saat pendinginan ke temperatur ruang. Selain itu penambahan elemen seperti karbon dan mangan atau peningkatan kecepatan pendinginan dari temperatur austenit, juga akan menghasilkan butir yang halus.

Mekanisme penguatan yang paling sering digunakan pada baja HSLA adalah penghalusan butir ferit hasil canai panas, setelah itu barulah mekanisme penguatan presipitat. Partikel yang terbentuk pada temperatur tinggi dalam austenit, walaupun efektif untuk kontrol pertumbuhan butir, tidak akan menyebabkan penguatan karena partikel tersebut terlalu besar. Partikel yang

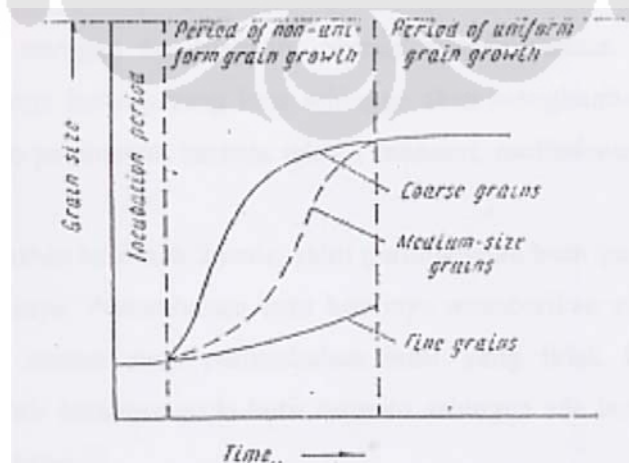
menyebabkan penguatan adalah yang terbentuk pada temperatur rendah dalam austenit, pada transformasi ferit-austenit, dan di dalam ferit selama pendinginan.

Niobium merupakan paduan yang paling efektif untuk penghalusan butir melalui proses pengerolan terkendali. Pada permulaan canai panas, semua unsur Nb, C, dan N akan larut dalam fasa austenit, namun akan terbentuk presipitat kembali pada saat temperatur pengerolan turun.

II.3. PERTUMBUHAN BUTIR AUSTENIT

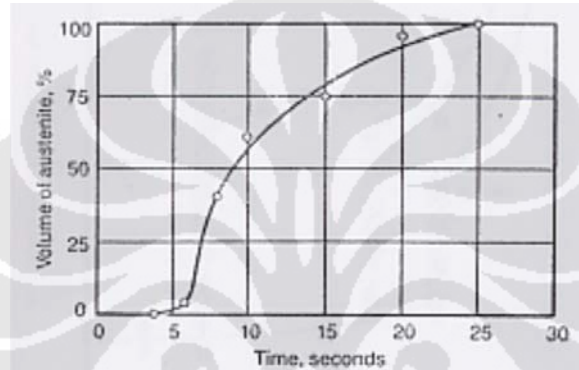
Pertumbuhan butir logam adalah proses difusi terkontrol akibat penurunan energi batas butir. Secara fisik ditandai dengan terjadinya pertumbuhan butiran yang lebih besar dengan menyusutnya butiran yang lebih kecil^[5]. Laju pertumbuhan butir tergantung pada suhu. Kenaikan suhu mengakibatkan meningkatnya energi getaran termal, yang kemudian mempercepat difusi atom melalui batas butir, dari butir yang kecil menuju yang besar. Penurunan suhu akan menghambat pergerakan batas butir namun tidak dapat membalikkan reaksi.

Pertumbuhan butir melalui tahap-tahap inkubasi, pertumbuhan butir yang tidak seragam dan pertumbuhan butir yang seragam. Hal tersebut dapat digambarkan seperti gambar 2.1 besar butir vs waktu dibawah ini:



Gambar 2.1 Besar butir vs Waktu pada temperatur Konstan

Pembentukan austenit membutuhkan waktu untuk *nucleus* pertama terbentuk. Nukleus tersebut kemudian berkembang dengan kecepatan lebih besar sejalan dengan terbentuknya nucleus yang lebih banyak lagi^[6]. Hal tersebut tergantung waktu, karena difusi karbon dibutuhkan untuk menghasilkan austenit. Jika temperatur meningkat maka kecepatan difusi meningkat dan pembentukan austenit akan meningkat pula. Gambar 2.2 adalah grafik hubungan persen volume austenit yang terbentuk dari perlit pada baja *eutectoid* dengan fungsi waktu pada temperatur austenisasi yang konstan.



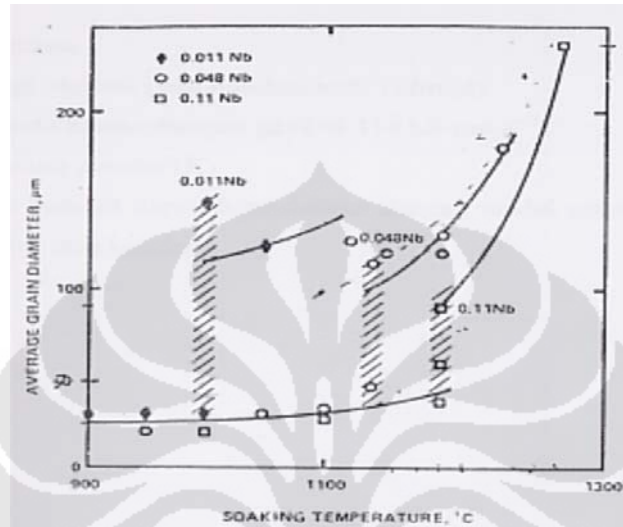
Gambar 2.2 Hubungan % Volume Austenit vs Waktu

Beberapa elemen yang terdapat pada baja dapat menstabilkan austenit, seperti karbon, nitrogen, dan mangan. Namun elemen paduan lain dapat juga sebagai pembentuk karbida yang kuat sehingga akan menghambat laju pembentukan austenit. Elemen pembentuk karbida adalah titanium, molibdenum, niobium, dan aluminium.

Pertumbuhan butir ada 2 jenis, yaitu pertumbuhan butir yang kontinyu dan yang tidak kontinyu. Pertumbuhan butir kontinyu memberikan efek ukuran butir yang seragam, namun pada pertumbuhan butir yang tidak kontinyu terjadi pertumbuhan butir istimewa pada butir tertentu sehingga ada butiran besar pada matriks butiran halus^[4].

Pertumbuhan butir pada baja HSLA termasuk pertumbuhan butir yang tidak kontinyu. Pertumbuhan butir sangat lambat pada temperatur rendah. Pada temperatur abnormal pertumbuhan butir meningkat dengan sangat cepat akibat

melarutnya presipitan menjadi larutan padat. Kemudian pertumbuhan butir austenit akan meningkat lebih cepat pada temperatur tinggi^[6]. Gambar 2.4 adalah grafik hubungan pertumbuhan butir terhadap temperatur pada baja HSLA dengan konsentrasi niobium yang beragam.



Gambar 2.3 Hubungan Diameter Butir Austenit vs Temperatur pada Baja HSLA Niobium

Untuk dapat menentukan ukuran butir selama butir normal pada kondisi anil isothermall [Beck] dapat dinyatakan dengan persamaan^[7]:

$$d^n - d_0^n = c \cdot t \quad (2.2)$$

Dimana d = ukuran butir akhir (μm)

d_0 = ukuran butir awal (μm)

t = waktu anil (detik)

n dan c = konstanta

Menurut model pertumbuhan butir baja mangan [Sellar] dinyatakan dalam persamaan^[8]:

$$d^n - d_0^n = \left[A \exp\left(-\frac{Q_{gg}}{RT}\right) \right] \cdot t \quad (2.3)$$

Dimana $A =$ Konstanta

$Q_{gg} =$ Energi aktivasi pertumbuhan butir (Kj/mol)

$R =$ Konstanta kesetimbangan gas ($8.314 \text{ Kj/mol K}^{-1}$)

$T =$ Temperatur absolut (K)

Pertumbuhan butir austenit dapat digambarkan dengan model empiris baik untuk pemanasan isothermal atau kontinyu.

II.3.1 Pengaruh Temperatur Pada Besar Butir Austenit

Besar kecilnya ukuran butir austenit prior yang terbentuk dipengaruhi oleh temperatur, dimana semakin tinggi temperatur maka butirnya pun akan membesar. Peningkatan besar diameter butir austenit prior ini akan semakin pesat dengan terlarutnya presipitat sebagai pengunci pertumbuhan butir, untuk baja paduan mikro Nb presipitat Nb(CN) akan terlarut dalam matriks pada temperatur kelarutannya. Untuk komposisi baja paduan mikro percobaan kali ini, terdiri dari 0.029%wt Nb, 0.087%wt C, dan 0.0105%wt N temperatur kelarutannya adalah 1137°C yang didapatkan dari persamaan 2.1. Larutnya presipitat Nb(CN) diawali dengan pengkasaran butir pada temperatur tertentu, temperatur ini disebut temperatur pengkasaran butir, sesuai dengan persamaan 2.4. Temperatur pengkasaran butir baja paduan mikro 0.029% Nb adalah 1106°C .

Hal tersebut dapat dengan jelas terlihat pada penelitian Parihanti^[13] dan Shianto^[14] dimana diameter butir austenit prior membesar pada temperatur 1200°C dan diatas temperatur tersebut diameter terus meningkat.

Tabel 2.1 Data Perbandingan Diameter Austenit Dengan Variasi Temperatur Pemanasan

Temperatur (°C)	d _γ HSLA as-cast ^[13] (μm)	Temperatur (°C)	d _γ HSLA as-rolled ^[14] (μm)	Temperatur (°C)	d _γ Hasil Penelitian (μm)
880	11	900	6.4	-	-
992	22	1000	10.24	-	-
1112	49	1100	30.3	-	-
1217	121	1200	82.02	1200	104.46
1264	151	1250	92.91	-	-
1300	193	1300	-	-	-

Jika dilihat pada penelitian Parihanti^[13] dan Shianto^[14] terlihat bahwa benda uji mulai memperlihatkan gejala pengkasaran butir pada temperatur 1100^o C. Pada temperatur tersebut ukuran butir austenit menjadi sekitar 150% lebih besar daripada ukuran pada temperatur dibawahnya. Ini menunjukkan bahwa temperatur berperan dalam meningkatkan ukuran butir austenit prior.

II.3.2. Pengaruh Waktu Tahan Pada Besar Butir Austenit

Selain temperatur, waktu tahan juga mempengaruhi besar butir austenit prior yang terbentuk. Pertumbuhan butir terjadi karena adanya pengurangan energi bebas pada batas butir, seperti yang telah diketahui bahwa pada batas butir terdapat atom-atom dengan energi bebas yang lebih tinggi daripada atom-atom pada butir. Untuk mencapai kestabilan, maka atom-atom pada batas butir mengurangi energi bebasnya dengan cara mengurang permukaan batas butir. Akibatnya terjadi migrasi batas butir, dimana migrasi batas butir ini adalah difusi atom-atom pada batas butir menuju ke butir yang semakin lama akan bergabung (*coalescence*) membentuk butir yang lebih besar. Oleh sebab itu waktu tahan akan memberikan kesempatan atom-atom tersebut untuk bergabung.

Tabel 2.2 Perbandingan Pengaruh Waktu Tahan Pada Besar Diameter Butir Austenit Prior

Waktu Tahan (jam)	$d\gamma$ HSLA 0.029%Nb ^[15] (μm)	Waktu Tahan (jam)	$d\gamma$ Hasil Penelitian (μm)
1	93	1	104.46
1.5	108	-	-
2	118	-	-
2.5	125	-	-
3	135	-	-

Dari hasil perbandingan terlihat bahwa dengan pemberian waktu tahan yang sama yaitu 1 jam, besar butir yang dihasilkan tidak berbeda jauh.

Dari gambar 4.8 terlihat dengan peningkatan besar deformasi memberikan besar butir austenit yang semakin kecil. Ini dikarenakan peningkatan deformasi akan meningkatkan laju nukleasi dan rekristalisasi butir sehingga butir akan semakin kecil.

II.3.3. Temperatur Pengkasaran Butir

Temperatur dimana akan terjadi pertumbuhan butir abnormal ialah dimana presipitat sudah tidak mampu lagi menahan pertumbuhan butir, disebut juga pertumbuhan butir yang istimewa karena hanya beberapa butir yang bertambah besar diameternya yang kemudian akan berkembang seiring kenaikan temperatur dan memakan butir disekelilingnya sampai butir seluruhnya digantikan oleh butir yang besar.

Pengaruh dari berbagai unsur *microalloy* terhadap pertumbuhan butir selama proses pemanasan awal (*reheating*) ditunjukkan pada gambar dibawah ini:

Persamaan untuk menghitung temperatur pengkasaran butir dirumuskan oleh L.J. Cuddy dkk^[14]

$$T_{gc} = A + B (T_s - 273) \quad (2.4)$$

Dimana :

T_{gc} = Temperatur Pengkasaran Butir ($^{\circ}C$)

T_s = Temperatur Kelarutan Presipitat ($^{\circ}K$)

A,B = Konstanta Presipitat

II.4. THERMOMECHANICAL CONTROL PROCESS

Thermomechanical processing merupakan suatu proses untuk mengontrol struktur mikro suatu material selama proses pembuatannya untuk menghasilkan sifat mekanis yang baik. Secara umum, *Thermomechanical Processing* terdiri dari proses pemanasan awal (*reheating*), canai panas (*hot rolling*), dan pendinginan (*cooling*). Proses pemanasan ini sangat penting dalam menghasilkan sifat mekanis benda jadi sebab dengan pemanasan awal dapat diprediksi struktur mikro 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 lain yang juga bisa mempengaruhi pertumbuhan besar butir austenit yaitu temperatur reheating dan waktu tahan. Seiring dengan kenaikan temperatur pemanasan 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 adanya difusi butir ke butir lainnya yang dipengaruhi oleh besaran temperatur pemanasan dan waktu tahan.

Parameter besar deformasi merupakan salah satu faktor penting untuk proses ini, karena dengan melakukan proses canai panas maka struktur akhir benda uji akan bisa bervariasi dengan melakukan variasi besar deformasi.

II.5. PENGERTIAN UMUM KOROSI

Korosi adalah perusakan logam karena adanya reaksi kimia atau elektrokimia antara logam dengan lingkungannya. Adapun lingkungan yang dimaksud adalah dapat berupa larutan asam, air dan uap yang masing-masing mempunyai daya hantar listrik yang berbeda-beda.

Mekanisme korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan electron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik di daerah anodik. Reaksi anodik (oksidasi) diindikasikan melalui peningkatan valensi atau produk elektron-elektron^[9]. Reaksi anodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu :

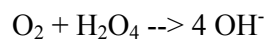


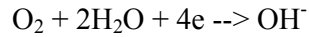
Proses korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n^+) dalam pelepasan n electron. Harga dari n bergantung dari sifat logam sebagai contoh besi :



Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi electron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik. Reaksi katodik terletak di daerah katoda.

Beberapa jenis reaksi katodik yang terjadi selama proses korosi logam yaitu :





II.5.1. Korosi Air Garam/Air Laut

Laju korosi logam mungkin empat atau lima kali lebih cepat dibandingkan bila logam itu terendam seluruhnya ditempat yang sama karena terdapatnya faktor oksigen dan ion Cl^- yang secara bergantian atau bersamaan menyerang benda uji. Natrium Klorida apabila dilarutkan kedalam air, zat ini menghasilkan suatu medium korosi yang sangat agresif, sama dengan air laut.

Reaksi-reakasi yang menggambarkan pembentukan garam dapur dituangkan dalam persamaan sebagai berikut :



Persamaan (2.7) dan (2.8) dijumlahkan



Apabila suatu bahan ionik dilarutkan kedalam air maka ion-ionnya memisahkan diri dan menyebar secara acak diantara molekul-molekul air. Berapapun banyaknya garam yang digunakan untuk membuat larutan, banyaknya ion natrium selalu sama dengan banyaknya ion klorida. Pernyataan ini disebut elektrolitas. Jadi setiap kali ada sebuah ion positif terbentuk, sebuah ion negatif juga terbentuk.^[10]

II.5.2. Pengaruh Heat Treatment Pada Korosi

Banyak sifat mekanis material ditingkatkan dengan berbagai macam perlakuan panas. Tetapi, beberapa sifat seperti kekerasan dan kekuatan sering dicapai dengan terkompensasinya ketahanan korosinya. Sebagai contoh, kekerasan dan kekuatan baja martensitic berbanding terbalik dengan ketahanan korosi yang

lebih rendah dibanding baja feritic ataupun austenitic. Kekuatan tinggi yang dicapai untuk baja penguatan endapan adalah melalui pembentukan endapan kedua selama pemanasan larutan dan proses *aging*. Telah disebutkan diatas, endapan dengan sifat elektrokimia sangat jelas berbeda dari matriks yang memiliki efek yang parah terhadap korosi^[15].

Proses seperti pengerjaan dingin, dimana material secara plastis berubah menjadi bentuk yang diinginkan, mengarah pada pembentukan butir yang memanjang dan sangat berbeda dan penurunan pada ketahanan korosi. Pengerjaan dingin juga dapat mengakibatkan tegangan sisa yang dapat membuat material rentan terhadap *stress corrosion cracking*. Sebuah kemajuan dalam ketahanan korosi dapat dicapai dengan melakukan *annealing* pada temperatur dimana rekristalisasi butir terjadi. Anneal sebagian dapat menyebabkan terjadinya *stress relief* tanpa efek besar pada keseluruhan kekuatan material.

II.5.3. Pengaruh Deformasi Pada Laju Korosi

Perlakuan canai panas atau deformasi merupakan salah satu cara untuk memodifikasi sifat suatu material. Perlakuan ini selain memodifikasi material secara bentuk fisik juga dapat merubah dalam hal bentuk dan jenis mikrostruktur yang dibentuk.

Terkait dengan adanya perubahan morfologi mikrostruktur dapat mempengaruhi beberapa sifat dasar dari material tersebut, salah satunya adalah adanya perubahan terhadap ketahanan korosi. Perubahan mikrostruktur ini mengakibatkan terjadinya perubahan kerapatan dislokasi dan perubahan distorsi dalam atom.

Pemberian deformasi ini mengakibatkan meningkatnya besar tegangan yang dimiliki karena makin rapatnya dislokasi yang merupakan cacat Kristal. Sebagaimana diketahui, bahwa dengan terjadinya peningkatan regangan dan ini akan berakibat pada sifat korosinya, dimana daerah pada suatu material yang memiliki tegangan yang lebih tinggi bersifat akan lebih anodic, sedangkan bagian

yang kurang tergangannya akan bersifat katodik, karena adanya perbedaan ini korosi yang terjadi cenderung korosi galvanis.

Sel galvanis mikro juga dapat terjadi akibat adanya perubahan mikrostruktur itu sendiri tanpa melihat adanya perbedaan tegangan antar daerah, perbedaan antara daerah butir dan batas butir juga berpengaruh kepada korosi galvanis mikro. Perbedaan antara daerah butir dan batas butir ini terjadi karena adanya perbedaan energi bebas pada kedua daerah tersebut. Dimana energi bebas pada batas butir memiliki nilai yang lebih tinggi daripada pada butir, sehingga apabila batas butir meningkat akibat perlakuan deformasi, maka akan makin tinggi pula energi bebas dan potensial pun akan menjadi negatif, sehingga laju korosi material tersebut akan meningkat. Hal ini juga berlaku sebaliknya^[15].

II.5.4. Pengukuran Laju Korosi

Laju korosi dapat diukur dengan dua cara pertama dengan metode kehilangan berat dan metode elektrokimia. Metode kehilangan berat adalah menghitung kehilangan berat yang dialami logam setelah beberapa waktu dicelupkan langsung ke dalam media korosi.

Untuk pengujian kabut garam metode perhitungan yang digunakan adalah perhitungan kehilangan berat (*weight loss*), dilakukan dengan melakukan perhitungan selisih antara berat awal dan berat akhir terlihat pada rumus perhitungan berikut :

$$\Delta W = W_O - W_A \quad (2.10)$$

DW = Selisih berat (gram)

W_O = Berat sebelum uji

W_A = Berat setelah uji

Perhitungan laju korosi dapat dilakukan dengan melihat rumus laju korosi secara umum^[10]:

$$\text{Laju korosi} = (K \times \Delta W) / (A \times T \times D) \quad (2.11)$$

K = Konstanta

T = Waktu paparan (jam)

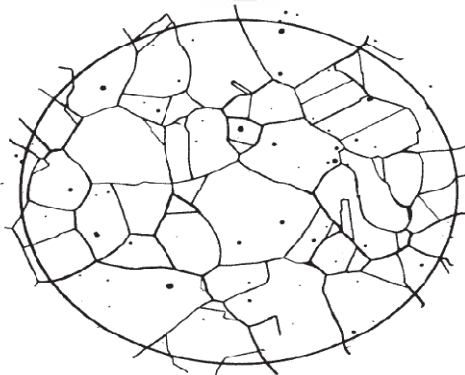
A = Luas permukaan logam (cm²)

W = Kehilangan berat (gram)

D = Densitas logam (gram/cm³)

II.6. PENGUKURAN BESAR BUTIR

Untuk mengetahui besar butir-butir yang terbentuk selama proses perlakuan ada beberapa metode, menurut standar yang telah ditetapkan oleh ASTM E112 yang dapat dilakukan untuk mengukur besar butir dari struktur mikro suatu material salah satunya adalah metode *jefferies* atau biasa disebut dengan planimetri. Metode ini menggunakan model lingkaran yang digunakan sebagai area perhitungan. Secara skematis proses perhitungan menggunakan metode ini adalah sebagai berikut^[11].



Gambar 2.4 Perhitungan Besar Butir Dengan Metode Jefferies

Persamaan yang digunakan menurut ASTM E112 adalah sebagai berikut :

$$N_A = f \left(N_{\text{Inside}} + \frac{N_{\text{Intercepted}}}{2} \right) \quad (2.12)$$

Menurut standar yang telah ditetapkan oleh ASTM E112 perhitungan butir dilakukan dalam sebuah lingkaran yang memiliki luas 5000 mm² atau memiliki diameter sebesar 79.8 mm.

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

Tabel 1.3 Pengali Jefferies

Magnification Used, <i>M</i>	Jeffries' Multiplier, <i>f</i> , to Obtain Grains/mm ²
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75	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.