

BAB II DASAR TEORI

2.1 Geothermal

Secara bahasa, *geothermal* berasal dari bahasa Yunani *geo* yang berarti bumi dan *therme* yang berarti panas [3]. *Geothermal* merupakan sumber energi terbarukan yang menggunakan energi panas dari bumi untuk membangkitkan power tanpa adanya emisi gas buangan. Energi panas bumi adalah energi yang dihasilkan oleh tekanan panas bumi. Energi ini dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, sebagai salah satu bentuk dari energi terbarukan, tetapi karena panas di suatu lokasi dapat habis, jadi secara teknis energi *geothermal* ini tidak diperbaharui secara mutlak.

Sistem *geothermal* ada dua tipe, yaitu [4] :

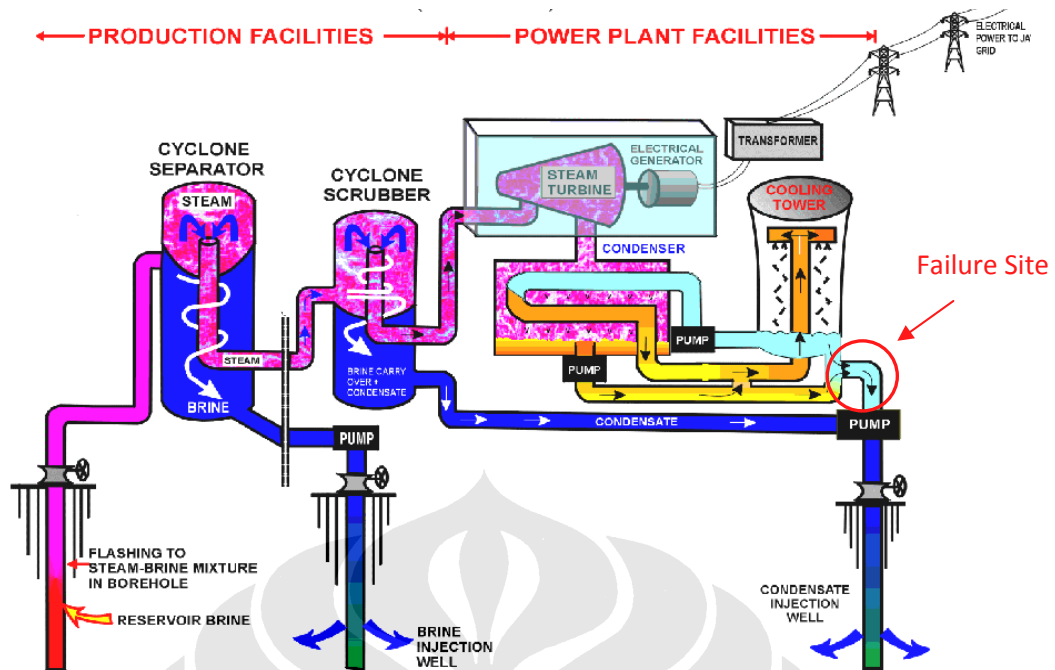
1. *Water- or liquid-dominated geothermal systems*

Pada sistem ini cairan air kontinyu, tekanannya mengontrol fasa fluida. Beberapa uap mungkin ada, umumnya sebagai *bubble* yang berlainan. Sistem *geothermal* ini berada pada rentang temperatur 125°C – 225°C, yang merupakan distribusi paling banyak di dunia. Sistem ini tergantung kepada temperatur dan kondisi tekanan, karenanya sistem ini dapat menghasilkan air panas, campuran air dan uap, uap basah dan dalam beberapa kasus juga menghasilkan uap kering. Adapun cairan panas yang berasal dari dalam bumi mempunyai komposisi rata-rata sebesar 80% air panas dan 20% uap.

2. *Vapour-dominated geothermal systems (dry steam)* oleh White tahun 1973

Pada sistem ini cairan air dan uap normalnya menjadi *co-exist* di reservoir, dengan uapnya yang kontinyu, dan tekanan sebagai pengontrol fasa. Biasanya sistem ini menghasilkan uap yang kering sampai dengan *superheated*.

Skematik power plant *geothermal* dengan tipe *water dominated reservoir* dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Skematik power plant *geothermal* Salak [2]

Secara umum tahapan yang terjadi pada proses pengolahan energi *geothermal* mencakup hal – hal berikut,

- Panas dari magma menembus lapisan batuan bawah tanah dan memanaskan air tanah. Air tanah tersebut kemudian menjadi uap panas bertekanan tinggi. Uap dilepaskan melalui sumur pengeboran ke reservoir. Cairan masih berbentuk dua fasa.
- Cairan dua phasa ini dipisahkan menjadi uap air dan air panas (*brine*) melalui alat pemisah (*cyclone separator*) pada tekanan yang terkontrol.
- Air panas yang telah terpisah kemudian disuntikan kembali kedalam bumi dan uap panasnya dikirim ke alat pemisah kedua (*cyclone scrubber*) yang berfungsi untuk memisahkan partikel-partikel halus yang ikut terbawa oleh uap panas dan juga memisahkan kondensat yang terjadi akibat tekanan didalam pipa.
- Uap panas dibawa ke *power plant* untuk kemudian digunakan sebagai tenaga turbin pembangkit listrik. Dimana 70%nya berasal dari proses evaporasi
- Setelah memutar turbin, uap yang berasal dari panas bumi akan terkondensasi di kondenser akibat bercampur secara langsung dengan air pendingin yang berasal dari menara pendingin.

- f. Sisa kondensat yang hampir 30% ini kemudian dikirim ke *injection condensate system*. Air yang tidak terevaporasi lalu diinjeksikan kembali ke dalam bumi.
- g. Kemudian siklus energi ini akan kembali berulang.

2.1.1 Karakteristik Brine

Brine di *geothermal* mengandung konsentrasi garam yang terlarut tinggi terutama ion klorida dan ion sulfat, yang merupakan ion agresif. Jumlah ion – ion tersebut relatif dibandingkan terhadap karbonat dan bikarbonat. Secara umum komposisi kimia *brine* mengandung unsur – unsur sebagai berikut, Natrium (Na), Kalium (K), Magnesium (Mg), Kalsium (Ca), Klor (Cl), Sulfat (SO₄), Silikat (SiO₂), dan asam Bikarbonat (HCO₃) [5].

Berdasarkan unsur kimia tertentu, air dapat menimbulkan terjadinya *scaling*, korosi atau keduanya. Produk korosi *scale* dapat terbentuk dari berbagai jenis unsur kimia yang terlarut tetapi tetap berdasarkan dua faktor penting yaitu kesadahan (*hardness*) dan alkalinitas. Kalsium karbonat adalah *scale* deposit yang paling umum terbentuk yang diakibatkan oleh air bawah tanah yang digunakan pada sistem *geothermal* [5].

Total Hardness adalah pengukuran pertama dari garam kalsium dan magnesium yang terdapat pada air. Sedangkan unsur lain yang juga merupakan komponen *hardness* antara lain aluminium, mangan, besi atau seng yang kesemuanya disebut komponen minor.

Pada dasarnya ada 2 tipe kesadahan (*hardness*) [6] :

1. *Temporary hardness* disebabkan oleh Ca dan Mg bikarbonat (mengendap pada material jika dipanaskan)
2. *Permanent hardness* akibat Ca dan Mg sulfat atau klorida (larut dengan natrium)

Klasifikasi nilai *hardness* pada air (Carrier tahun 1965) adalah [7]:

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. <i>Very soft water</i> | Kandungan CaCO ₃ Lebih rendah dari 15 ppm |
| 2. <i>Soft water</i> | Kandungan CaCO ₃ 15 hingga 50 ppm |
| 3. <i>Moderately hard water</i> | Kandungan CaCO ₃ 50 hingga 100 ppm |
| 4. <i>Hard water</i> | Kandungan CaCO ₃ 100 hingga 200 ppm |

5. *Very hard water* Kandungan CaCO_3 diatas 200 ppm

Kesadahan (*Hardness*) dapat juga dinyatakan dalam satuan grain per gallon (gpg). Untuk mengkonversi gpg menjadi ppm CaCO_3 adalah dengan mengalikannya dengan 17.1 [7].

Soft water bersifat agresif untuk kebanyakan logam, karena tidak jenuh akan CaCO_3 , sehingga tidak membentuk lapisan karbonat yang bersifat protektif. *Very hard water* biasanya sangat tidak agresif karena sangat jenuh akan kalsium karbonat. Contoh *very hard water* adalah air bawah tanah dengan pH rendah dan kandungan karbon dioksida tinggi. Air dengan *hardness* tingkat menengah biasanya mengandung jumlah unsur yang cukup banyak dan cenderung untuk membentuk endapan yang melekat longgar atau tidak kuat pada permukaan logam, sehingga memungkinkan korosi untuk terjadi dibawah endapan yang terbentuk, atau mudah rontok sehingga tidak dapat melindungi logam dasar pada korosi selanjutnya. Dan untuk terjadinya scaling umumnya terjadi pada nilai *hardness* di atas 100 ppm CaCO_3 [7].

Sedangkan alkalinitas adalah pengukuran terhadap kemampuan suatu air untuk menetralkan asam. Seperti *hardness*, alkalinitas juga dinyatakan dalam ppm CaCO_3 . Ada dua jenis pengukuran alkalinitas, yaitu [7]:

- a) *Methyl Orange alkalinity* atau yang disebut M alkalinitas, yang digunakan untuk mengevaluasi potensial *scale*.
- b) *Phenolphthalein alkalinity* atau P alkalinitas, yang digunakan untuk mengukur alkalinitas pada pH yang sangat tinggi.

Hubungan antara kesadahan (*hardness*) dan alkalinitas adalah seperti berikut [7]:

- Jika M alkalinitas lebih besar dari pada total *hardness*, maka semua *hardness*nya menunjukkan adanya karbonat dan bikarbonat.
- Jika M alkalinitas lebih kecil dari total *hardness*, maka *hardness* karbonat = M alkalinitasnya, dan *hardness* non karbonatnya = total *hardness* – M alkalinitas.

Untuk mengevaluasi karakter umum pembentukan *scale* atau korosi dari sampel air, maka perlu diketahui total solid yang terlarut (TDS), pH dan temperatur pada penambahan *hardness* karbonat dan M alkalinitas [7].

Faktor komposisi kimia *brine* yang mempengaruhi sifat korosi dari *brine* antara lain adalah salinitas dan konsentrasi oksigen yang terlarut (DO). Salinitas mempengaruhi konduktivitas listrik dari *brine* [7].

Berbagai jenis agen korosif dan proses yang terjadi pada *brine geothermal* [5]:

a. Hidrogen sulfida (H₂S)

Hidrogen sulfida merupakan reduktor, beracun dan asam korosif yang berasal dari sumur hydrothermal lewat pembentukan asam secara alami. Pada baja dan besi tuang nodular, reaksi dengan H₂S yang terjadi adalah seperti berikut:



Pembentukan deposit FeS yang hitam, menandakan adanya serangan sulfida.

b. Oksigen (O₂) / karbon dioksida (CO₂)

Korosi pada logam aktif seperti besi dan baja tergantung dari konsentrasi oksigen yang terlarut (dissolved oxygen –DO), menghasilkan permukaan yang terkorosi:



Gas CO₂ dihasilkan dari proses termal dan dekomposisi asam karbonat dan bikarbonat dari *brine*. Akibatnya pH menurun dan penurunan pH berarti meningkatkan korosi.

c. Ammonia (NH₃)

Gas NH₃ dihasilkan dari dekomposisi kimia senyawa yang mengandung nitrogen seperti kerogen. Ammonia dan garam ammonium mengkorosi paduan tembaga, kuningan dan perunggu pada pipa sumur.

2.2 Indeks Korosifitas

Untuk dapat memprediksi sifat air sedimen baku terhadap laju korosi pada material dapat dilakukan dengan menggunakan perhitungan melalui rumus empiris sehingga didapatkan indeks korosifitas Langelier (LI) dan Ryznar (RI) [8]. Indeks ini adalah ukuran dari derajat kejenuhan, sehingga dapat memprediksi terjadinya endapan dan dapat digunakan untuk memprediksi tingkat kekorosifan air. Kelemahan indeks ini adalah tidak bisa memperkirakan seberapa banyak jumlah endapan yang akan mengendap. Untuk menghitung kedua indeks ini

diperlukan data temperatur, pH aktual, konsentrasi kation dan anion serta TDS. TDS didapat dengan menjumlahkan semua konsentrasi kation dan anion.

Untuk memastikan sifat air yang mengalir dipergunakan rumus Ryznar dan Langelier. Dengan menggunakan rumus ini kita dapat menentukan apakah air memiliki sifat membentuk endapan, netral, ataukah korosif.

2.2.1 Indeks Korosifitas Langelier (LI)

Langelier Indeks (LI) adalah indeks yang dikembangkan untuk memprediksi apakah air yang jenuh dengan oksigen terlarut akan membentuk endapan kalsium karbonat atau korosif. Indeks ini merupakan pendekatan konsep saturasi menggunakan variabel utama pH dan dapat diinterpretasikan sebagai perubahan pH yang dibutuhkan untuk membawa air ke dalam kesetimbangan.

Rumus empiris LI adalah sebagai berikut:

$$LI = pH - pH_s \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.1}) [7]$$

Dimana:

pH = pH aktual dalam air

pH_s = pH air dalam kesetimbangan dengan padatan CaCO₃

Tabel 2.1 Interpretasi dari hasil perhitungan Langelier Indeks (LI) [8] :

LI > 0	Air akan membentuk endapan
LI = 0	Air bersifat netral
LI < 0	Air bersifat korosif

Berikut table Langelier Saturation Indeks (LSI) yang disempurnakan oleh Carrier

Tabel 2.2 Nilai LSI yang disempurnakan oleh Carrier [7] :

LSI (Carrier)	Indication
-2,0 < LSI < 0,5	Serious corrosion
-0,5 < LSI < 0	Slightly corrosion but non-scale forming
LSI = 0,0	Balanced but pitting corrosion possible
0,0 < LSI < 0,5	Slightly scale forming and corrosive
0,5 < LSI < 2	Scale forming but non-corrosive

2.2.2 Indeks Korosifitas Ryznar (RI)

Metode Ryznar memiliki dasar yang sama dengan metode Langelier. Metode ini mengembangkan persamaan empiris untuk mengkalkulasi kestabilan indeks dari air. Indeks ini tidak hanya mengindikasikan kecenderungan air untuk mengendapkan kalsium karbonat (atau menjadi korosif jika menjadi jenuh dengan oksigen), tapi juga memberikan perkiraan semi kuantitatif jumlah endapan yang akan terbentuk atau tingkat yang menyebabkan korosi [8].

Rumus empiris RI adalah sebagai berikut:

$$RI = 2pH_s - pH \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.2}) [7]$$

pH = pH aktual dalam air

pH_s = pH air dalam kesetimbangan dengan padatan $CaCO_3$

Tabel 2.3 Interpretasi dari hasil perhitungan (RI) [9]:

RI (Ryznar Index)	Indikasi
$RI < 5,5$	<i>Heavy scale</i> akan terbentuk
$5,5 < RI < 6,2$	Endapan akan terbentuk
$6,2 < RI < 6,8$	Air bersifat netral
$6,8 < RI < 8,5$	Air bersifat korosif
$RI > 8,5$	Air bersifat sangat korosif

Tabel RI dari Ryznar hanya menunjukkan indikasi dari keagresifan air, namun tidak mengenai potensial scale dan korosi. Untuk mengetahui dua hal ini, digunakan Tabel RI yang disempurnakan oleh Carrier pada tahun 1965.

Tabel 2.4 Ryznar Index yang disempurnakan oleh Carrier [7] :

RI (Ryznar Index)	Indication (Carrier 1965)
4,0 – 5,0	<i>Heavy scale</i>
5,0 – 6,0	<i>Light scale</i>
6,0 – 7,0	Sedikit terbentuk scaling atau korosi
7,0 – 7,5	Korosi yang signifikan
7,5 – 9,0	<i>Heavy corrosion</i>
> 9,0	Korosi tidak dapat ditolerir

Nilai pH_s untuk kedua rumus empiris LI dan RI ditentukan melalui rumus :

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.3}) [7]$$

Dimana:

$$A = (\log \text{TDS (mg/L atau ppm)} - 1)/10$$

$$B = - 13,12 \log (T(^\circ \text{C}) + 273) + 34,55$$

$$C = \log (\text{Ca}^{2+} \text{ (mg/L atau ppm)}) - 0,4$$

$$D = \log (\text{M alkalinitas (mg/L atau ppm)})$$

Alkalinitas didapat berdasarkan jumlah ion penyebab alkalinitas pada tingkatan pH tertentu yang dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.5 Ion alkalinitas berdasarkan tingkatan pH [7]

pH	<i>Ion Penyebab alkalinitas</i>
9,6 - 14	OH^- dan CO_3^{2-}
8,3 - 9,6	HCO_3^- dan CO_3^{2-}
4,5 - 8,3	HCO_3^-

2.3 Korosi

Korosi dapat didefinisikan sebagai kerusakan atau berkurangnya mutu suatu material baik material logam maupun non logam karena bereaksi dengan lingkungannya [10]. Pada material logam, proses korosi melibatkan reaksi elektrokimia yaitu reaksi pelepasan elektron (reaksi oksidasi) dan penerimaan elektron (reaksi reduksi). Korosi pada logam dapat terjadi karena logam cenderung mencari bentuk senyawa yang lebih stabil seperti bentuk aslinya di alam yaitu dalam bentuk oksidanya.

Karena itu korosi dipengaruhi oleh sifat logam atau paduannya dan lingkungan. Faktor yang mempengaruhi korosi antara lain [11]:

- Logam** – struktur atom logam atau paduannya, komposisi, ketidakseragaman mikroskopik dan makroskopik, tegangan, dll.
- Lingkungan** – kondisi lingkungan seperti sifat kimia, konsentrasi, pengotor, tekanan, temperatur, kecepatan, serta kondisi spesifik lainnya yang dapat mempengaruhi kecepatan, tingkat (dalam periode waktu) dan bentuk korosi.

- c. **Interface logam/lingkungan** – Adanya lapisan oksida dapat mempengaruhi proses korosi.

Berdasarkan lingkungan *geothermal* jenis korosi yang terjadi pada fasilitas perpipaan merupakan tipe yang dipengaruhi oleh lingkungan water dominated dan pembentukan scale.

2.3.1 Korosi Aqueous

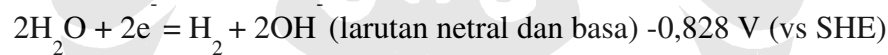
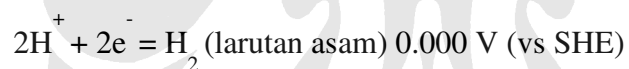
Secara umum, peristiwa korosi memiliki beberapa syarat yang harus terpenuhi, yaitu [12]:

1. Anoda, merupakan bagian logam yang menjadi tempat terlepasnya elektron. Bagian anoda ini umumnya akan mengalami kerusakan karena atom-atom logam akan berubah menjadi ion-ionnya.



2. Katoda, merupakan tempat elektron ditangkap. Reaksi yang umumnya terjadi di katoda adalah

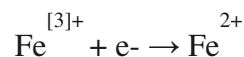
- a. Evolusi H₂ dari larutan asam atau netral:



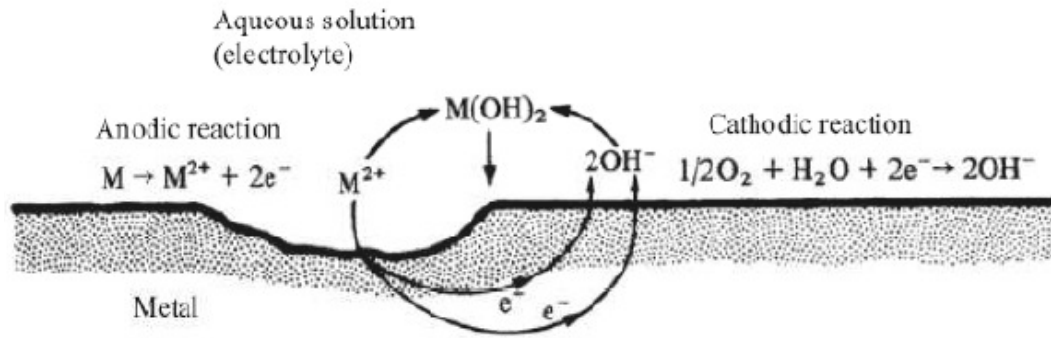
- b. Reduksi pelarutan oksigen pada larutan asam atau netral



- c. Reduksi dari oksidator yang terlarut pada reaksi redox seperti:



3. Elektrolit atau lingkungan korosif, hal ini akan memicu terbentuknya anoda dan katoda setempat.
4. Hubungan listrik antara anoda dan katoda, sambungan ini akan mengijinkan arus elektron mengalir dari anoda ke katoda.



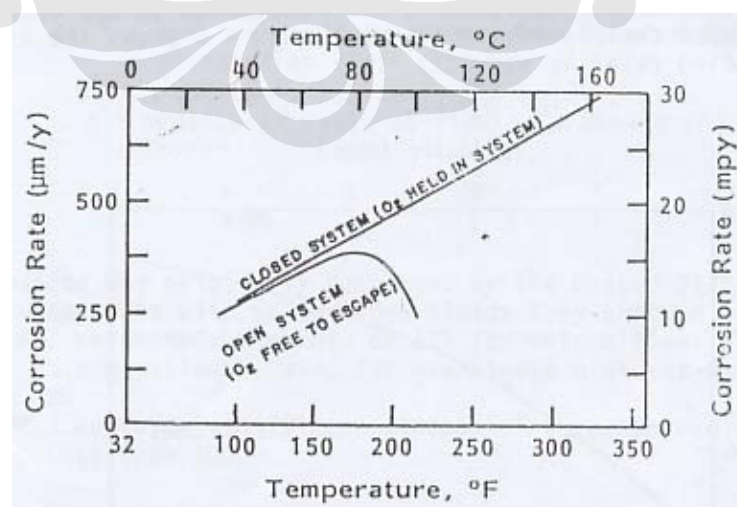
Gambar 2.2 Model sederhana yang menunjukkan reaksi elektrokimia dari proses korosi [13].

2.3.2 Lingkungan Sebagai Faktor Korosi

Korosi yang menyerang pipa yang mengalirkan air dapat bermacam-macam, tergantung pada kandungan ion dan gas pada air, juga pada pengaruh kondisi air dan lingkungan. Parameter lingkungan yang berpengaruh terhadap korosi adalah:

1. Temperatur.

Kecepatan korosi biasanya meningkat seiring dengan kenaikan temperatur karena semua reaksi menjadi semakin cepat. Jika sistem terbuka ke udara bebas maka korosi pada awalnya akan meningkat lalu kecepatan korosi mungkin akan turun karena gas yang terlarut dalam larutan akan habis. Jika sistem tertutup maka kecepatan korosi akan terus naik karena gas yang terlarut tidak dapat keluar seperti pada Gambar 2.3.

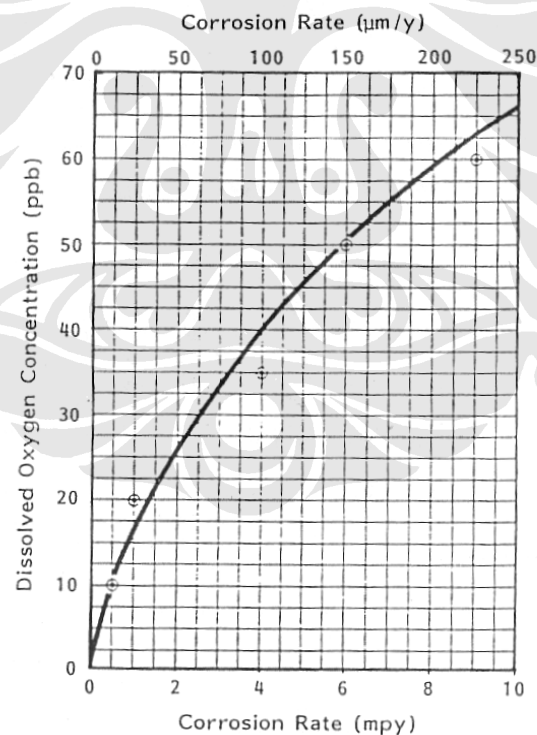


Gambar 2.3 Pengaruh temperatur pada korosi dengan kandungan oksigen dalam air [8].

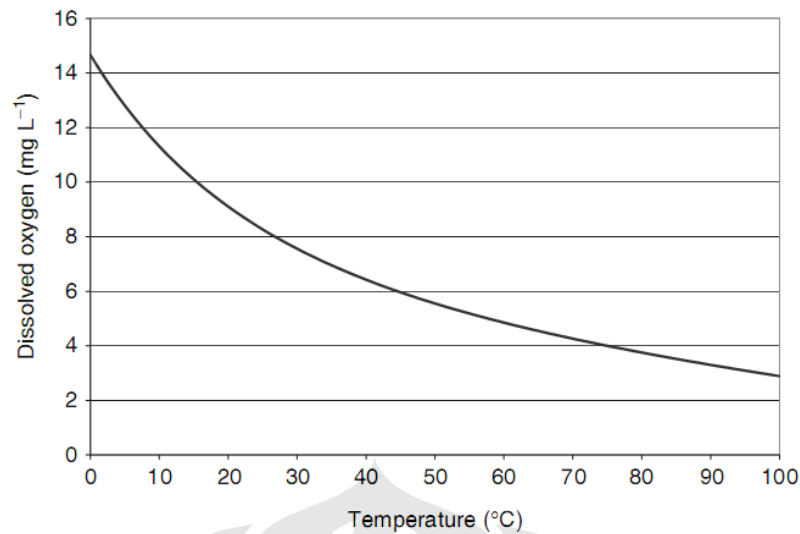
Ketika air mengandung bikarbonat, kenaikan temperatur akan menaikkan pembentukan endapan yang akan menurunkan kecepatan korosi. Tetapi jika temperatur cukup tinggi maka akan terjadi dekomposisi bikarbonat dan membentuk gas CO_2 .

2. Oksigen.

Oksigen merupakan oksidator kuat sehingga akan meningkatkan potensial korosi logam di lingkungan air (fluida) yang mengandung oksigen terlarut. Laju korosi dapat meningkat dengan kenaikan kelarutan oksigen seperti terlihat pada Gambar 2.4. Kelarutan oksigen sendiri dipengaruhi oleh suhu dari air atau pelarut. Semakin tinggi suhu air atau pelarut, maka makin rendah kelarutan oksigen. Hubungan antara kelarutan oksigen dengan suhu dapat dilihat pada Gambar 2.5. Selain itu, pada air yang mengandung garam, kandungan oksigen terlarut juga dipengaruhi oleh kadar garam-garam yang terlarut.



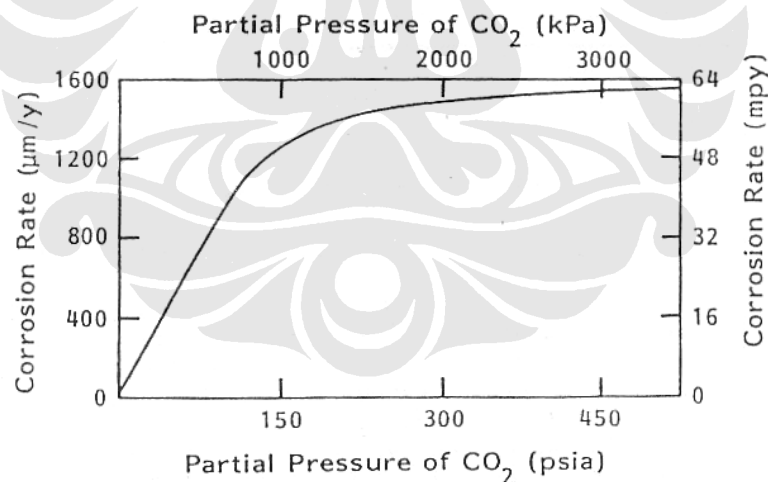
Gambar 2.4 Pengaruh kelarutan oksigen terhadap laju korosi [8]



Gambar 2.5 Hubungan konsentrasi oksigen terlarut terhadap suhu [14].

3. Carbon dioksida (CO₂).

Gas karbondioksida merupakan asam lemah dan bersifat korosif bilamana terlarut dalam air. Sebelum bersifat asam, CO₂ pertama kali harus terhidrasi menjadi H₂CO₃. Pada baja proses korosi dikontrol oleh laju pembentukan produk korosi CO₂ berupa scale FeCO₃ yang bersifat protektif.

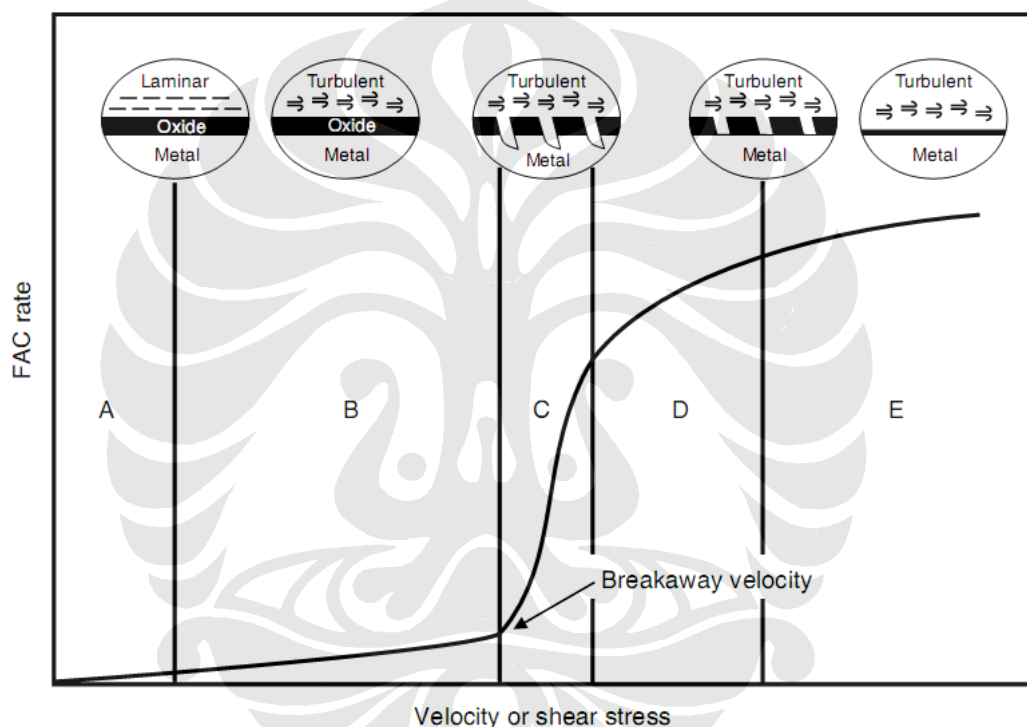


Gambar 2.6 Pengaruh tekanan parsial CO₂ terhadap laju korosi [8].

4. Pengaruh kecepatan aliran air.

Kecepatan aliran air dapat mempengaruhi kecepatan korosi dengan interaksinya terhadap lapisan protektif yang umum terdapat pada logam. Sentuhan lapisan pasif atau protektif dengan aliran yang cukup cepat akan menghancurkan lapisan tersebut, dan meningkatkan laju korosi. Sebagai

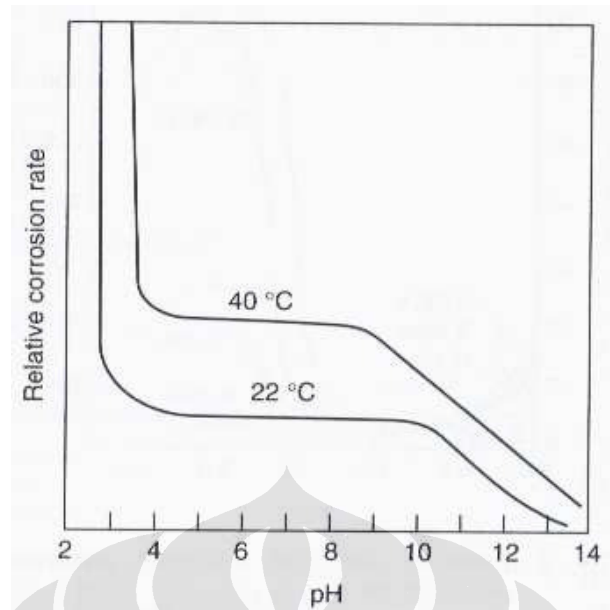
contoh, pipa baja karbon yang mengalirkan air, umumnya terlindungi oleh lapisan tipis karat yang menghambat laju transfer massa dari oksigen terlarut ke dinding pipa. Hasilnya adalah laju korosi yang rendah, umumnya sekitar <1 mm/year. Pengaruh berbagai kecepatan alir terhadap lapisan protektif dapat dilihat pada Gambar 2.7. Pada umumnya, lapisan protektif yang terbentuk dipermukaan logam akan melarut ke dalam aliran air. Umumnya dianggap proses ini sebagai proses *steady-state*, dimana lapisan yang terlarut di antarmuka oksida-air akan digantikan oleh lapisan baru dengan ketebalan yang sama.



Gambar 2.7 Pengaruh kecepatan aliran air terhadap lapisan protektif [14].

5. pH

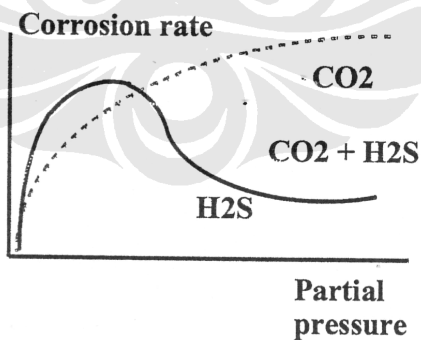
Laju korosi baja karbon meningkat seiring menurunnya pH. Situasi ini terutama ketika pH lingkungan menurun menjadi di bawah 7. Pasivitas dari beberapa paduan tergantung dari pH. Pada daerah yang local, korosi meningkat dengan pecahnya lapisan pasif. Karenanya korosi sumuran, korosi retak, dan stress corrosion cracking mungkin dapat terjadi.



Gambar 2.8 Pengaruh pH dan Temperatur pada Baja Karbon diLingkungan Soft Water [15].

6. Hidrogen Sulfida (H_2S).

Korosi ini disebabkan kehadiran unsur H_2S didalam sistem dengan ditandai adanya penurunan pH larutan. Gas ini bersifat sangat mudah larut dalam air dan akan menimbulkan korosi bila berhubungan dengan logam dan akan membentuk produk korosi berupa padatan berwarna hitam yang tidak mudah larut yang dikenal dengan nama besi sulfida (Fe_xS_x). Korosi jenis ini juga sering disebut sebagai *sour corrosion*.



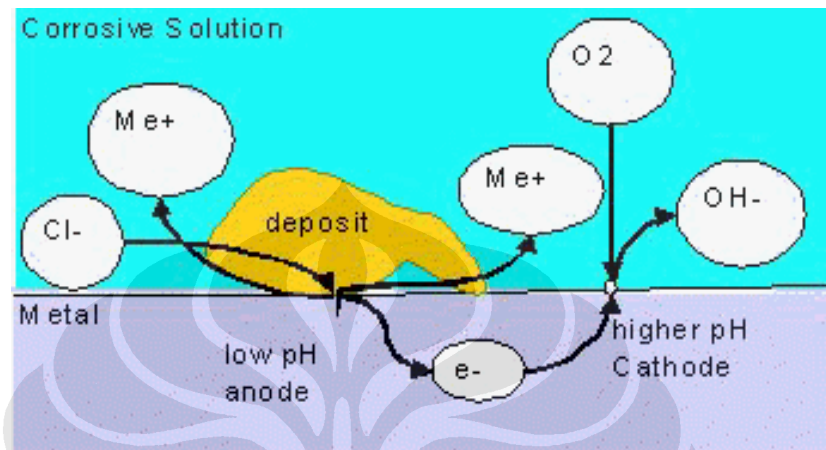
Gambar 2.9 Pengaruh tekanan parsial terhadap kecepatan korosi [14].

2.3.3 Korosi di Bawah Terak (Under Scale Corrosion)

Korosi jenis ini terjadi di tempat dimana deposit terlokalisasi pada unsur kimia tertentu, seperti klorida atau khususnya karena perbedaan kadar oksigen dari jumlah yang ditemukan pada lingkungan *bulk water*. Mekanisme korosi ini

merupakan reaksi kedua, setelah reaksi korosi pertama yaitu korosi merata (*uniform corrosion*). Namun, reaksi yang kedua ini dapat lebih merusak dan tidak dapat diprediksi [16].

Skematis dari korosi di bawah kerak (*under deposit corrosion*) dapat dilihat pada Gambar 2.10 seperti berikut ini:



Gambar 2.10 Skematis korosi di bawah kerak [16].

Urutan terjadinya kerusakan logam akibat korosi di bawah kerak ini adalah sebagai berikut [16]:

- Deposit terbentuk di permukaan logam baik dari pengendapan solid atau presipitasi dari unsur kimia yang terlarut.
- Dibawah deposit (*under deposit*), oksigen terlarut dikonsumsi oleh reaksi korosi yang pertama.
- Setelah konsentrasi oksigen di bawah deposit (*under deposit*) menjadi lebih sedikit (berkurang), dan secara signifikan kurang dari kadar oksigen yang ada pada *bulk water*, maka sel elektrolisis terbentuk.
- Area di bawah deposit (*under deposit*) menjadi anodik terhadap area di sekitarnya, dan logam mulai terkorosi secara lokal.
- Korosi yang semula sebagai korosi pertama, sekarang berubah menjadi yang kedua, sistem sel diferensial korosi.
- Laju sel diferensial korosi sebanding dengan perbedaan antara konsentrasi berkurangnya oksigen di bawah deposit (*under deposit*) dan oksigen yang ada di *bulk water*.

- g. Ion klorida yang bermuatan negatif cenderung untuk migrasi ke bawah deposit (*under deposit*) untuk menyeimbangkan muatan positif dari ion logam yang dihasilkan disana. Konsentrasi ion klorida yang tinggi menyebabkan area di bawah deposit (*under deposit*) menjadi lebih anodik dibandingkan dengan larutannya, karenanya laju korosi di bawah deposit juga ikut meningkat.
- h. Demikian juga sel konsentrasi korosi yang parah dapat melibatkan segregasi dari anion yang agresif di bawah deposit. Konsentrasi sulfat dan klorida, secara khusus merusak. Seperti ion Cu yang terkorosi (Cu^{2+}) meninggalkan permukaan anodik, ion klorida yang bermuatan negatif dan ion sulfat berdifusi lewat deposit tersebut untuk menjaga netralitasnya, kemudian menghasilkan konsentrasi elektrolit asam yang agresif.

2.4 Material

2.4.1 Komposisi dan Sifat Mekanis

Pipa yang menjadi bahan kajian terbuat dari bahan A106 grade B dengan komposisi sebagai berikut [17]:

Tabel 2.6 Komposisi kimia A106 Grade B [17]

Komposisi Kimia (%)					
C (max)	Si (min)	S (max)	P (max)	Mn	Fe
0,30	0,10	0,035	0,035	0,29 - 1,06	remaining
Ni (max)	Cr (max)	Mo (max)	Cu (max)	V (max)	
0,40	0,40	0,15	0,40	0,08	

Adapun sifat-sifat mekanis dari baja tersebut adalah:

UTS: 60.000 psi / 415 Mpa

Yield Strength: 35.000 psi / 240 Mpa.

2.4.2 Ketahanan Korosi

Dari kandungan karbonnya, baja ini termasuk baja karbon medium. Ketahanan korosi baja ini tergantung pada unsur-unsur paduannya. Dilihat dari komposisi paduannya, terlihat baja ini memiliki paduan yang cukup rendah, dimana kandungan dari unsur-unsur tersebut masih dibawah 10%. Namun baja ini

bukan termasuk HSLA, dikarenakan nilai UTS dan *yield strength*-nya yang jauh dibawah HSLA. Ketahanan korosi berasal dari kandungan Ni, Cr, dan Cu. Namun dikarenakan jumlahnya yang kecil, pengaruhnya pada ketahanan korosi baja ini juga kurang nyata. Cu memang meningkatkan ketahanan terhadap korosi atmosferik (*atmosferic corrosion*), namun tidak akan dapat berbuat banyak pada peristiwa korosi yang melibatkan air sebagai mediumnya. Keberadaan Si pada baja ini juga tidak berpengaruh pada ketahanan korosinya, dikarenakan jumlahnya yang kurang dari 15%.

2.5 Proses Pengelasan Baja Karbon Pada Pipa

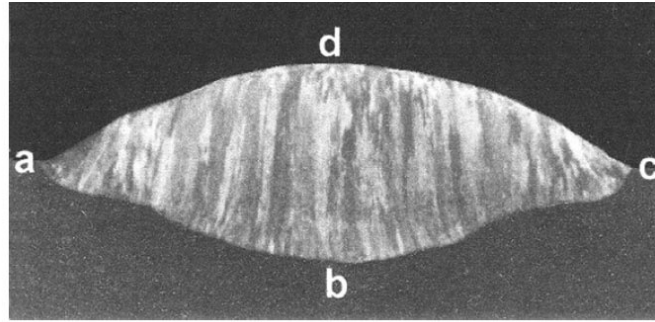
2.5.1 Umum

Proses pengelasan dapat diartikan sebagai proses penyambungan antara dua atau lebih material dalam keadaan plastis atau cair dengan menggunakan panas atau tekanan atau keduanya. Logam pengisi (*filler metal*) dengan temperatur lebur yang sama dengan temperatur lebur dari logam induk dapat atau tanpa digunakan dalam proses penyambungan tersebut. (*British Standard Institution 1983 : BS 449: Part1*).

Atau berdasarkan American Welding Society 1989 Welding Handbook Vol.1 8th ed. Disebutkan bahwa pengelasan adalah penyambungan dari logam atau non-logam yang dihasilkan dengan memanaskan material hingga temperatur las, dengan atau tanpa menggunakan tekanan, atau hanya tekanan, dengan atau tanpa menggunakan logam pengisi.

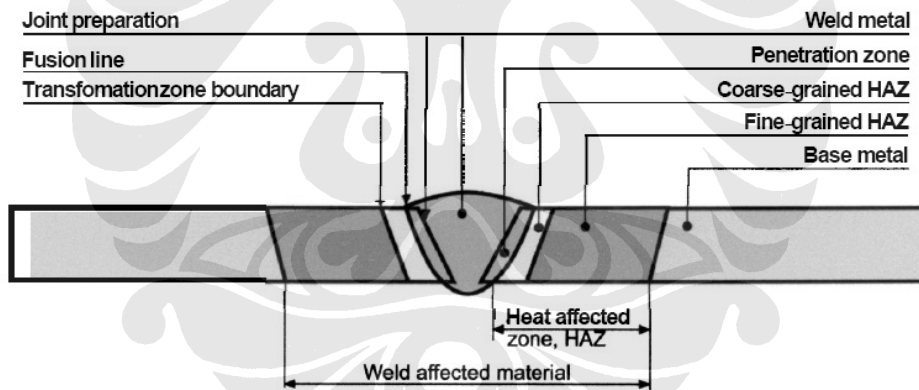
2.5.1.1 Area Lasan

Area lasan secara umum meliputi logam induk, weld area –sebagai daerah yang terkena panas langsung, dan *heat affected zone* (HAZ) –daerah yang terkena pengaruh panas.



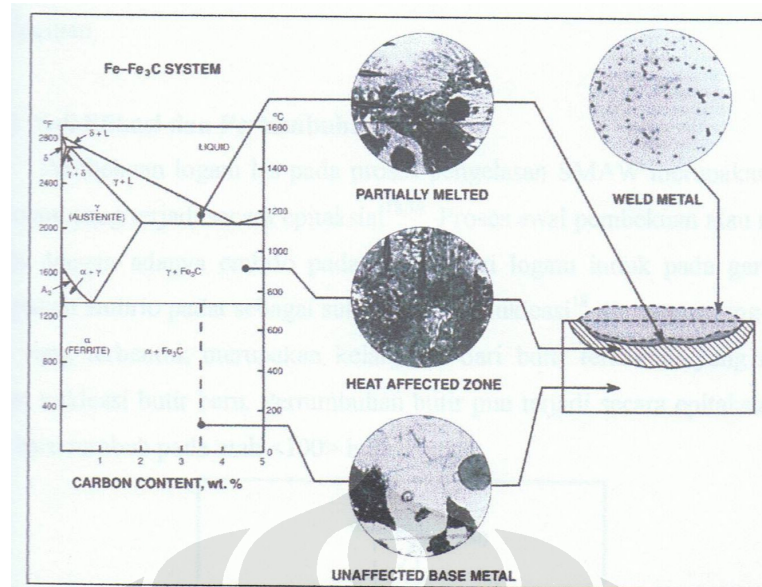
Gambar 2.11 Struktur utama dari *single-pass weld*, perbesaran 4x [18].

Pada Gambar 2.11 dijelaskan bahwa selama proses pengelasan yang terjadi pada daerah lasan ini adalah panas mengalir secara cepat dari lasan ke logam induk lewat permukaan yang diwakili oleh daerah abc, sementara permukaan adc karena kontak dengan atmosfer, maka panas yang hilang lebih cepat. Selama pembekuan logam, butir yang pertama tumbuh tegak lurus terhadap permukaan yang kehilangan panasnya sangat cepat, seperti pada permukaan yang meleleh. Berikut area lasan dapat dilihat oleh Gambar 2.12 seperti di bawah ini:

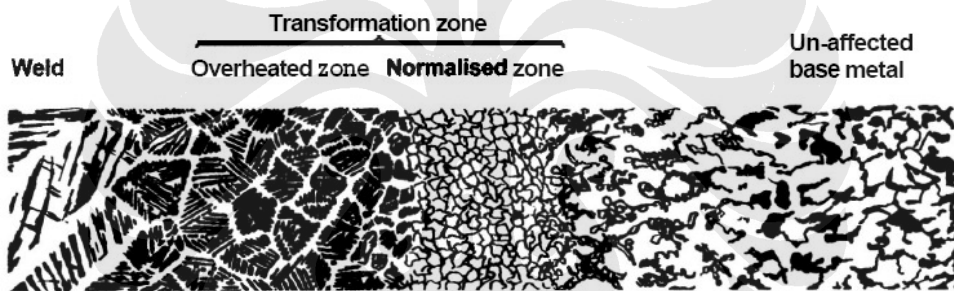


Gambar 2.12 Nomenklatur daerah las [18].

Dalam proses pengelasan terjadi perubahan struktur terhadap logam yang dilas. Gambar 2.14 menjelaskan secara skematis bagaimana panas akibat proses pengelasan berpengaruh terhadap mikrostruktur material itu sendiri.



Gambar 2.13 Skema daerah las [21].

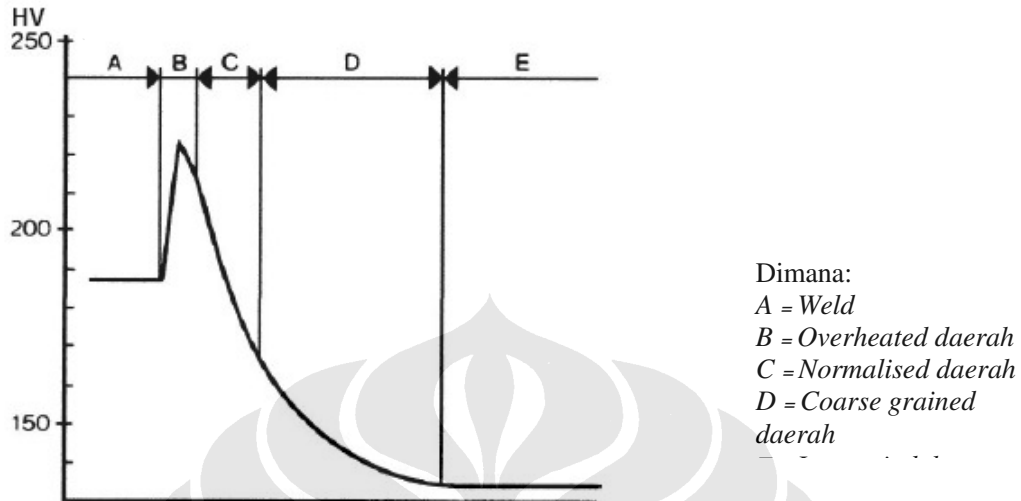


Gambar 2.14 Pengaruh panas terhadap perubahan mikrostruktur daerah las [18].

Struktur material induk yang tidak terkena pengaruh panas ditunjukkan pada bagian kanan dari Gambar 2.14.

Daerah transisi yang dikenal sebagai *heat affected daerah* (HAZ) dapat dengan jelas dilihat berdekatan dengan sambungan. HAZ ini dapat dibagi menjadi daerah normalisasi, yang dipanaskan sampai dengan temperatur di atas A_3 , dan daerah *overheated*, dimana temperturnya di atas temperatur A_3 sampai dengan titik leleh material tersebut. Struktur dari daerah *overheated* ini adalah pembesaran butir, dan sebagian berorientasi *Widmanstatten*. Sedangkan logam las dapat dilihat struktur bagian kiri, pada kasus ini struktur yang terlihat adalah *Widmanstatten*.

Bukan hanya mikrostruktur yang mengalami pengaruh panas akibat proses pengelasan, tetapi juga kekerasan. Adapun kekerasan di setiap kontur pada daerah lasan adalah seperti nampak pada Gambar 2.15 di bawah ini:



Gambar 2.15 Tipikal kekerasan pada daerah las untuk *plain carbon steel* [18].

Jika *heat input* lebih rendah dibandingkan dengan ketebalan di sekitar logam, pendinginannya akan cepat dan martensit akan terbentuk. Ini berarti kekerasan akan meningkat, dan pada beberapa kasus akan rentan dengan resiko *hydrogen cracking* dan penggetasan (*embrittlement*). Secara umum, kekerasan sebaiknya tidak melebihi 350 HV, atau agak sedikit lebih besar untuk baja dengan paduan mikro.

2.5.2 Kemampulan pada Baja Karbon

Baja merupakan material berbahan dasar Fe dengan kandungan karbon maksimal 2% dengan sedikit penambahan mangan dan silikon untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Baja merupakan material yang paling banyak digunakan karena relatif murah dan mudah dibentuk.

Kemampulan (*weldability*) didefinisikan sebagai kemampuan material untuk dapat dilas di bawah kondisi perakitan khusus sehingga sesuai dengan desain struktur dan dapat menunjukkan performa yang memuaskan di lapangan [21]. Adapun kemampulan baja terlihat pada table 2.7 di bawah ini:

Tabel 2.7 Klasifikasi dan kemampuan baja karbon [19].

Common name	Carbon content, percent	Typical hardness	Typical use	Weldability
Low carbon steel	0.15 max	60 HRB	Special plate and shapes, sheet, strip, welding electrodes	Excellent
Mild steel	0.15-0.30	90 HRB	Structural shapes, plate, and bar	Good
Medium carbon steel	0.30-0.50	25 HRC	Machine parts and tools	Fair (preheat and postheat normally required; low-hydrogen welding process recommended)
High carbon steel	0.50-1.00	40 HRC	Springs, dies, railroad rail	Poor (low-hydrogen welding process, preheat, and postheat required)

Untuk baja AISI 12XX merupakan baja karbon yang didesulfurisasi dan dideposporisasi dengan tujuan untuk meningkatkan kemampuan permesinannya, namun baja jenis ini sulit untuk dilakukan penyambungan dengan cara pengelasan karena memiliki kecenderungan untuk terjadinya retak panas [19].

Temperatur logam selama pengelasan terjadi dari logam tersebut meleleh sampai dengan logam induk yang tidak terkena pengaruh panasnya. Gradien temperatur secara kontinyu akan ada dalam kedua kondisi ekstrim tersebut. Mikrostruktur dan sifat mekanis dalam HAZ akan berubah selama proses pengelasan. Perubahan yang terjadi tergantung dari komposisi dan laju pemanasan dan pendinginannya [19].

Untuk beberapa baja, siklus panasnya merupakan hasil dari pembentukan martensit pada logam las dan di HAZ [20]. Jumlah martensit yang terbentuk dan kekerasan dari baja tergantung dari kandungan karbon yang terbentuk selama proses pemanasan dan pendinginan. Derajat pengerasan di HAZ merupakan hal yang penting untuk menentukan kemampuan dari baja karbon. Kemampuan akan menurun dengan peningkatan karbon (martensit) di logam las dan di HAZ, atau di keduanya.

Meskipun karbon merupakan unsur yang sangat signifikan dalam kemampuan dari karbon baja, efek unsur lain juga dapat diperkirakan dengan menjumlahkannya ke dalam persamaan berikut:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{4} \dots\dots (Persamaan 2.4) [19]$$

Berikut hubungan antara nilai *carbon equivalent* (CE) dengan kemampuan dan prosedur yang dianjurkan.

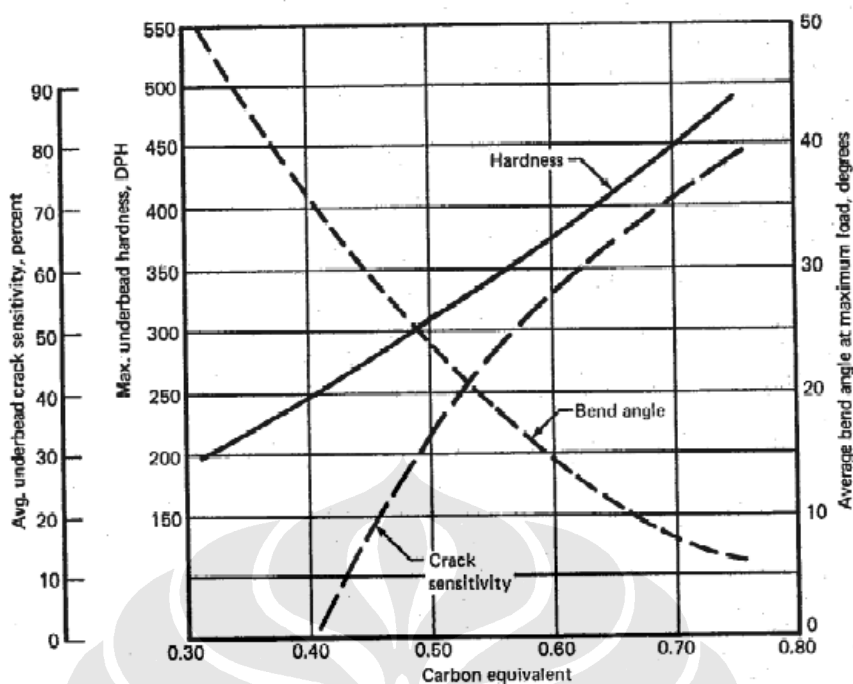
Tabel 2.8 Hubungan antara nilai carbon equivalent (CE) dengan kemampuan [21].

C.E	Kemampuan	Prosedur Pengelasan
<0.4	Sangat baik	Preheat untuk mengurangi moisture
0.41 – 0.45	Baik	Preheat + elektroda rendah H
0.46 – 0.52	Cukup baik	Preheat + elektroda rendah H + <i>interpass</i> kontrol T
>0.52	Buruk	Preheat + elektroda rendah H + <i>interpass</i> kontrol T + Post Weld Heat Treatment (PWHT)

Dalam kemampuan baja, terdapat 5 karakteristik yang harus dipertimbangkan, yaitu [21]:

- a. Kemungkinan terbentuk martensit di HAZ
Terbentuknya martensit karena adanya factor dari kimiawi unsure dan kecepatan pendinginan.
- b. Kehadiran (kelarutan) ion hydrogen (H^+)
Perlu dilakukan preheat agar H^+ berdifusi keluar.
- c. Tegangan sisa (*residual stress*)
- d. Kekuatan lasan dan perlunya preheat
- e. Menyesuaikan sifat-sifat korosi sambungan

Dan secara umum kerentanan terhadap *underbead cracking* dari hidrogen meningkat ketika nilai CEnya melebihi 40.



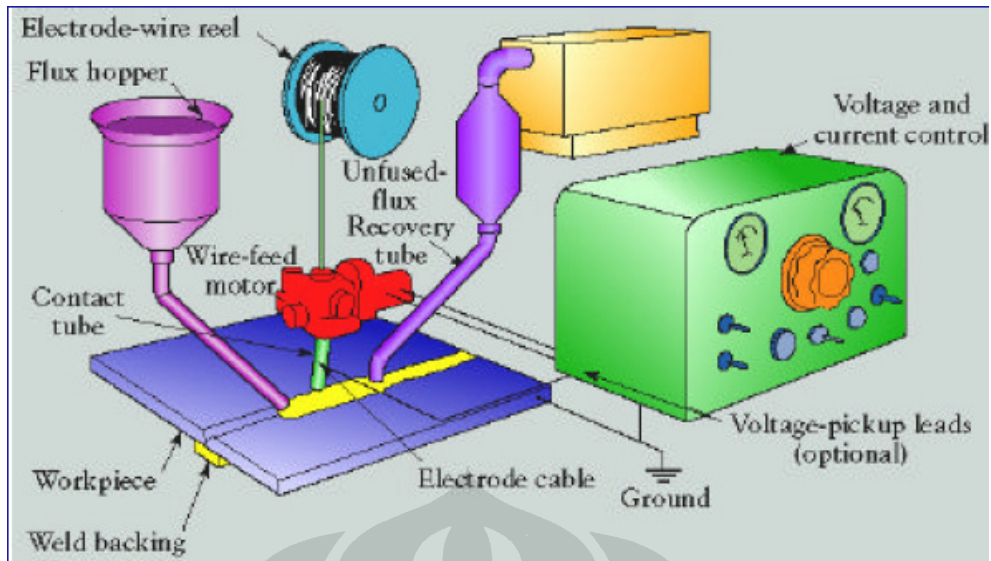
Gambar 2.16 Hubungan antara komposisi dan *underbead hardness*, sensitivitas crack, dan *notch-bead bead angle* untuk ketebalan 1 inci. Baja C-Mn plate welded dengan elektroda E6010 [19].

2.5.3 Metode Pengelasan pada Pipa

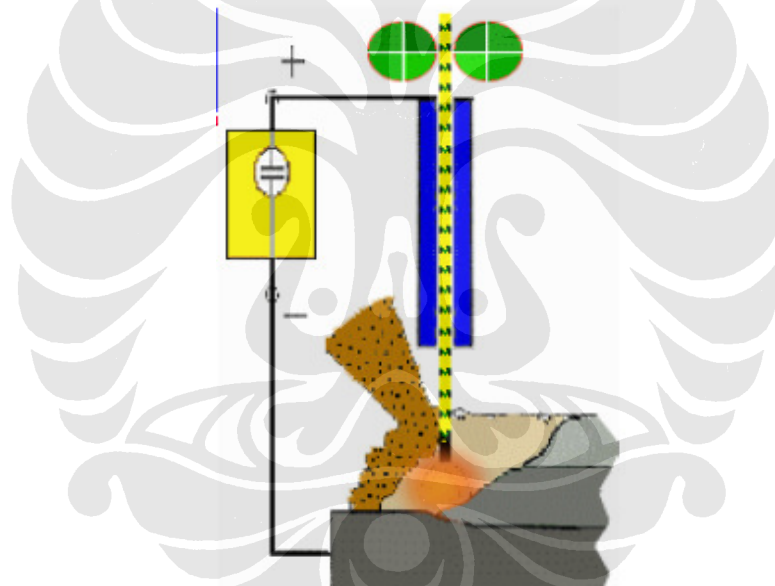
Metode pengelasan pada struktur yang umum dilakukan ada 2 metode, yaitu dengan metode las busur terendam - SAW (*Submerged Arc Welding*) dan metode GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).

2.5.3.1 Las Busur Terendam -SAW (*Submerged Arc Welding*)

SAW mampu menghasilkan single weld pada plat tebal (>1 inci) dengan posisi datar (*flat*) dengan arus hingga 2000 amper dengan sumber AC atau DC. Prinsip metode SAW ini adalah elektroda dalam bentuk kawat diumpankan ke kampuh las benda kerja secara kontinyu dan ditutup dengan fluks dalam bentuk serbuk halus. Busur listrik tercipta diantara elektroda dan benda kerja namun tidak terlihat karena elektroda tertutup oleh fluks sehingga namanya disebut las busur terendam [21].



Gambar 2.17 Skematis las busur teredam SAW [21].



Gambar 2.18 Skematis las busur teredam SAW [21].

Keuntungan las busur teredam (SAW) ini adalah [18], [21]:

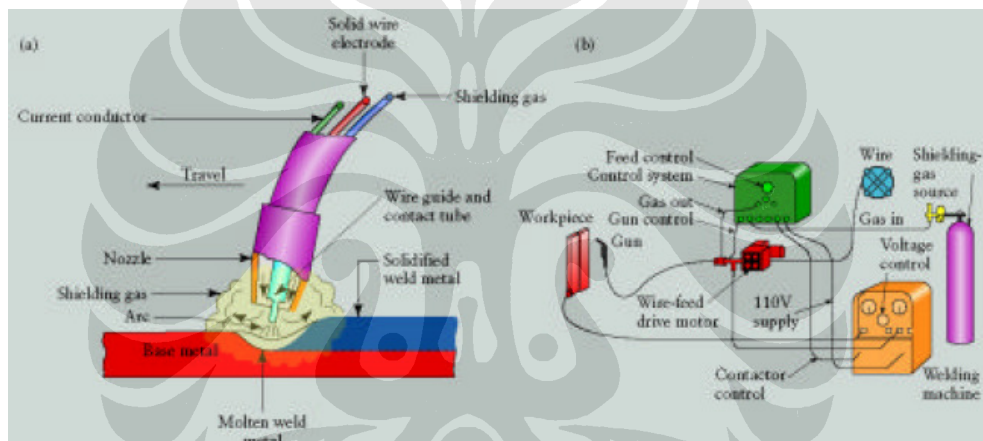
- Asap hasil proses las ini sedikit dan karena fluks menutup seluruh busur listrik maka tidak dibutuhkan helm atau kaca pelindung.
- Penggunaan arus yang tinggi mengakibatkan proses ini memiliki efisiensi/produktivitas yang tinggi.
- Laju deposit tinggi
- Penetrasi dalam, sehingga penggunaan filler material dapat dikurangi.
- Kualitas las baik.

Keterbatasan las busur teredam (SAW) adalah sebagai berikut [21]:

- Hanya untuk posisi pengelasan datar (*flat*)
- Karena penetrasi las sangat dalam maka kualitas logam las yang dihasilkan sangat tergantung pada komposisi logam induk dan kondisi pengelasan.

2.5.3.2 Las MIG - GMAW (Gas Metal Arc Welding).

Karakteristik metode pengelasan ini adalah menggunakan busur yang terbentuk antara kawat las terumpan dan *weld pool*, serta menggunakan gas sebagai pelindung dan tanpa menggunakan tekanan. Penggunaan pengumpan kawat (*wire feeder*) adalah untuk mengontrol arus las, aliran gas dan pendingin air. Sedangkan power supply yang dipakai arus yang dipakai adalah tipe constant-voltage (DVVC) [21].



Gambar 2.19 Skematis GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) [21].

Keunggulan metode las GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) ini adalah [21]:

- Merupakan satu-satunya proses elektroda terumpan yang dapat digunakan untuk mengelas semua logam dan paduannya.
- Mengatasi permasalahan mengenai panjang elektroda yang terbatas pada SMAW.
- Pengelasan dapat dilakukan pada semua posisi.
- Laju deposit lebih besar dibandingkan dengan SMAW.
- Kecepatan las lebih cepat dibandingkan dengan SMAW.
- Lasan yang panjang dapat dibuat tanpa harus mengalami penyetakan.

Kelemahan metode las GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) antara lain [21]:

- Peralatan lebih kompleks dibandingkan SMAW.

- Penggunaannya lebih sulit dibandingkan dengan SMAW.

2.5.4 Cacat Las

Defect adalah cacat secara alamiah yang efeknya terakumulasi pada suatu produk sehingga tidak dapat memenuhi standar atau spesifikasi minimum yang dipersyaratkan atau direject. Sedangkan *discontinuity* adalah ketidakseragaman dari tipikal struktur suatu material seperti ketidakhomogenan pada sifat mekanisnya, metalurginya atau sifat fisiknya. Diskontinyu tidak selalu merupakan cacat [21].

Semua proses pengelasan dapat menghasilkan cacat pengelasan seperti: inklusi, porositas, undercutting, pembekuan tidak sempurna, penetrasi tidak sempurna dan retak. Penyebab terjadinya cacat las tersebut dapat dikarenakan oleh teknik pengelasan yang tidak baik, pemilihan parameter las yang tidak tepat, logam induk dan kawat las yang tidak tepat serta tidak sesuainya gas pelindung yang digunakan.

Adapun jenis-jenis dari cacat las adalah sebagai berikut:

a. *Incomplete of penetration*

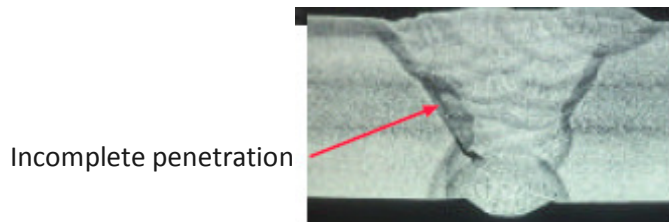
Incomplete penetration adalah cacat pada alur las dimana logam las tidak menyatu dengan filler metalnya secara sempurna. Penyebab umum dari cacat jenis ini adalah desain alur las yang buruk atau desain yang tidak sesuai dengan kondisi lasan. *Incomplete penetration* dapat terjadi jika [21]:

- Arus terlalu rendah
- Diameter terlalu besar
- Tidak cukup celah (gap)
- Sudut kawat las terlalu curam
- Urutan las tidak benar
- Rusaknya atau berkurangnya oksida atau material asing lainnya di permukaan logam induk yang seharusnya deposit tersebut bergabung dengan logam las.

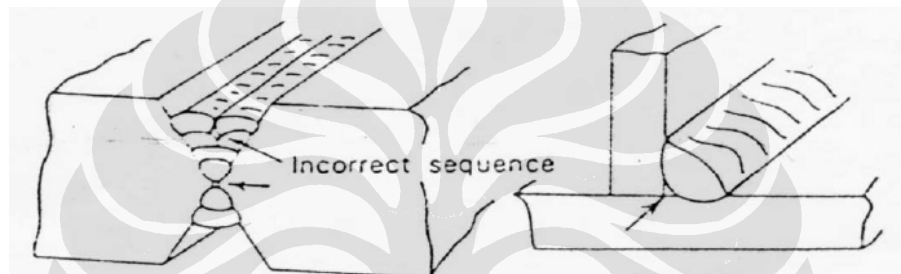
Incomplete of penetration dapat dicegah dengan desain sambungan yang benar, antara lain dengan cara [21]:

- Meningkatkan arus

- Diameter elektroda diperkecil
- Memberi celah las (gap)
- Menggunakan sudut kawat las 45° dan
- Melakukan proses pengelasan sesuai dengan urutan.



Gambar 2.20 Cacat las *incomplete penetration* [21].



Gambar 2.21 Skematik cacat las *incomplete penetration* [21]

Efek ukuran elektroda pada sambungan lasan:



Gambar 2.22 Pengaruh ukuran elektroda pada sambungan lasan; a) diameter elektroda besar dan b) diameter elektroda kecil [21].

b. Inklusi terak (*Slag inclusion*)

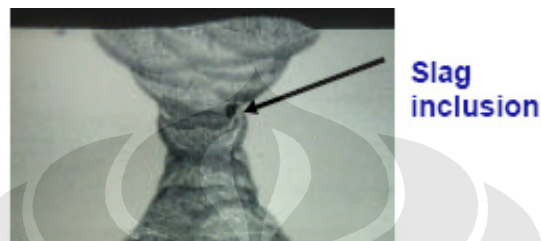
Inklusi terak merupakan cacat yang dijumpai pada logam las yang dihasilkan dari proses *arc welding* yang menggunakan fluks sebagai pelindung atmosfer. Cacat ini terbentuk karena adanya terak, oksida atau sisa elektroda yang masuk ke dalam deposit las. Penyebab dari cacat las jenis ini adalah karena [21]:

- Kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi/rendah
- Kampuh terlalu lebar
- Arus terlalu rendah

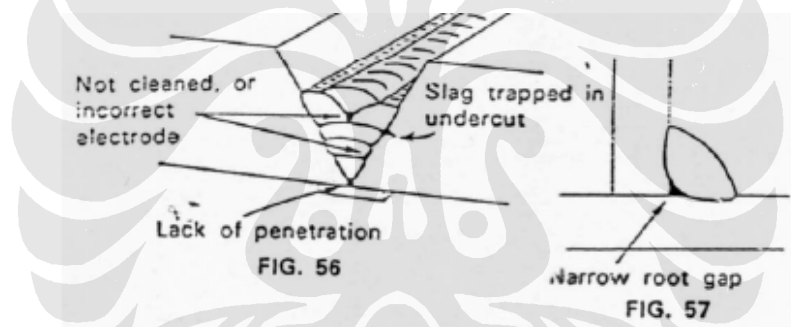
- Konsumsi elektroda yang berlebih
- Kontak antara elektroda dengan logam induk terlalu lama, dan
- Komposisi fluks yang tidak sesuai.

Inklusi terak ini dapat dicegah antara lain dengan cara [21]:

- Menggunakan kawat las yang kecil dan sesuai
- Preparasi las harus baik dan
- Membersihkan sambungan sebelum mengelas.



Gambar 2.23 Cacat las inklusi terak [21].



Gambar 2.24 Cacat las inklusi terak [21].

c. Undercut

Undercut adalah cacat pada bagian bawah logam induk yang tidak terisi.

Penyebab cacat las ini dikarenakan oleh [21]:

- Penggunaan arus dan voltase yang terlalu tinggi,
- Kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi,
- Penggunaan kawat pengisi yang terlalu sedikit
- Kemiringan elektroda yang kurang tepat.

Untuk mencegah terjadinya cacat *undercut* ini adalah dengan cara, seperti berikut [21]:

- Mengecilkan arus
- Busur dijaga tetap pendek

- Diameter elektroda diperkecil
- Sudut kawat las 45°

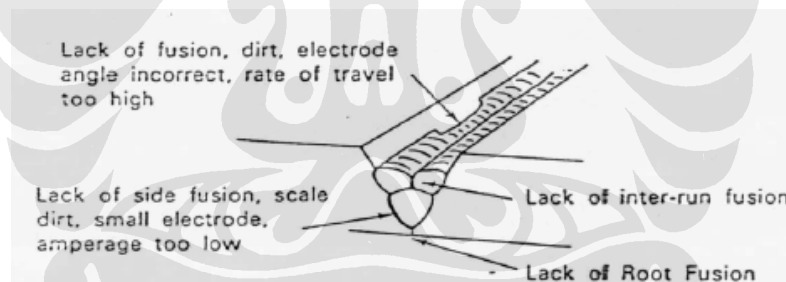
d. *Lack of fusion*

Jenis cacat ini dikarenakan tidak terisinya kampuh las secara sempurna oleh kawat pengisi. Penyebab jenis cacat las ini antara lain karena [21]:

- Penggunaan arus yang terlalu rendah
- Kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi
- Geometri sambungan yang kurang tepat, dan
- Diameter elektroda yang terlalu besar.

Dan cara untuk mencegah terjadinya cacat *lack of fusion* ini adalah dengan cara [21]:

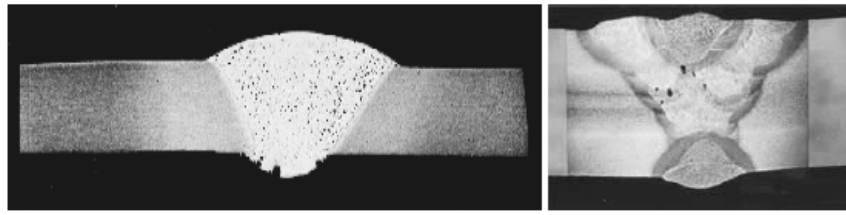
- Meningkatkan arus
- Menggunakan diameter elektroda yang diperkecil
- Menggunakan sudut kawat las 45° , dan
- Membersihkan permukaan sebelum mengelas.



Gambar 2.25 Cacat *Lack of fusion* [21].

e. Porositas

Porositas ini merupakan jenis cacat las yang berupa lubang halus yang terjadi akibat adanya udara/gas yang terperangkap dalam deposit las. Penyebab dari porositas ini antara lain elemen pengotor, adanya kelembaban atmosfer, dan adanya kontaminasi bahan lain seperti minyak, pelumas atau kotoran lain [21].



Gambar 2.26 Cacat las akibat porositas [21].

2.6 Failure Analysis

2.6.1 Teknik Analisis Kegagalan (Failure Analysis)

Kegagalan merupakan ketidakmampuan suatu komponen untuk dapat berfungsi sebagaimana mestinya, dan perpatahan tidak perlu harus terjadi [1]. Dalam suatu industri pasti dapat terjadi kegagalan atau kerusakan pada salah satu peralatannya. Dalam buku referensi *ASM Metals Handbook Volume 10, Eighth Edition*, ada pedoman dasar yang dapat diikuti dalam suatu analisis kegagalan. Yang perlu ditekankan bahwa sebagai langkah awal dalam analisis kegagalan adalah jangan melakukan apa-apa kecuali dengan pengamatan visual pada barang bukti. Berikut ini langkah-langkah yang harus dilakukan dalam analisis kegagalan dengan tahap-tahapnya sebagai berikut :

1. Mengumpulkan data mengenai sampel
2. Penelitian awal pada bagian yang mengalami kegagalan, yaitu dengan *visual examination* dan rekam hasil yang didapat.
3. *Nondestructive testing*.
4. Pemilihan, dan preparasi specimen *metallography*.
5. Penelitian dan analisis specimen *metallography*.
6. *Mechanical testing*, termasuk di dalamnya pengujian kekerasan, dan ketangguhan.
7. Pemilihan, identifikasi, penanganan atau pembersihan specimen dan bandingkan dengan bagian yang tidak mengalami kegagalan.
8. Pengamatan struktur makro, analisis, dan dokumentasikan dengan Gambar mengenai permukaan perpatahan, *secondary crack*, dan fenomena yang lain.
9. Pengamatan struktur mikro, analisis (dapat menggunakan mikroskop elektron jika diperlukan).

10. Penentuan mekanisme perpatahan.
11. Analisis kimia, seperti produk korosi, adanya deposit, coating.
12. Analisis mekanisme perpatahan.
13. Pengujian di bawah kondisi sebenarnya (*service condition*).
14. Analisis semua bukti, formulasi, kesimpulan, dan susun sebuah laporan termasuk rekomendasi di dalamnya.

Beberapa prinsip yang perlu ditekankan dan diperhatikan dalam analisis kegagalan adalah:

- a. Lokasi asli dari perpatahan yang terjadi, temukan lokasi dari perpatahan tanpa merusak permukaan patahan
- b. Jangan berusaha untuk mengembalikan perpatahan yang terjadi, dengan menyatukan kembali kedua permukaan patahan kecuali dengan penanganan yang hati-hati dan perlindungan
- c. Jangan melakukan pengujian merusak tanpa perencanaan yang tepat, karena sampel yang telah dipotong tidak bisa disatukan, sampel yang telah digerinda tidak dapat dikembalikan ke kondisi awal. Secara umum, pengujian merusak dapat dilakukan jika semua informasi yang mungkin diperlukan telah diperoleh dan semua penampakan telah didokumentasikan secara seksama dengan Gambar [1].

Dalam industri, kegagalan pada suatu peralatan merupakan hal yang sering terjadi, ada beberapa faktor yang dapat menjadi penyebab terjadinya suatu kegagalan, faktor tersebut antara lain :

- a) Salah disain, dimana bisa karena adanya *stress concentration*, ketidaksesuaian dimensi, dsb
- b) Salah dalam pemilihan material, hal ini berhubungan dengan *mechanical properties*-nya, selain itu *physical properties*-nya, dan mungkin *chemical properties*-nya
- c) Ketidaktepatan material, misalnya adanya cacat saat proses fabrikasinya, adanya *residual stress*
- d) Kesalahan dalam fabrikasi

- e) Salah dalam perakitan, adanya ketidaksesuaian antara bagian yang dirakit, adanya ketidakakuratan dalam proses permesinan misal karena akumulasi dari toleransi yang ada
- f) Kondisi operasi, yaitu terjadinya *over load*, *over speed*, dan lingkungan yang korosif
- g) Kondisi perawatan, jadwal overhaul, metode pengukuran, jadwal pelumasan. dll.

