

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Geothermal

Secara bahasa, *geothermal* berasal dari bahasa Yunani *geo* yang berarti bumi dan *therme* yang berarti panas [1]. Sampai 2008, *geothermal* baru menyuplai sekitar satu persen energi dunia [2]. Sumber *geothermal* berkisar dari tanah rendah hingga air dan batu panas yang berada beberapa kilometer di bawah permukaan bumi, hingga kedalaman yang lebih jauh lagi berupa bara yang sangat panas berupa magma. Sumur dengan kedalaman beberapa kilometer dapat digali ke dalam reservoir bawah tanah untuk menghasilkan uap dan air yang sangat panas yang akan dialirkan ke permukaan dengan berbagai aplikasi [1].

Sistem *geothermal* ada dua tipe [3], yaitu:

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

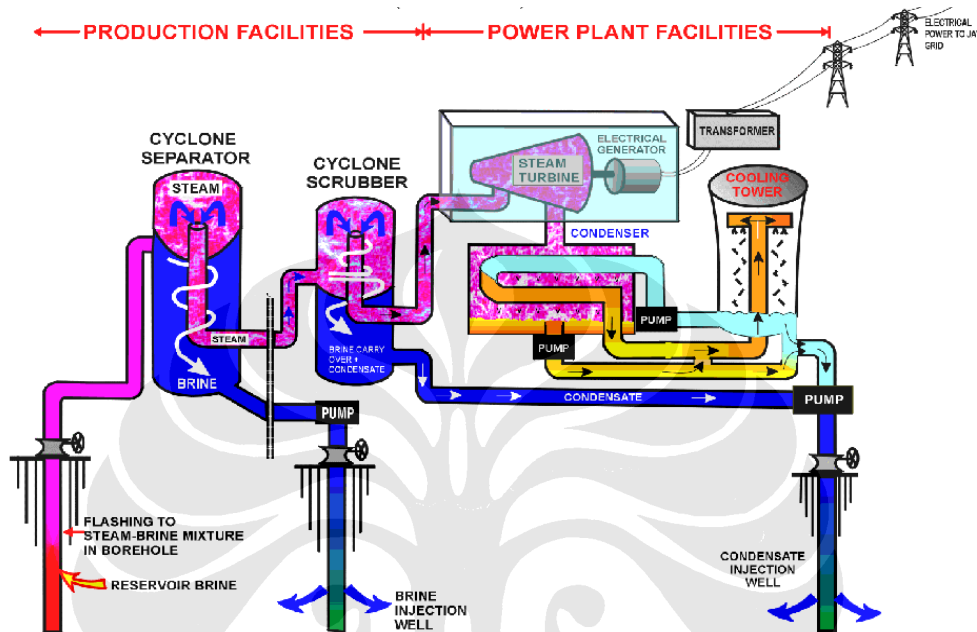
Untuk sistem yang didominasi air, aliran cairannya bersifat berkelanjutan, dengan fasa fluida diatur oleh tekanan. Terkadang dapat dijumpai uap, umumnya sebagai gelembung-gelembung. Sistem *geothermal* ini berada pada skala suhu 125°C - 225°C, yang merupakan mayoritas di dunia. Sistem ini tergantung kepada suhu dan kondisi tekanan, maka mereka dapat menghasilkan air panas, campuran air dan uap, uap basah dan dalam beberapa kasus juga menghasilkan uap kering.

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

Untuk sistem yang didominasi uap, cairan air dan uap normalnya dapat dijumpai di reservoir, dengan uap yang mengalir dengan berkelanjutan. Pada sistem ini, tekanan adalah berfungsi sebagai pengontrol fasa. Sistem *geothermal* tipe ini paling dikenal oleh

Larderello di Itali dan The Geysir di California. Biasanya sistem ini menghasilkan uap yang kering hingga *superheated*.

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



Gambar 2.1. Skematik power plant geothermal Salak

The Operational Excellence Management System (OEMS) Leadership Roles.ppt (Gunung Salak: 2008)

Kondisi lingkungan dan air di fasilitas *geothermal* sendiri merupakan bervariasi antara tiap satu daerah dengan daerah lainnya. Misalkan, untuk daerah *geothermal* Cerro Pierto memiliki air dengan kandungan gas terlarut berupa oksigen, karbon dioksida, ammonia, dan hidrogen sulfida[4].

Kandungan garam-garam ini akan mempengaruhi konduktivitas dan keagresifan larutan, ditambah lagi keberadaan ion klorida yang dapat menyebabkan korosi setempat seperti misalnya korosi sumuran[5].

## 2.2 Korosi

### 2.2.1 Definisi Korosi

Secara umum, korosi berarti degradasi material dikarenakan reaksi dengan lingkungan[6]. Secara umum, peristiwa korosi memiliki beberapa syarat yang harus terpenuhi[7], yaitu:

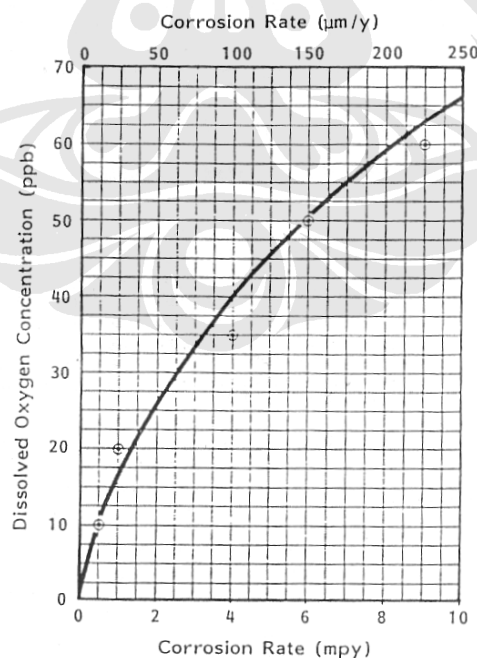
1. Anoda. Anoda merupakan bagian logam yang menjadi tempat terlepasnya elektron. Bagian ini umumnya akan mengalami kerusakan karena atom-atom logam akan berubah menjadi ion-ionnya.
2. Katoda, merupakan tempat elektron ditangkap.
3. Elektrolit atau lingkungan korosif, hal ini akan memicu terbentuknya anoda dan katoda setempat.
4. Hubungan listrik antara anoda dan katoda, sambungan ini akan memungkinkan arus elektron mengalir dari anoda ke katoda.

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. Pengaruh lingkungan terhadap korosi adalah:

1. Temperatur [8]. Temperatur mempunyai efek yang bervariasi terhadap korosi. Pada temperatur kamar laju korosi relatif rendah namun dapat meningkatkan kondensasi lapisan film pada permukaan yang meningkatkan korosi. Dan peningkatan temperatur dapat menurunkan laju korosi dengan terjadinya proses pengeringan pada permukaan. Namun adanya kombinasi dengan antara nilai kelembaban dan temperatur yang tinggi serta diikuti oleh adanya polutan akan meningkatkan laju korosi. Pada lingkungan berair (*aqueous*), temperatur mempengaruhi laju, temperatur permukaan, heat flux, dan konsentrasi permukaan yang terkait, dan gradien transfer kimia. Pada kebanyakan reaksi kimia, peningkatan temperature diikuti dengan peningkatan laju reaksi. Aturan kasar

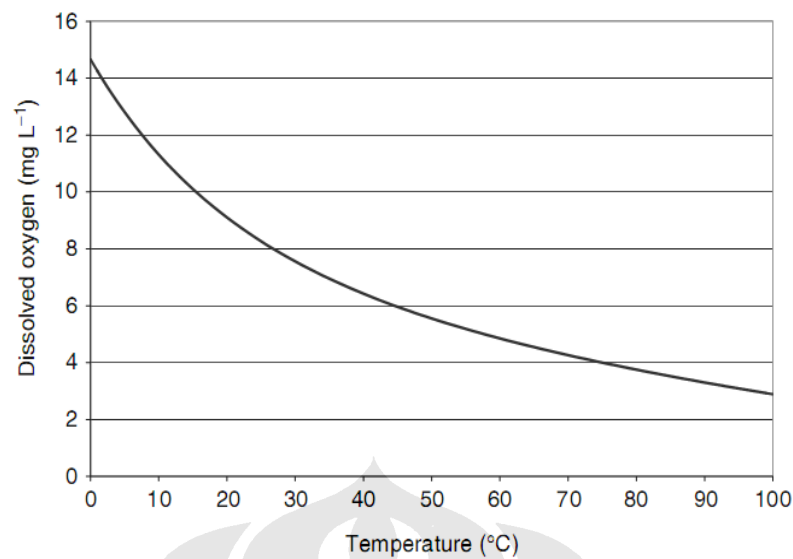
jempol (*rule-of-thumb*) menyatakan laju reaksi meningkat dua kali lipat tiap kenaikan temperatur sebanyak 10°C.

2. Oksigen [8]. 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 2.1. 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 2.2. Selain itu, pada air yang mengandung garam, kandungan oksigen terlarut juga dipengaruhi oleh kadar garam-garam yang terlarut. Pada air yang mengandung garam NaCl misalnya, kadar oksigen terlarut paling tinggi terdapat pada kadar NaCl 3,5%. Oleh karena itulah, air laut bersifat sangat korosif, dikarenakan kombinasi dari tingginya kadar oksigen terlarut dengan garam NaCl.



Gambar 2.2. Pengaruh kelarutan oksigen terhadap laju korosi

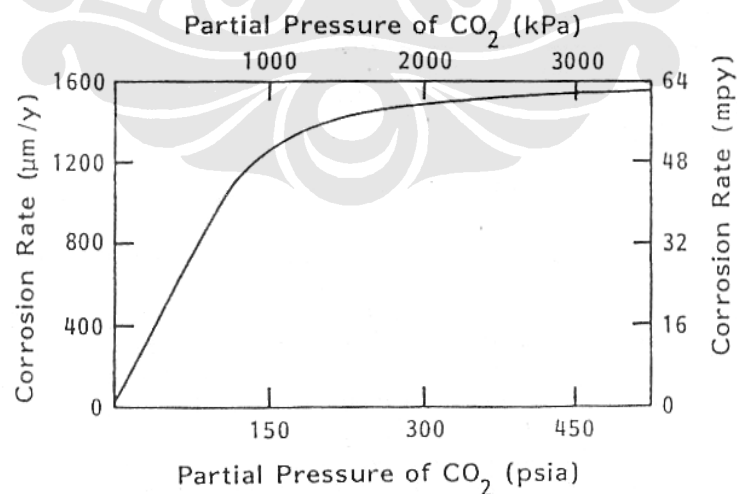
Charles C Patton, *Applied Water Technology*, (Oklahoma: Campbell Petroleum Series, 1986)



Gambar 2.3. Hubungan konsentrasi oksigen terlarut terhadap suhu

A. Morshed, M.B Kermani, "Carbon Dioxide Corrosion in Oil and Gas Production – A Compendium". *Corrosion Journal*, Vol 59 No 8 (2003), NACE

3. Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Gas karbondioksida merupakan asam lemah dan bersifat korosif bila terlarut dalam air. Sebelum bersifat asam, CO<sub>2</sub> pertama kali harus terhidrasi menjadi H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Pada baja proses korosi dikontrol oleh laju pembentukan produk korosi CO<sub>2</sub> berupa scale FeCO<sub>3</sub> yang bersifat protektif.

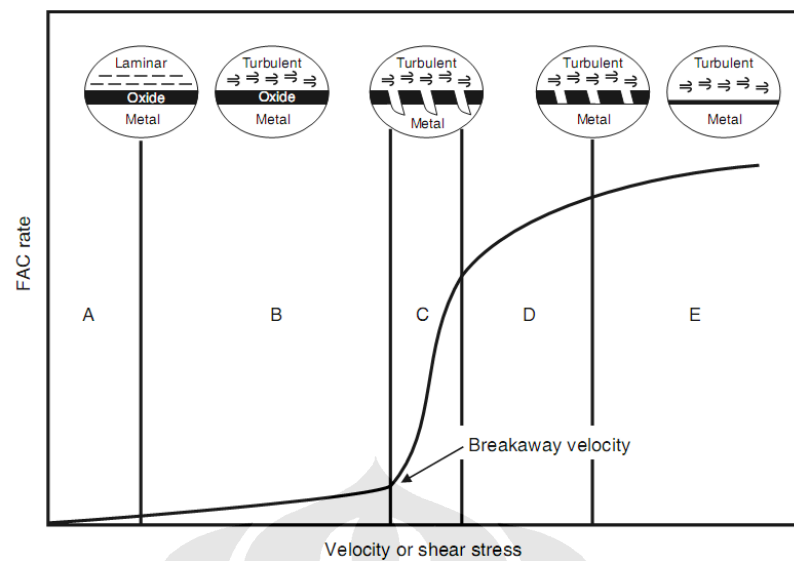


Gambar 2.4. Pengaruh tekanan parsial CO<sub>2</sub> terhadap laju korosi

Charles C Patton, *Applied Water Technology*, (Oklahoma: Campbell Petroleum Series, 1986)

4. Pengaruh kecepatan aliran air [8]. Kecepatan aliran air dapat mempengaruhi kecepatan korosi dengan interaksinya terhadap lapisan protektif yang umum terdapat pada logam., kecepatan tertentu akan meningkatkan laju korosi dengan menyingkap lapisan oksida pelindung ataupun pasif dari permukaan logam atau pipa terhadap lingkungan. Pada kecepatan lain, aliran dapat menurunkan laju korosi dengan menyingkirkan ion-ion agresif dari permukaan logam [8].

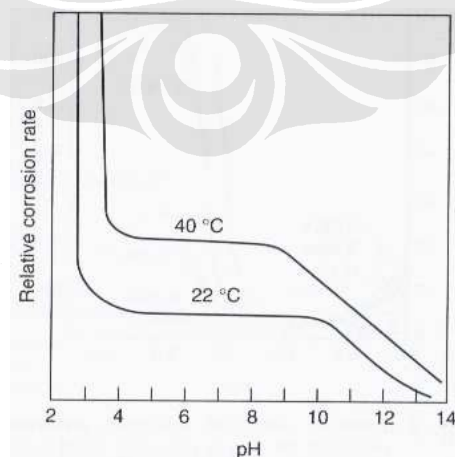
Tiap logam umumnya memiliki batas kecepatan yang akan menyebabkan korosi yang disebut *breakaway velocity* [8]. Di bawah kecepatan aliran ini, laju korosi tidak akan terpengaruh, sedangkan di atas kecepatan ini, laju korosi akan meningkat cukup banyak. Sentuhan lapisan pasif atau protektif dengan aliran 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  $<1\text{mm/year}$ . Pengaruh berbagai kecepatan alir terhadap lapisan protektif dapat dilihat pada gambar. 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 2.5. Pengaruh kecepatan alir air terhadap lapisan protektif

Pierre Roberge, *Corrosion Inspection and Monitoring* (United State of America: WILEY-INTERSCIENCE A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007) hal. 7.

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 2.6. Pengaruh pH dan Temperatur pada laju korosi

ASM Handbook, *Metals Handbook Volume 13B: Corrosion: Materials* (ASM International, 2005)

### 2.2.2 Laju Korosi

Laju korosi didefinisikan sebagai banyaknya logam yang dilepas tiap satuan waktu pada permukaan tertentu [9]. Laju korosi umumnya dinyatakan dengan satuan *mil per year* (mpy). Satu mil adalah setara dengan 0,001 inchi. Laju korosi dapat ditentukan dengan berbagai cara, diantaranya dengan ekstrapolasi kurva tafel. Pada tabel berikut dapat dilihat hubungan laju korosi dengan ketahanan korosinya (relatif).

Tabel 2.1. Tabel Hubungan laju korosi dan ketahanan korosi

Ketahanan Korosi Relatif	Laju Korosi				
	Mpy	Mm/yr	$\mu\text{m/yr}$	Nm/hr	Pm/s
Sangat baik sekali	< 1	< 0,02	< 25	< 2	< 1
Sangat baik	1 – 5	0,02 – 0,1	25 - 100	2 - 10	1 -5
Baik	5 -20	0,1 – 0,5	100 - 500	10 - 50	20 - 50
Cukup	20 – 50	0,5 – 1	500 - 1000	50 - 150	20 - 50
Kurang	50 – 200	1 -5	1000 - 5000	150 - 500	50 - 200

Denny A. Jones, *Principle and Prevention of Corrosion 2nd Edition* (Singapore: Prentice Hall International, Inc 1999) hal 34 (telah diolah kembali)

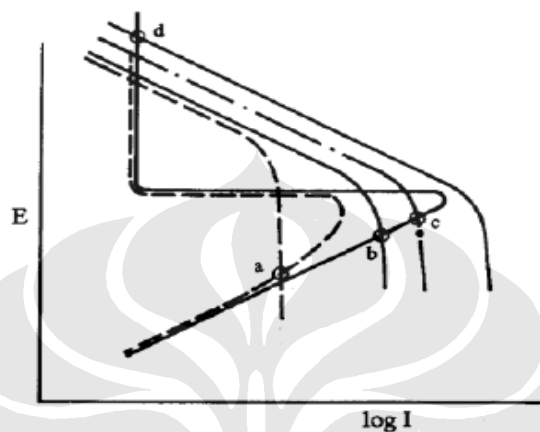
### 2.2.3 Korosi-erosi

Korosi-erosi adalah [9] peningkatan atau percepatan laju perusakan atau penyerangan pada suatu logam karena adanya aus ataupun abrasi yang berkombinasi dengan korosi. Kombinasi dari aus atau abrasi dengan korosi menghasilkan serangan yang lebih parah dibanding serangan aus atau abrasi dan korosi sendiri-sendiri. Logam dilepaskan dari permukaan sebagai ion terlarut, sebagai produk korosi padat, atau sebagai logam murni. Kombinasi serangan mulai dari serangan erosi sebagai faktor utama hingga serangan korosi sebagai faktor utama.

Semua jenis media korosif umumnya dapat menyebabkan korosi-erosi, seperti gas, larutan berair, sistem organik, dan logam cair (cairan logam panas maupun logam berwujud cair seperti Hg). Sebagai contoh, gas panas dapat mengoksidasi logam kemudian aliran yang sangat cepat akan mengelupas lapisan pelindung. Padatan dalam suspensi cairan (*slurry*) akan memberikan kerusakan yang lebih besar lagi pada korosi-erosi. Korosi-erosi dicirikan dengan penampakan



berupa alur (*grooves*), gelombang (*waves*), lubang bundar, dan atau alur berbentuk tapal kuda. Analisis dari tanda-tanda ini dapat membantu penentuan arah aliran. Daerah terpengaruh umumnya bebas dari endapan dan produk korosi, walaupun produk korosi terkadang dapat ditemukan jika korosi-erosi terjadi sebentar-sebentar dan atau laju aliran relatif rendah [8].



Gambar 2.7. Pengaruh kecepatan alir dan rapat arus korosi

Einar Baldar, *Corrosion and Protection* (London: Springer – Verlag Limited 2004) hal 140

Typical corrosion rates mg/dm <sup>2</sup> /day (mdd <sup>1</sup> )			
Material	0.3 m/s <sup>2)</sup>	1.2 m/s <sup>3)</sup>	8.2 m/s <sup>4)</sup>
Carbon steel	34	72	254
Cast iron	45	–	270
Silicon bronze	1	2	343
Admiralty brass	2	20	170
Hydraulic bronze	4	1	339
G bronze	7	2	280
Al bronze (10% Al)	5	–	236
Aluminium brass	2	–	105
9–10 CuNi (0.8% Fe)	5	–	99
70–30 CuNi (0.05% Fe)	2	–	199
70–30 CuNi (0.5% Fe)	<1	<1	39
Monel	<1	<1	4
Stainless steel type 316	1	0	<1
Hastelloy C	<1	–	3
Titanium	0	–	0

Gambar 2.8. Profil Laju Korosi beberapa logam terhadap Perubahan Laju Alir

Einar Baldar, *Corrosion and Protection* (London: Springer – Verlag Limited 2004) hal 145

## 2.3 Material

### 2.3.1 Komposisi dan Sifat Mekanis

Pipa yang menjadi bahan kajian terbuat dari bahan ASTM A106 *Grade B* dengan komposisi sebagai berikut:

Tabel 2.2. Tabel Komposisi Baja ASTM A106 *Grade B*

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

Adapun sifat-sifat mekanis dari baja tersebut adalah:

UTS: 60.000 psi / 415 Mpa

Yield Strength: 35.000 psi / 240 Mpa.

### 2.3.2 Ketahanan Korosi

Dari kandungan karbonnya, baja ini termasuk *medium carbon steels*. 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 atmosfer (*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%.

## 2.4 Karakterisasi Air

### 2.4.1 Korosifitas Air

Sifat air dapat ditentukan dengan menggunakan perhitungan indeks saturasi. Indeks saturasi (*Saturation Index*) adalah perbandingan pH sesungguhnya dengan pH teoritis berdasarkan sifat fisik dan kimia dari air. Nilainya berkisar dari negatif hingga positif. Nilai negatif mengindikasikan potensi korosi dan nilai positif mengindikasikan pembentukan kerak (*scale*). Nilai mendekati nol mengindikasikan air bersifat seimbang dan tidak ada kekhawatiran akan korosi maupun pengerakan.

Ada dua metode yang dapat digunakan, yaitu *Langelier Saturation Index* dan *Ryznar Stability Index*.

#### 1. Ryznar Stability Index [10]

Pada perhitungan dengan menggunakan metode ini, sifat air dihitung berdasarkan kesetimbangan karbonat di dalam air. Unsur-unsur yang penting dalam perhitungan ini adalah gas karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ )g, karbon dioksida terlarut ( $\text{CO}_2$ )aq, asam karbonat  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , bikarbonat  $\text{HCO}_3^-$ , karbonat  $\text{CO}_3^{2-}$  dan padatan mengandung karbonat seperti kalsium karbonat  $\text{CaCO}_3$  atau magnesium karbonat  $\text{MgCO}_3$ .

Nilai hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan tabel yang dibuat oleh Ryznar. Tabel ini hanya menunjukkan keagresifan dan kecenderungan pengerakan dari air.

Tabel 2.3. Nilai RI dan sifat air

<i>RI (Ryznar Index)</i>	<i>Indication (Ryznar 1942)</i>
$RI < 5,5$	<i>Heavy scale will form</i>
$5,5 < RI < 6,2$	<i>Scale will form</i>
$6,2 < RI < 6,8$	<i>No difficulties</i>
$6,8 < RI < 8,5$	<i>Water is aggressive</i>
$RI > 8,5$	<i>Water is very aggressive</i>

<http://www.lenntech.com/ro/index/ryznar.htm> (telah diolah kembali)

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. Nilai RI yang disempurnakan oleh Carrier

<i>RI (Ryznar Index)</i>	<i>Indication (Carrier 1965)</i>
<i>4,0 - 5,0</i>	<i>Heavy scale</i>
<i>5,0 - 6,0</i>	<i>Light scale</i>
<i>6,0 - 7,0</i>	<i>Little scale or corrosion</i>
<i>7,0 - 7,5</i>	<i>Corrosion significant</i>
<i>7,5 - 9,0</i>	<i>Heavy corrosion</i>
<i>&gt; 9,0</i>	<i>Corrosion intolerable</i>

<http://www.lenntech.com/ro/index/ryznar.htm> (telah diolah kembali)

## 2. Langelier Saturation Index [11]

Sama seperti Ryznar Index, nilai dari Langelier Saturation Index adalah didasarkan kepada kesetimbangan karbonat di dalam air. Unsur-unsur yang penting dalam perhitungan ini adalah gas karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ )g, karbon dioksida terlarut ( $\text{CO}_2$ )aq, asam karbonat  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , bikarbonat  $\text{HCO}_3^-$ , karbonat  $\text{CO}_3^{2-}$  dan padatan mengandung karbonat seperti kalsium karbonat  $\text{CaCO}_3$  atau magnesium karbonat  $\text{MgCO}_3$ .

Nilai hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan tabel yang dibuat oleh Langelier. Tabel ini hanya menunjukkan keagresifan dan kecenderungan pengendapan dari air.

Tabel 2.5. LSI dan sifat air

<i>LSI</i>	<i>Indication</i>
<i>LSI &lt; 0</i>	<i>Water is undersaturated with respect to calcium carbonate. Undersaturated water has a tendency to remove existing calcium carbonate protective coatings in pipelines and equipment.</i>
<i>LSI = 0</i>	<i>Water is considered to be neutral. Neither scale-forming nor scale removing</i>
<i>LSI &gt; 0</i>	<i>Water is supersaturated with respect to calcium carbonate (<math>\text{CaCO}_3</math>) and scale</i>

	<i>forming may occur.</i>
--	---------------------------

<http://www.lenntech.com/ro/index/langelier.htm> (telah diolah kembali)

Tabel 2.6 berikut ini merupakan tabel LSI yang disempurnakan oleh Carrier pada tahun 1965.

Tabel 2.6. Nilai LSI yang disempurnakan oleh Carrier

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

<http://www.lenntech.com/ro/index/langelier.htm> (telah diolah kembali)

#### 2.4.2 Jenis Aliran Air

Dari jenisnya, aliran air dapat dibedakan menjadi tiga macam: laminar, turbulen dan diantara kedua jenis aliran tersebut. Aliran laminar adalah aliran berupa lembaran-lembaran lurus searah dengan jalur pipa. Aliran ini merupakan aliran ideal, dan disukai dalam aliran air dalam pipa. Jenis aliran turbulen (aliran bergolak) merupakan aliran yang tidak disukai pada pipa. Aliran turbulen dapat menyebabkan korosi pada pipa, berupa korosi-erosi. Batas kecepatan aliran untuk keperluan industri adalah maksimal 12 fps (4 m/s), batas kecepatan yang tidak menimbulkan erosi pada pipa [14].

Untuk menentukan jenis aliran air digunakan bilangan Reynold (*Reynold Number*). Perhitungan bilangan Reynold untuk sistem pipa adalah menggunakan rumus [15]:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} = \frac{QD}{\nu A}$$

Dengan:

D: diameter pipa (m)

M: viskositas dinamis dari fluida ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$  atau  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )

$\nu$ : viskositas kinematik ( $\nu = \mu/\rho$ ) ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\rho$ : masa jenis fluida ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Q: laju aliran ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

A: luas area *cross-sectional* ( $\text{m}^2$ )

Untuk aliran laminar, bilangan Reynold  $< 2000$  maka aliran termasuk laminar, jika bilangan Reynold  $> 4000$  termasuk turbulen, dan jika bilangan Reynold berada diantara nilai tersebut, maka alirannya berada diantara laminar-turbulen (aliran transisi) [15].

## 2.5 Teknik Analisa Kerusakan

Kegagalan merupakan ketidakmampuan suatu komponen untuk dapat berfungsi sebagaimana mestinya, dan perpatahan tidak perlu harus terjadi [13]. 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 pengamatan visual dan mencatat hasil yang didapat
3. Pengujian tak merusak
4. Pemilihan, dan preparasi specimen metallography
5. Penelitian dan analisis specimen metallography

6. Pengujian mekanik, termasuk di dalamnya pengujian kekerasan, dan ketangguhan
7. Pemilihan, identifikasi, penanganan atau pembersihan sampel dan membandingkan dengan bagian yang tidak mengalami kegagalan
8. Pengamatan struktur makro, analisis, dan mendokumentasikan dengan gambar mengenai permukaan perpatahan 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 endapan, pelapis
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:

1. Lokasi asli dari perpatahan yang terjadi, temukan lokasi dari perpatahan tanpa merusak permukaan patahan
2. Jangan berusaha untuk mengembalikan perpatahan yang terjadi, dengan menyatukan kembali kedua permukaan patahan kecuali dengan penanganan yang hati-hati dan perlindungan
3. Jangan melakukan pengujian merusak tanpa perencanaan yang tepat, kerana 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.

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:

1. Salah disain, dimana bisa karena adanya konsentrasi tegangan, ketidaksesuaian dimensi, dsb
2. Salah dalam pemilihan material, hal ini berhubungan dengan mechanical properties-nya, selain itu physical properties sifat fisiknya, dan mungkin sifat kimianya
3. Ketidaktepatan material, misalnya adanya cacat saat proses fabrikasinya, adanya tegangan sisa
4. Kesalahan dalam fabrikasi
5. Salah dalam perakitan, adanya ketidaksesuaian antara bagian yang dirakit, adanya ketidakakuratan dalam proses permesinan misal karena akumulasi dari toleransi yang ada
6. Kondisi operasi, yaitu terjadinya pembebanan berlebih, kecepatan berlebih, dan lingkungan yang korosif
7. Kondisi perawatan, jadwal *overhaul*, metode pengukuran, jadwal pelumasan. dll.