

## BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

### 4.1 Kondisi Operasi

Kondisi operasi dan informasi teknis dari sampel sesuai dengan data lapangan dapat dilihat pada Tabel 3.1, sedangkan posisi sample dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Tabel 3.1. Data lapangan dan kondisi operasi

Jenis pipa	T
Material	A106 Grade B
Diameter dalam	
1. Sisi kiri	161 - 161.5 mm
2. Sisi kanan	158.8 - 158.3 mm
3. Sisi atas	158.8 - 158.7 mm
Diameter luar	170.85 - 170.9 mm
Tebal	0,24 inchi
Temperatur operasi	26 - 40°C
Tekanan operasi pipa	60 - 70 psi
Flow rate	380 gpm / 400 kph (236.121053 mph)
Kondisi operasi	<i>bypass</i> dari pipa utama
Umur operasi	14 tahun



Gambar 3.1. Posisi sampel di lapangan. Bagian bertanda putih (sebelah kanan) mengalami penutupan dan pembukaan secara berkala

## 4.2 Hasil Pengujian

### 4.2.1 Sampel Air

#### 4.2.1.1 Komposisi Sampel Air

Sampel air yang diambil dilakukan pengujian komposisi dengan menggunakan mesin analisis air.

Kind of sample	D5	CT. 01	CT. 02	CT. 03
Sampling point				
Sampling date	September 26, 2008			
Sampling time				
1 Color (Pt-Co-degree)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
2 Turbidity	< 1	< 1	< 1	< 1
3 pH (at 25°C)	6.3	6.5	6.2	6.3
4 Electrical conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	262	241	252	297
5 P-Alkalinity (as $\text{CaCO}_3$ )	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
6 M-Alkalinity (as $\text{CaCO}_3$ )	23	24	18	21
7 Total Hardness (as $\text{CaCO}_3$ )	< 1	8	4	< 1
8 Calcium Hardness (as $\text{CaCO}_3$ )	< 1	5	3	< 1
9 Chloride ion (as Cl)	< 2	< 2	< 2	< 2
10 Sulfate ion (as $\text{SO}_4^{2-}$ )	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
11 Soluble Silica (as $\text{SiO}_2$ )	1.65	1.50	0.67	0.15
12 Phosphate ion (as $\text{PO}_4^{3-}$ )	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
13 Total Phosphate (as $\text{PO}_4^{3-}$ )	n.a.	< 0.1	< 0.1	< 0.1
14 Total iron (as Fe)	0.14	0.06	0.07	0.13
15 Hydrazine (as $\text{N}_2\text{H}_4$ )	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
16 Nitrite ion (as $\text{NO}_2^-$ )	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
17				
18				
19				
20				
Comment :	(Unit : mg/l)			

Gambar 3.2. Hasil pengujian sampel air

#### 4.2.1.2 Indeks Saturasi

Dari komposisi kimia yang didapat dilakukan penghitungan indeks saturasi, baik dengan metode Ryznar maupun Langelier.

Tabel 4.1. Nilai hasil perhitungan indeks saturasi dengan metode Ryznar dan Langelier

Metode	CT01	CT02	CT03	DS05
Ryznar	12	13	14	14
Langelier	-2.6	-3.3	-3.8	-3.7

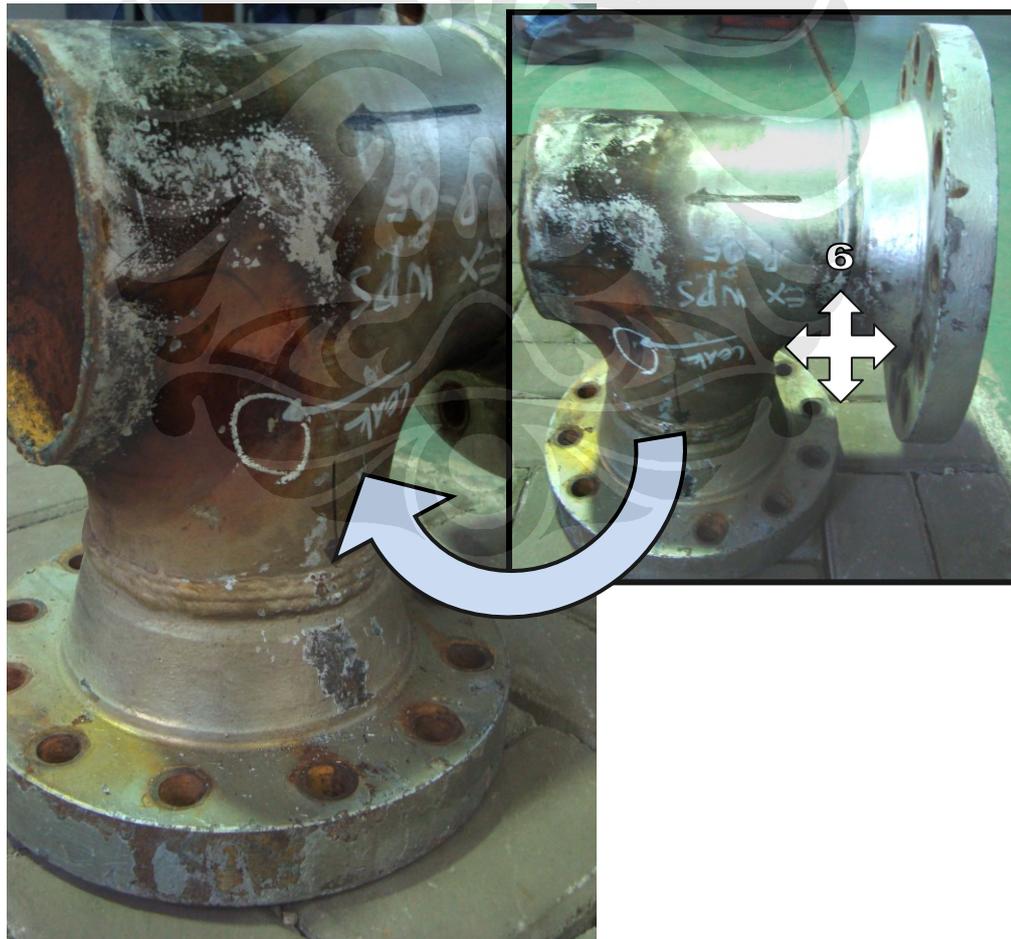
#### 4.2.1.3 Bilangan Reynold

Bilangan Reynold dihitung menggunakan kalkulator online [16], dengan nilai kecepatan aliran 236 mph, diameter 16 cm, massa jenis air 1 kg/l, dan viskositas dinamik air pada suhu 40°C sebesar  $6.531 \times 10^{-4}$  Pa s [17]. Di dapat nilai sebesar  $2.58 \times 10^7$ . Nilai ini jelas menunjukkan bahwa aliran air pada pipa adalah turbulen.

#### 4.2.2 Sampel Pipa T

##### 4.2.2.1 Pengamatan Visual

Hasil pengamatan secara visual pada sampel menunjukkan sampel mengalami kerusakan paling parah pada bagian dalam. Bagian luar dari sampel menunjukkan sedikit sekali kerusakan pada lapisan pelapis (*coating*).

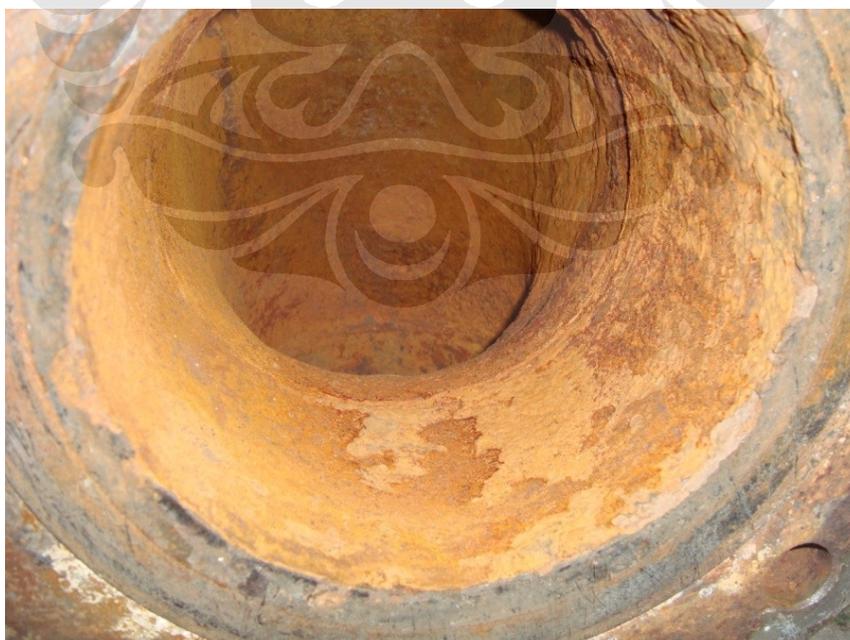


Gambar 3.3. Foto penampang luar sampel. Sisipan: pipa tampak samping.



Gambar 3.4. Foto kebocoran dari jarak dekat

Penampang kerusakan bagian dalam dan penampang kerusakan dapat dilihat pada gambar yang tercantum di bawah ini.



Gambar 3.5. Foto penampang bagian dalam sample



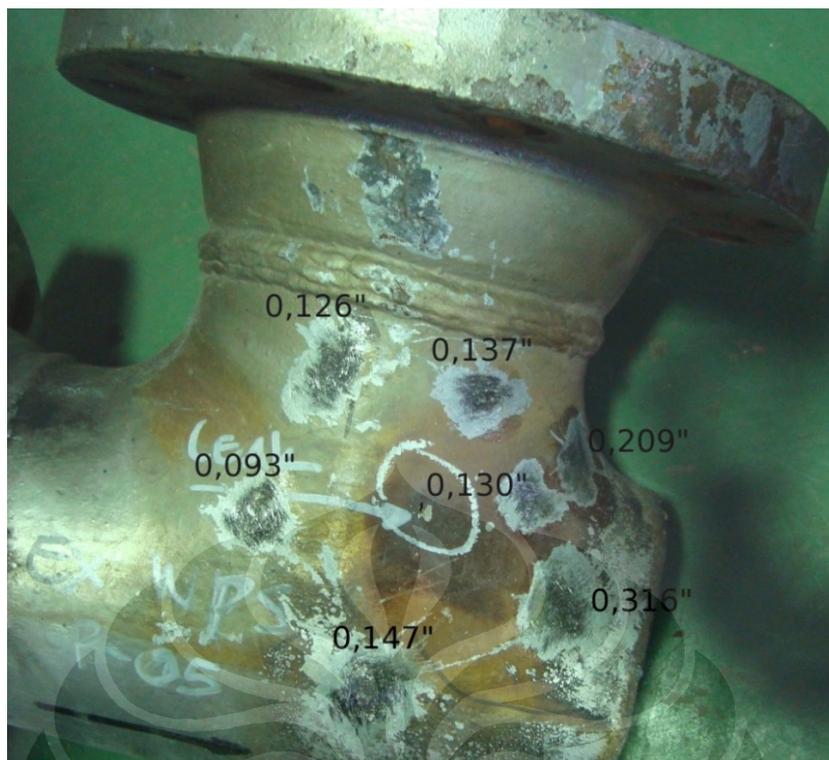
Gambar 3.6. Foto penampang dalam disekitar kebocoran

#### 4.2.2.2 Pengujian Ketebalan

Pengujian ketebalan dilakukan dengan menggunakan *Ultrasonic Testing Machine*. Pengujian dilakukan pada beberapa tempat, dengan terlebih dahulu dilakukan pengelupasan lapisan luar (*coating*) dari sampel. Hasil dari pengujian ketebalan beserta lokasinya dapat dilihat pada Gambar 3.7, Gambar 3.8 , dan Gambar 3.9.



Gambar 3.7. Ketebalan sampel arah jam enam



Gambar 3.8. Ketebalan sampel di sekeliling kebocoran



Gambar 3.9. Ketebalan sampel arah jam satu

#### 4.2.2.3 Pengujian Komposisi Material

Pengujian sampel dilakukan untuk memastikan kesesuaian material sampel dengan standar yang digunakan. Sampel untuk pengujian spektrofotometer diambil dari logam asli, dengan melakukan pembersihan permukaan terlebih dahulu untuk menghilangkan lapisan pelindung (*coating*) dan lapisan hasil korosi. Hasil pengujian komposisi dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.2. Hasil pengujian komposisi sampel

Komposisi Kimia (%)						
C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
0,187	0,225	0,013	0,031	0,509	<0,005	0,012
Mo	Ti	Cu	Nb	V	Al	Fe
<0,005	0,006	0,007	<0,002	0,007	<0,001	98,736

#### 4.2.2.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan di daerah logam dasar. Hasil pengujian ini kemudian digunakan untuk menghitung nilai UTS (*Ultimate Tensile Strength*) dari sampel bagian logam dasar (*base*). Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.3. Hasil pengujian kekerasan dan nilai UTS yang bersesuaian

Kekerasan (BHN)	UTS (psi)	UTS (Mpa)
170,6127	87865,517	576,671

Sebelum dilakukan pengujian, dilakukan kalibrasi alat dengan blok standar. Dari hasil standarisasi, terlihat bahwa alat memiliki pergeseran sekitar 6-7%. Dengan mempertimbangkan faktor kesalahan tersebut, maka nilai kekerasan hasil pengujian berubah menjadi nilai pada Tabel 3.5.

Tabel 3.4. Hasil pengujian kekerasan dan UTS yang bersesuaian setelah kalibrasi

Kekerasan (BHN)	UTS (psi)	UTS (Mpa)
160, 3759 - 180,849	82593,5859 – 93137,448	542,0707 – 611,2713

#### 4.2.2.5 Pengujian Komposisi Produk Korosi

Sampel untuk pengujian komposisi ini diambil pada dua daerah, arah jam enam dan sembilan. Pengujian dilakukan dengan EDX untuk menentukan unsur-unsur yang ada dan XRD untuk menentukan senyawa dari unsur-unsur pembentuk produk korosi tersebut.

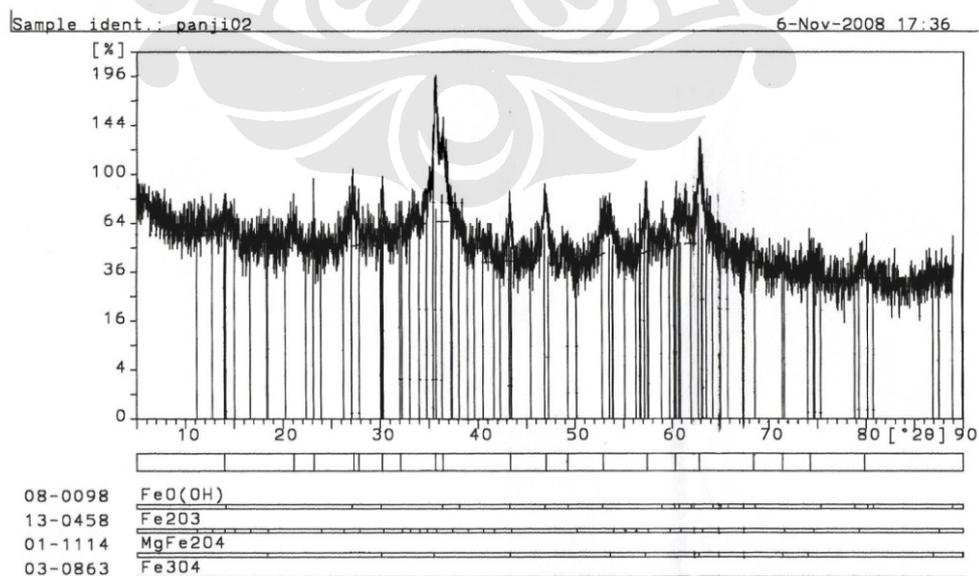
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.54	1.48
O K	ED	25.85	53.32
Al K	ED	0.25	0.31
Si K	ED	0.37	0.43
S K	ED	3.00	3.08
Mn K	ED	1.42	0.86
Fe K	ED	68.56	40.51
Total		100.00	100.00

Gambar 3.10. Hasil pengujian produk korosi arah jam enam dengan EDX (titik pertama)

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.90	2.18
O K	ED	29.78	54.33
Al K	ED	0.20	0.22
Si K	ED	0.21	0.22
S K	ED	18.17	16.54
Fe K	ED	50.74	26.52
Total		100.00	100.00

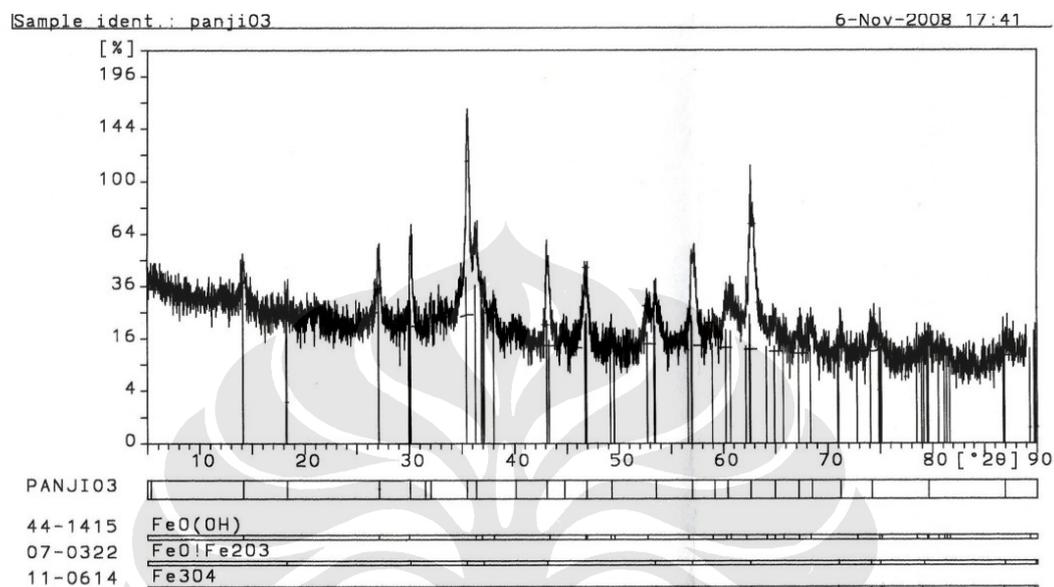
Gambar 3.11. Hasil pengujian produk korosi arah jam enam dengan EDX (titik kedua)

Selain pengujian dengan EDX, digunakan juga pengujian komposisi dengan XRD. Hasil pengujiannya tercantum pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12. Hasil pengujian produk korosi arah jam enam dengan XRD

Tidak dilakukan pengujian komposisi dengan EDX pada produk korosi arah jam sembilan dikarenakan jumlahnya yang sangat sedikit. Untuk produk korosi di arah jam sembilan, pengujian komposisi langsung dilakukan dengan XRD.



Gambar 3.13. Hasil pengujian produk korosi arah jam sembilan dengan XRD

#### 4.2.2.6 Pengujian Polarisasi

Hasil polarisasi sampel dengan metode ekstrapolasi kurva tafel dengan sampel air DS, CT01, CT02, CT03 dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.5. Tabel hasil polarisasi

Lokasi	Laju korosi (mpy)
CT01	2,569
CT02	4,288
CT03	5,795
DS	2,561

Nilai hasil pengujian polarisasi ini adalah untuk air *stagnan* (diam). Nilai ini jauh lebih kecil dibandingkan nilai laju korosi jika menggunakan air mengalir. Perbandingan nilai laju korosi air diam dengan air mengalir tiap logam atau paduan adalah berbeda-beda. Jadi, nilai laju korosi yang rendah dari percobaan

polarisasi Tafel dengan air diam tidak dapat dijadikan sebagai patokan untuk menentukan laju korosi dengan air mengalir.

### 4.3 Pembahasan

#### 4.3.1 Hasil Pengujian Sampel Air

Saat pengambilan sampel air, ditemukan adanya pengotor-pengotor pada aliran air berupa dahan-dahan dan daun pepohonan yang sudah membusuk. Adanya benda padat seperti ini dapat menyebabkan erosi, walaupun pada skala rendah.

Dari hasil pengujian komposisi, terlihat bahwa air mengandung ion-ion kesadahan seperti  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , dan karbonat ( $\text{CO}_3$ ). Hasil pengujian komposisi sampel air ini kemudian digunakan untuk menentukan sifat dari air. Untuk menghitung LSI dan RI digunakan kalkulator *online* untuk memudahkan perhitungan. Hasil dari perhitungan, baik LSI maupun RI, menunjukkan sifat air yang sangat agresif (korosif). Air yang agresif (korosif) ini akan memicu terjadinya korosi pada bagian dalam pipa, jika pipa yang digunakan dibuat dari baja yang ketahanan korosinya kurang baik.

Dari hasil perhitungan bilangan Reynold, dapat dilihat bahwa air mengalir dengan bentuk aliran turbulen. Aliran turbulen ini akan menyebabkan laju korosi meningkat, dan dapat menyebabkan terjadinya korosi-erosi. Faktor utama penyebab turbulensi ini adalah kecepatan alir yang sangat cepat, mencapai 236 mph.

Dari Tabel 3.5 hasil pengujian polarisasi sampel air, dapat dilihat bahwa laju korosi sampel berada pada kisaran baik hingga sangat baik. Hal ini menunjukkan bahwa kerusakan pada pipa lebih disebabkan oleh faktor erosi. Adanya erosi oleh aliran air yang turbulen menyebabkan laju korosi meningkat, hingga melebihi laju korosi normal dari sampel.

### 4.3.2 Hasil Pengujian Sampel Pipa T

#### 4.3.2.1 Pengamatan Visual

Dari pengamatan visual, terlihat bagian luar pipa hampir tidak mengalami korosi. Pelapis (*coating*) pada bagian luar hampir tidak mengalami kerusakan yang berarti. Korosi pada bagian luar juga dapat dikatakan tidak ada.

Hal yang berbeda teramati pada bagian dalam. Pada bagian dalam pipa, terlihat adanya korosi pada seluruh bagian pipa. Produk korosinya sendiri sangat tipis, dan hampir tidak dapat diambil untuk pengujian komposisi produk korosi. Tipisnya produk korosi yang menutupi permukaan dalam pipa menunjukkan produk korosi yang lepas dari permukaan pipa, baik karena terlepas secara mekanik maupun secara kimia. Namun bentuk dari permukaan pipa yang menunjukkan adanya alur-alur memberikan kemungkinan adanya erosi oleh aliran air.

Permukaan dalam pipa menunjukkan adanya alur-alur. Alur ini menunjukkan adanya kemungkinan terjadinya erosi oleh aliran air, baik dengan ataupun tanpa bantuan benda padat.

Lokasi kebocoran terletak pada arah jam sembilan. Pipa ini tidak mengalami aliran yang terus menerus, tetapi suatu saat mengalami penutupan pada satu sisi, sehingga air akan mengalir menuju atas (arah jam dua belas). Perubahan ini akan menambah turbulensi dari aliran air. Aliran yang turbulen akan menyebabkan korosi, dan terjadinya erosi dipermukaan dalam pipa.

#### 4.3.2.2 Pengujian ketebalan

Dari pengujian ketebalan, terlihat adanya perbedaan ketebalan pada permukaan yang diukur. Hal ini juga didukung dengan pengamatan visual dimana terlihat adanya perbedaan ketinggian akibat adanya alur-alur dipermukaan.

Dari pengujian ketebalan, tidak muncul kecenderungan penipisan pada satu daerah, maupun kecenderungan penipisan pada lokasi kebocoran. Hal ini menunjukkan korosi yang terjadi tidak merata, dimana terdapat daerah dengan

korosi yang lebih cepat dibanding daerah lainnya. Hal ini menyerupai korosi galvanik setempat, namun dikarenakan pipa terbuat dari bahan yang sama, tanpa ada daerah lasan, maka kemungkinan korosi galvanik adalah sangat kecil. Kemungkinan paling mungkin adalah adanya proses pengelupasan lapisan produk korosi disebagian permukaan pipa. Ketidak merataan pengelupasan produk korosi ini mengindikasikan adanya turbulensi aliran.

#### 4.3.2.3 Pengujian Komposisi Pipa

Dari pengujian komposisi kimia pipa dengan metode OES, dapat dilihat bahwa komposisi unsur-unsur dalam pipa masih sesuai dengan standar ASTM A106 *Grade B* yang merupakan spesifikasi standar yang dipergunakan oleh *geothermal*. Sedikit perbedaan terlihat dari kadar unsur C, Si, dan Mn.

Dibandingkan dengan komposisi standar ASTM A106 *Grade B*, kadar karbon dari sampel lebih kecil, dimana kadar karbon pada sampel hanya 1,87%, dibandingkan dengan kadar ASTM A106 *Grade B* yang mencapai 0,3% maksimal. Nilai yang lebih kecil ini menyebabkan kekerasan dari sampel yang akan lebih kecil dari standar. Kadar Si pada sampel lebih besar dari pada standar ASTM A106 *Grade B*. Hal ini akan menyebabkan kegetasan dari sampel akan meningkat. Ditambah lagi kadar Mn yang kecil, semakin menurunkan ketahanan impak dari logam.

Dari pencarian lebih lanjut, didapatkan bahwa komposisi dari sampel lebih sesuai dengan baja AISI 1020 atau ASTM A108, ASTM A29, ASTM A510, ASTM A519, ASTM A544, ASTM A575, ASTM A576, ASTM A659. Untuk komposisi dari AISI 1020 dapat dilihat dengan Tabel 4.1, sedangkan sifat fisik terlihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Komposisi AISI 1020

Komposisi Kimia (%)				
C (max)	S (max)	P (max)	Mn	Fe
0,170 — 1,230	≤ 0,0500	≤ 0,0400	0,300 — 0,600	remaining

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb&ckck=1> (telah diolah kembali)

Tabel 4.3. Sifat Fisik AISI 1020

Sifat Fisik	
Kekerasan, Brinell	111
Kekerasan, Knoop	128
Kekerasan, Vickers	112
Tensile Strength, Ultimate	380 MPa / 55100 psi
Tensile Strength, Yield	205 MPa / 29700 psi

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb&ckck=1> (telah diolah kembali)

#### 4.3.2.4 Pengujian Kekerasan

Dari hasil kekerasan, terlihat nilai kekerasan dari sampel jauh diatas kekerasan baja ASTM A106 *Grade B* yang dijadikan standar. Hal ini semakin menguatkan kemungkinan pipa yang tidak sesuai dengan standar ASTM A106 *Grade B* yang dipergunakan.

#### 4.3.2.5 Pengujian Komposisi Produk Korosi

Hasil pengujian EDX menunjukkan komposisi produk korosi yang didominasi oksida-oksida. Seperti yang terlihat, kadar oksigen pada dua pengujian dititik berbeda sangat tinggi.

Hasil pengujian pada dua titik berbeda menunjukkan sulfur yang berbeda, dimana pada titik pertama tidak ditemukan sulfur, namun pada titik kedua ditemukan, dengan kadar yang cukup tinggi. Hal ini menunjukkan adanya lokalisasi sulfur di tempat tertentu. Juga menunjukkan sulfur bukan sebagai faktor utama sebagai penyebab korosi pada pipa.

Dari hasil pengujian XRD, dapat dilihat komposisi produk korosi adalah berupa oksida besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan  $\text{FeO}(\text{OH})$ ). Produk berbasis oksida ini menunjukkan tingginya kadar oksigen di air. Pada pengujian dengan XRD tidak ditemukan adanya sulfur. Hal ini menunjukkan keberadaan sulfur yang kecil dan terlokalisasi pada satu daerah saja. Tingginya kadar oksigen pada air juga menunjukkan tingginya turbulensi dari aliran.

### 4.3.3 Analisis Penyebab Kegagalan

Dari pembahasan, dapat dilihat bahwa kegagalan disebabkan oleh korosi-erosi. Bukti yang paling nyata adalah pada penampakan permukaan bagian dalam pipa, terutama di dekat daerah kegagalan, dimana penampangannya menunjukkan adanya alur-alur (*grooves*) dan gelombang (*waves*). Bukti lain adalah sedikitnya produk korosi yang menempel dipermukaan dalam pipa.

Bentuk alur-alur dan gelombang pada permukaan dalam pipa yang tidak beraturan menunjukkan arah aliran yang selalu berubah-ubah akibat turbulensi. Turbulensi ini timbul karena beberapa kemungkinan, yang paling besar pengaruhnya adalah aliran yang tidak stabil dan adanya gelembung-gelembung yang terperangkap dalam pipa.

Kemungkinan penyebab lain dari aliran turbulen adalah penutupan berkala pada pipa, seperti pada Gambar 3.1. Pada saat bagian kanan ditutup, maka aliran air akan berubah arah menuju arah atas. Perubahan arah ini akan menyebabkan daerah gagal mendapat tekanan yang lebih besar, selain merubah daerah tersebut menjadi daerah percik (*splash*). Selain itu, penutupan dan pembukaan secara berkala akan menyebabkan aliran menjadi turbulen.

Korosi pada sampel disebabkan oleh air yang korosif, terbukti dari Indeks Saturasi Langelier dan Indeks Ryznar yang menunjukkan air agresif. Dari laju korosinya, pipa memiliki laju korosi yang masih dalam kategori rendah (ketahanan korosinya baik). Jadi, kerusakan yang parah dipicu oleh erosi, sedangkan korosi hanyalah menjadi faktor yang mengawali.