



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISA KEGAGALAN PADA MATERIAL *MIXING CHAMBER*  
TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS  
DI PLN MUARA TAWAR**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Sarjana Teknik (ST.)**

**BAYU CANDRADITYA  
0405040163**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JUNI 2009**

## LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

### ANALISA KEGAGALAN PADA MATERIAL *MIXING CHAMBER* TURBIN GAS PEMBANGKIT LISTRIK PLN MUARA TAWAR

Yang dibuat untuk melengkapi persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Logam Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 26 Juni 2009

Bayu Candraditya  
NPM 0405040163

## LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Bayu Candraditya  
NPM : 0405040163  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Analisa Kegagalan Pada Material *Mixing Chamber*  
Turbin Gas Pembangkit Listrik Tenaga Uap PLN  
Muara Tawar

**Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Andi Rustandi, MT ( )

Penguji 1 : Ir. Yunita Sadeli, M.Sc ( )

Penguji 2 : Ir. Sugiarto, MT ( )

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal :

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Departemen Metalurgi Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Ir. Andi Rustandi, MT., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- 2) Ir. Sugiarto, MT., dari pihak perusahaan selaku pembimbing di lapangan yang telah banyak membantu mendapatkan data-data yang diperlukan;
- 3) Seluruh dosen-dosen yang telah memberikan saya ilmu dan bimbingan dalam pembelajaran;
- 4) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- 5) teman-teman saya yang telah memberikan bantuan dan dukungan moral dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa akan membalas segala kebaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 26 Juni 2009

Penulis

## LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bayu Candraditya  
NPM : 0405040163  
Program Studi : Logam  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

ANALISA KEGAGALAN PADA MATERIAL *MIXING CHAMBER* TURBIN  
GAS PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP DI PLN MUARA TAWAR

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 26 Juni 2008  
Yang menyatakan

( Bayu Candraditya )

## ABSTRAK

Nama : Bayu Candraditya  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Analisa Kegagalan Pada Material Mixing Chamber Turbin Gas Pembangkit Listrik Tenaga Uap di PLN Muara Tawar

Kegagalan prematur pada material *mixing chamber* turbin gas. Bentuk kegagalan yang terdeteksi adalah terjadinya lubang atau sumuran. Analisa dilakukan dengan melakukan studi pada material paduan yang berjenis 16Mo3/17Mn4 untuk digunakan pada *mixing chamber*, dengan mengambil data-data seperti komposisi kimia, komposisi deposit, bahan bakar, mikrostruktur, dan kekerasan. Dari hasil analisa yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kegagalan disebabkan oleh serangan korosi temperatur tinggi pada rentang temperatur 600 – 800°C atau tipe kedua. Data literatur menunjukkan terbentuknya senyawa natrium sulfat dan vanadium oksida dari proses pembakaran yang menyebabkan terjadinya korosi sumuran.

Kata kunci: *mixing chamber*, analisa kegagalan, korosi temperatur tinggi.

## ABSTRACT

Name : Bayu Candraditya  
Study Program : Metallurgy and Material Engineering  
Title : Failure Analysis of Mixing Chamber Material in Gas Turbine Power Generation at PLN Muara Tawar

There were premature failures of mixing chamber part of turbine gas. The failure has been detected from pitting formation. Analyses is done taking from material alloy of 16Mo3/17Mn4 that used in mixing chamber with data-data like: material composition, deposits composition, fuel oil, microstructures, and micro hardness. From analysis, it can be concluded that failure in mixing chamber were done by hot corrosion attack in temperature 600 – 800°C or type II (LTHC). Literatures showing that sodium sulfate and vanadium oxide were resulted from the combustion process thus pitting corrosion.

Keywords: mixing chamber, failure analysis, hot corrosion.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	
KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTARCT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Batasan Penelitian.....	2
1.4 Sistematika Penulisan .....	2
<b>BAB 2. DASAR TEORI.....</b>	<b>3</b>
2.1 Turbin Gas .....	4
2.1.1 Komponen – Komponen Utama Turbin Gas .....	4
2.1.1.1 Kompresor .....	4
2.1.1.2 Ruang Pembakaran.....	4
2.1.1.3 Turbin .....	4
2.1.2 Bahan Bakar.....	4
2.1.3 Sistem Kerja dan Termodinamika Turbin Gas .....	5
2.2 Korosi.....	10
2.2.1 Jenis – Jenis Korosi.....	11
2.2.2 Korosi Temperatur Tinggi Pada Turbin Gas .....	16
2.2.2.1 Korosi Induksi Gas .....	16
2.2.2.2 Korosi Induksi Deposit.....	19

2.3 Material Aplikasi Temperatur Tinggi dan Bahan Bakar .....	20
2.3.1 Material Paduan Khusus Untuk Aplikasi Temperatur Tinggi .....	20
2.3.2 Perlindungan Material Aplikasi Temperatur Tinggi .....	20
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>25</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	25
3.2 Alat dan Bahan.....	26
3.3 Prosedur <i>In Situ Metallography</i> .....	26
3.4 Pengujian Komposisi Kimia .....	28
3.5 Pengujian Komposisi Bahan Bakar .....	28
3.6 Pengujian Kekerasan.....	28
3.7 Pengujian Mikrostruktur .....	29
3.8 Pengujian Deposit .....	29
<b>BAB 4. DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>30</b>
4.1 Latar Belakang Material .....	30
4.2 Pembahasan.....	31
4.2.1 Hasil Pengamatan Visual .....	31
4.2.2 Hasil Pengujian Deposit.....	33
4.2.3 Hasil Pengujian Mikrostruktur.....	36
4.2.4 Pengujian Kekerasan.....	41
4.3 Analisa Penyebab Kegagalan Material <i>Mixing Chamber</i> .....	42
<b>BAB 5. PENUTUP.....</b>	<b>44</b>
5.1 Kesimpulan .....	44

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Jenis-jenis pembangkit dan laju panas yang dihasilkan .....	3
<b>Gambar 2.2</b> Efek dari berbagai jenis bahan bakar pada temperatur pemasukan .....	5
<b>Gambar 2.3</b> Tipikal efisiensi dari tenaga pembangkit .....	6
<b>Gambar 2.4</b> Skematik gambar gas turbin siklus terbuka .....	6
<b>Gambar 2.5</b> Diagram siklus Brayton ideal .....	7
<b>Gambar 2.6</b> Korosi merata .....	11
<b>Gambar 2.7</b> Sel korosi galvanik .....	12
<b>Gambar 2.8</b> Korosi celah .....	12
<b>Gambar 2.9</b> Korosi sumuran yang terjadi pada baja austenitik .....	13
<b>Gambar 2.10</b> Korosi batas butir .....	14
<b>Gambar 2.11</b> Korosi pelarutan selektif .....	14
<b>Gambar 2.12</b> Korosi erosi .....	15
<b>Gambar 2.13</b> Korosi retak tegang .....	16
<b>Gambar 2.14</b> Diagram kestabilan termodinamika untuk Ni-S-O pada 900°C .....	18
<b>Gambar 2.15</b> Lapisan-lapisan pada <i>thermal barrier coating</i> .....	23
<b>Gambar 2.16</b> Komposisi dan optimisasi dari $ZrO_2 - Y_2O_3$ pada sistem <i>thermal barrier coating</i> berdasarkan waktu pakai .....	24
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir untuk <i>in-situ metallography</i> .....	27
<b>Gambar 3.2</b> Skema representasi dari proses replika .....	27
<b>Gambar 3.3</b> <i>Equotip Hardness Tester</i> untuk pengujian kekerasan .....	28
<b>Gambar 4.1</b> Struktur mikro dari material 15Mo3 yang juga ekivalen dengan material DIN 17155 untuk aplikasi plat tahan panas .....	30
<b>Gambar 4.2</b> Pengamatan visual pada <i>mixing chamber</i> sisi kiri lokasi ke-1 .....	31
<b>Gambar 4.3</b> Pengamatan visual pada <i>mixing chamber</i> sisi kiri lokasi ke-2 .....	32
<b>Gambar 4.4</b> Pengamatan visual pada <i>mixing chamber</i> sisi kanan lokasi ke-1 .....	32
<b>Gambar 4.5</b> Pengamatan visual pada <i>mixing chamber</i> sisi kanan lokasi ke-2 .....	33
<b>Gambar 4.6</b> Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 4.2 berupa senyawa NiO, $NiFe_2O_4$ dan $Fe_2O_3$ .....	33
<b>Gambar 4.7</b> Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 4.2 berupa senyawa NiO, $NiFe_2O_4$ dan $Fe_2O_3$ .....	34
<b>Gambar 4.8</b> Titik lokasi pengambilan sampel pada penampang dari turbin gas .....	36

<b>Gambar 4.9</b> Struktur mikro dari <i>mixing chamber</i> sisi kiri lokasi ke-1 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 200 kali .....	37
<b>Gambar 4.10</b> Struktur mikro dari <i>mixing chamber</i> sisi kiri lokasi 1 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 500 kali .....	37
<b>Gambar 4.11</b> Struktur mikro dari <i>mixing chamber</i> sisi kiri lokasi 2 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 200 kali .....	38
<b>Gambar 4.12</b> Struktur mikro dari <i>mixing chamber</i> sisi kiri lokasi 2 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 500 kali.....	38
<b>Gambar 4.13</b> Struktur mikro dari <i>mixing chamber</i> sisi kanan lokasi 1 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 200 kali.....	39
<b>Gambar 4.14</b> Struktur mikro dari <i>mixing chamber</i> sisi kanan lokasi 1 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 500 kali .....	39
<b>Gambar 4.15</b> Struktur mikro dari <i>mixing chamber</i> sisi kanan lokasi 2 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 100 kali .....	40
<b>Gambar 4.16</b> Struktur mikro dari <i>mixing chamber</i> sisi kanan lokasi 2 pada daerah normal dengan etsa aqua regia dan pada perbesaran 500 kali.....	40
<b>Gambar 4.17</b> Skema proses terjadinya hot corrosion pada mesin turbin gas .....	42

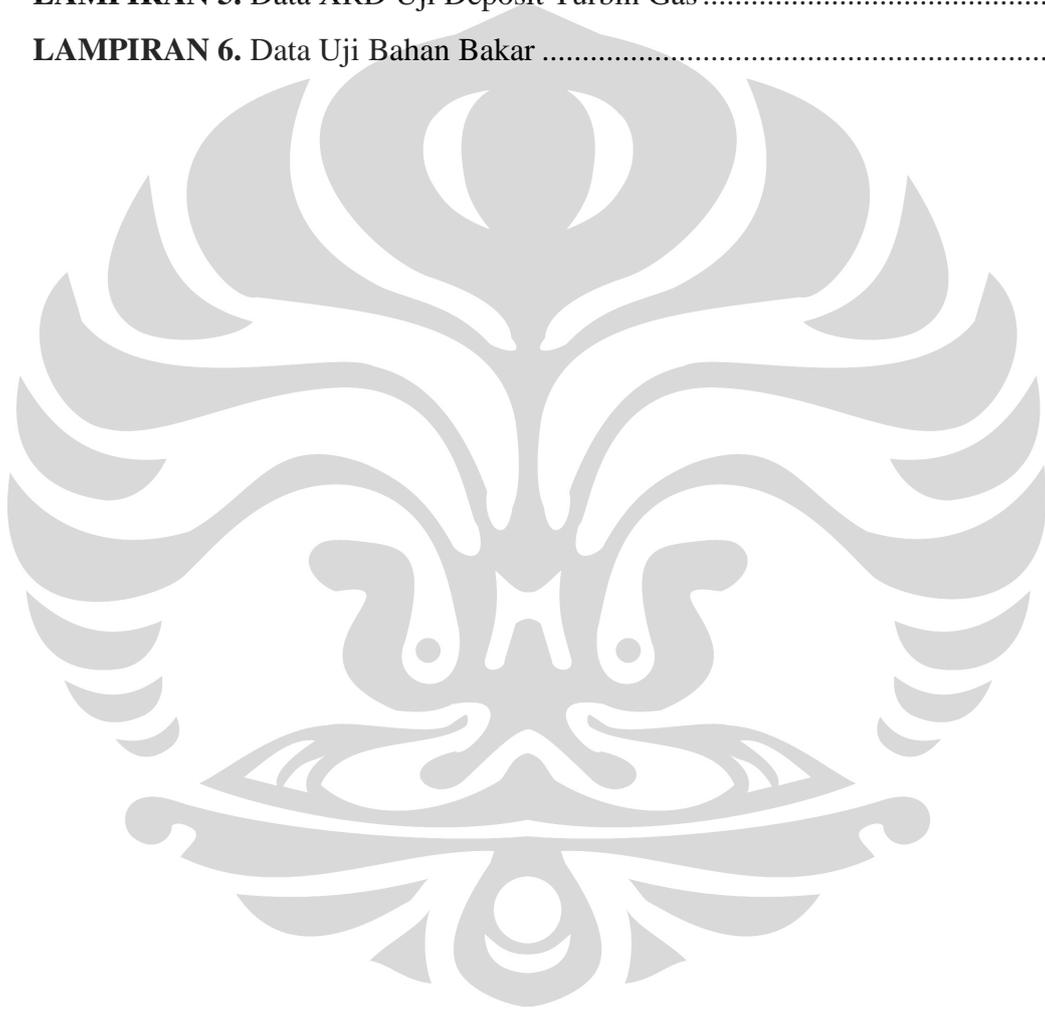
## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Karakteristik yang dibutuhkan pada <i>thermal barrier coating</i> .....	21
<b>Tabel 2.2</b> Elemen pada pelapisan logam, fungsi dan pengaruhnya .....	22
<b>Tabel 4.1</b> Hasil analisa kandungan unsur - unsur kimia pada bahan bakar turbin gas dengan metoda XRF .....	35
<b>Tabel 4.2</b> Hasil pengujian kekerasan pada material <i>mixing chamber</i> .....	41



## DAFTAR LAMPIRAN

<b>LAMPIRAN 1.</b> Spesifikasi Material .....	21
<b>LAMPIRAN 2.</b> Kalkulator <i>Online</i> Skala Vickers .....	22
<b>LAMPIRAN 3.</b> Mesin Turbin Gas Tampak Atas .....	35
<b>LAMPIRAN 4.</b> Bagian <i>Combustion Chamber</i> Turbin Gas .....	21
<b>LAMPIRAN 5.</b> Data XRD Uji Deposit Turbin Gas .....	21
<b>LAMPIRAN 6.</b> Data Uji Bahan Bakar .....	21



## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1. LATAR BELAKANG

Meningkatnya akan kebutuhan energi listrik terutama di ibu kota memberikan tugas banyak terhadap PT PLN untuk dapat menyediakan energi listrik yang berkelanjutan. PT PLN yang berperan sebagai distributor tunggal dalam penyediaan energi listrik di Indonesia akan banyak menghadapi permintaan serta tuntutan dari para konsumen. Pembangkit-pembangkit yang digunakan untuk menyediakan energi listrik sangat perlu diperhatikan dalam operasi dan perawatannya.

Turbin gas merupakan suatu komponen penting yang digunakan pada pembangkit-pembangkit listrik. Turbin gas diperlukan untuk menghasilkan gas panas yang dapat menggerakkan sudu pada rotor turbin yang pada akhirnya akan menggerakkan generator pembangkit listrik. Turbin gas adalah salah satu turbin yang digunakan sebagai pembangkit energi. Jenis-jenis turbin yang telah ada dan lazim digunakan sebagai pembangkit energi adalah turbin gas, turbin uap, turbin air dan turbin angin.

Turbin Gas Unit 4.2 di PLTG Muara Tawar yang digunakan sebagai pembangkit listrik dengan daya 143MW mengalami kerusakan pada ruang pembakaran dan daerah aliran panas '*Hot Gas Path*'. Ruang aliran gas panas '*Mixing chamber*' ini terbuat dari material 16Mo3/17Mn4 sesuai standar DIN 17155 dan/atau ASTM A204 Gr.B.

Material *mixing chamber* tersebut sering mengalami kerusakan dalam operasional sehingga bisa membuat terjadinya *shutdown* selama masa perbaikan dan penggantian komponen-komponen yang digunakan. Akibatnya jika terjadi perbaikan, penghentian operasional bisa memberikan dampak pada masyarakat yaitu terjadinya pemutusan aliran listrik secara bergiliran.

Dengan adanya kegagalan retak serta korosi sumuran pada ruang pembakaran lebih cepat dari waktu desain maka akan menurunkan umur pakai dari mesin tersebut.

Dengan kata lain artinya akan menambahkan beban biaya dalam operasional dan perawatannya. Untuk itulah perlunya dilakukan studi mengenai analisa kegagalan pada material *mixing chamber* turbin pembangkit listrik tenaga gas di PLN muara tawar.

## **1.2 TUJUAN PENELITIAN**

Analisa kegagalan yang dilakukan pada *mixing chamber* di Turbin Gas Unit 4.2 PLTG Muara Tawar ini bertujuan untuk mengetahui penyebab utama kerusakan dari sudut pandang degradasi material.

## **1.3 BATASAN PENELITIAN**

Penelitian Turbin Gas ini menggunakan data-data sekunder dari PT PLN. Dalam penelitian ini digunakan asumsi secara generalisasi bagi data yang sifatnya diperlukan namun tidak dapat dilakukan pengujian dilapangan karena keterbatasan.

## **1.4 SISTEMATIKA PENULISAN**

Bab 1 berisi latar belakang, tujuan penulisan, batasan penelitian dan metode penulisan.

Bab 2 berisi dasar teori yang menjelaskan turbin gas secara umum dan mekanisme korosi yang terjadi pada turbin gas.

Bab3 berisi mengenai sistematika penelitian yang umumnya digunakan untuk menganalisa kegagalan pada turbin gas maupun system pembangkit lainnya.

Bab 4 berisi data-data serta penyajiannya dan analisa.

Bab 5 merupakan kesimpulan dari analisa penelitian yang menggambarkan terjadinya kegagalan pada material *mixing chamber* turbin gas.

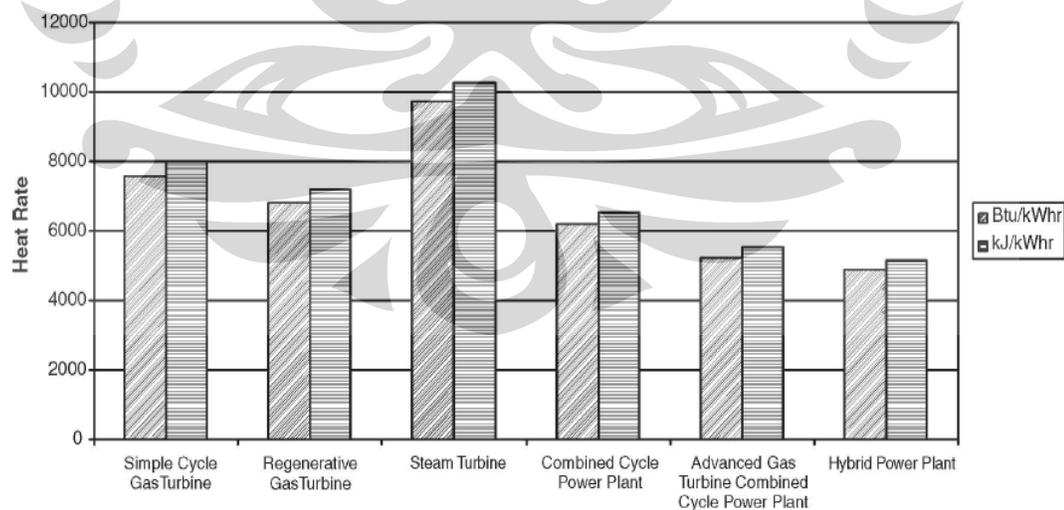
Referensi dan lampiran dimuat pada halaman-halaman akhir dalam laporan penelitian ini.

## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 TURBIN GAS

Turbin gas merupakan alat yang banyak digunakan untuk mengkonversikan energi yang digunakan pada pembangkit-pembangkit listrik. Dalam upaya menghasilkan daya listrik maka turbin gas ini akan mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan generator. Energi mekanik untuk merotasi turbin dihasilkan dari energi kinetik fluida dari pembakaran pada temperatur dan tekanan tinggi.

Turbin gas terdiri dari tiga komponen utama: kompresor, ruang bakar dan turbin. Kompresor digunakan untuk meningkatkan tekanan dan temperatur dari udara yang akan dialirkan ke ruang bakar. Udara yang bertekanan tinggi ini digunakan pada pembakaran untuk menghasilkan fluida dengan energi tinggi sebagai penggerak poros yang berotasi pada putaran 3000 – 6000 putaran per menit dalam kumparan magnetik pada generator sehingga dihasilkannya arus listrik.



Gambar 2.1 Jenis-jenis pembangkit dan laju panas yang dihasilkan<sup>[1]</sup>.

## 2.1.1 Komponen-Komponen Utama Turbin Gas

### 2.1.1.1 Kompresor

Kompresor merupakan alat yang digunakan untuk meningkatkan tekanan udara yang akan digunakan pada ruang bakar dalam proses pembakaran. Udara dari atmosfer ditarik terus menerus dan dikompresi hingga memiliki rasio tertentu untuk mencapai tekanan tinggi.

Kompresor terbagi menjadi dua jenis yaitu kompresor sentrifugal dan kompresor aksial. Kompresor sentrifugal digunakan pada jenis unit turbin gas yang kecil. Sedangkan kompresor aksial digunakan pada turbin gas yang mempunyai daya lebih dari 5MW. [1]

### 2.1.1.2 Ruang Pembakaran

Ruang pembakaran adalah daerah terjadinya proses pembakaran antara oksigen hasil kompresi dan bahan bakar.

### 2.1.1.3 Turbin

Turbin merupakan alat yang digunakan untuk ekspansi fluida. Turbin berfungsi sebagai penggerak dari generator pembangkit energi listrik.

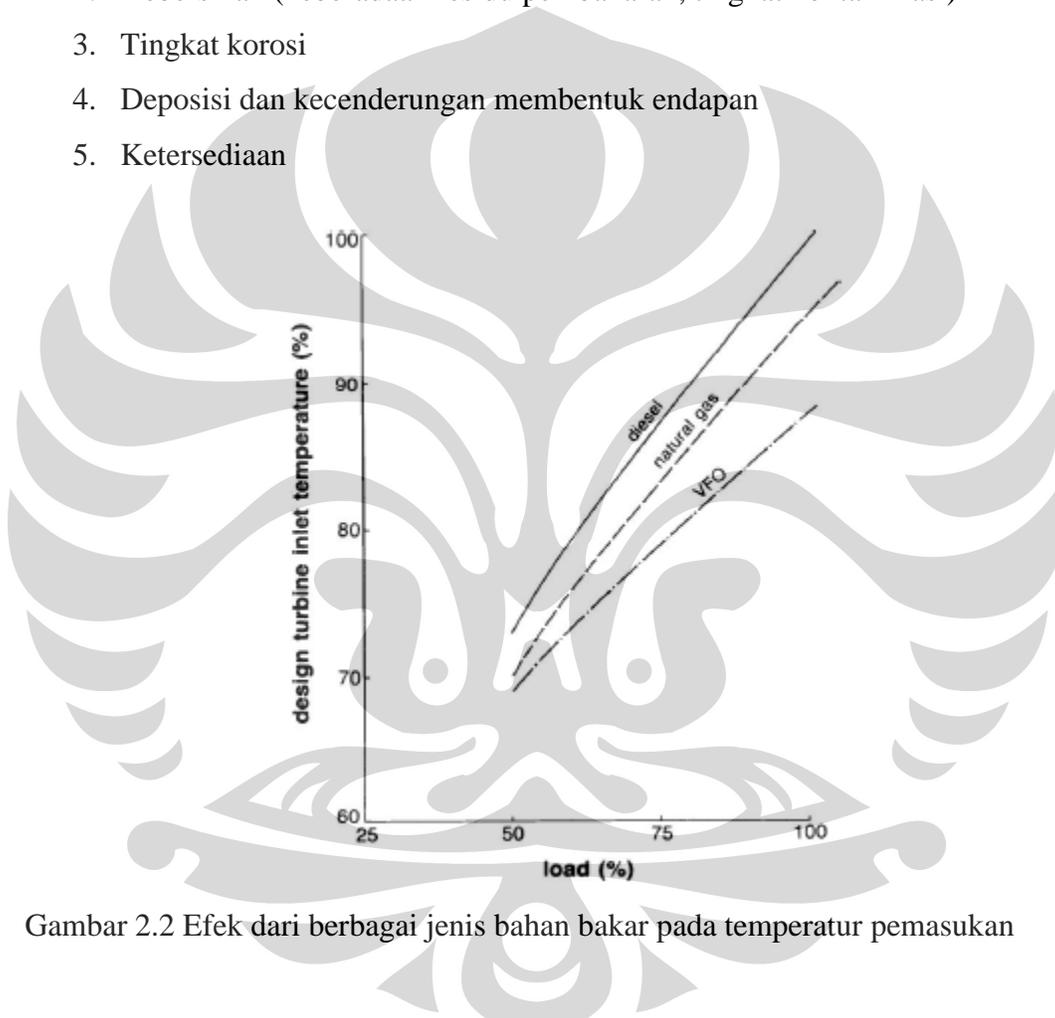
## 2.1.2 Bahan Bakar

Dua jenis bahan bakar utama yang biasa digunakan pada turbin gas adalah jenis bahan bakar gas dan bahan bakar cair. Sekitar 40% dari turbin pembangkit dioperasikan dengan menggunakan bahan bakar cair. Bahan bakar cair dapat terbagi menjadi dua kelas utama yaitu bahan bakar yang didistilasi atau *true distillate fuels* dan *ash-forming fuels*. *True distillate fuels* merupakan bahan bakar yang telah dimurnikan dan bebas dari komponen pembentuk abu dan dapat langsung digunakan atau dilakukan sedikit pembersihan terlebih dahulu. Secara umum bahan bakar jenis ini mengandung kontaminasi dari natrium dan potasium hingga 1ppm serta sulfur hingga 1 persen berat. Sedangkan, *ash-forming fuels* membutuhkan pemansan, pembersihan maupun penambahan aditif dan dilakukan pembersihan berkala pada turbin. Selain tingginya jumlah natrium dan potasium hingga 100ppm, sulfur hingga

4 persen berat, dan vanadium hingga 100ppm bahan bakar jenis *ash-forming fuels* perlu dilakukan pemisahan dari kontaminasi logam alkali.

Spesifikasi bahan bakar yang diperlukan dan penting untuk diperhatikan dengan disain dari system pembakaran adalah sebagai berikut:

1. Panas yang dihasilkan
2. Kebersihan (keberadaan residu pembakaran, tingkat kontaminasi)
3. Tingkat korosi
4. Deposisi dan kecenderungan membentuk endapan
5. Ketersediaan

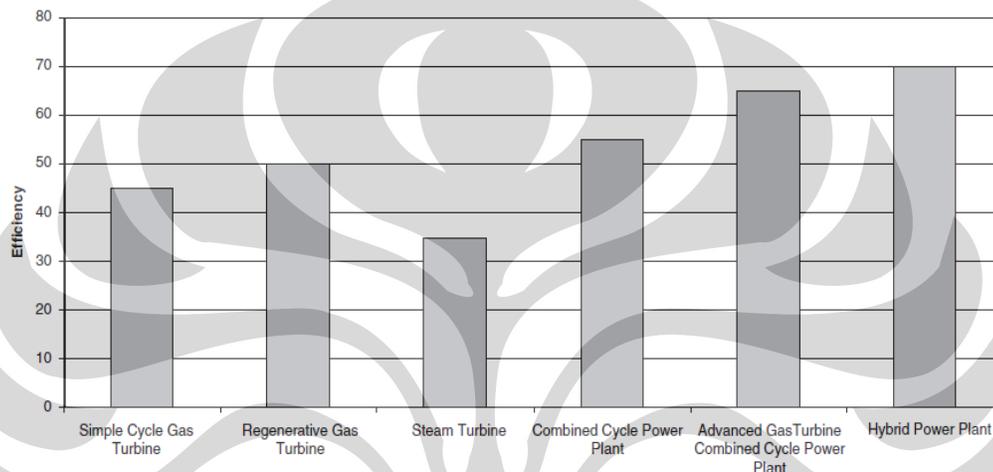


Gambar 2.2 Efek dari berbagai jenis bahan bakar pada temperatur pemasukan

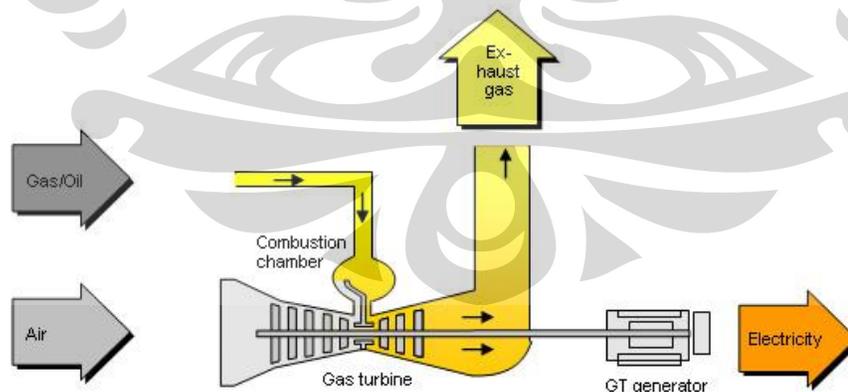
### 2.1.2 Sistem Kerja dan Termodinamika Turbin Gas

Turbin gas menggunakan prinsip siklus Brayton, sesuai dengan nama penemunya, George Brayton sekitar tahun 1870. Aplikasi utama dari siklus ini adalah untuk pembangkit listrik dan propulsi jet. Siklus termodinamika turbin gas ini dapat berupa siklus terbuka dan siklus tertutup. Siklus terbuka ini lazim digunakan pada sistem pengoperasian turbin gas. Siklus ini biasa dikenal sebagai *simple cycle gas*

*turbine* (SCGT). Turbin gas siklus terbuka mampu memproduksi energi 100 hingga 300MW dengan efisiensi panas 35 sampai 40%. Turbin gas yang paling efektif mempunyai efisiensi panas yang bernilai 46%. Nilai efisiensi dari sistem termodinamika turbin gas ini telah dan akan terus berkembang pada kemampuan dan efisiensi gas turbin seiring berkembangnya material-material baru.

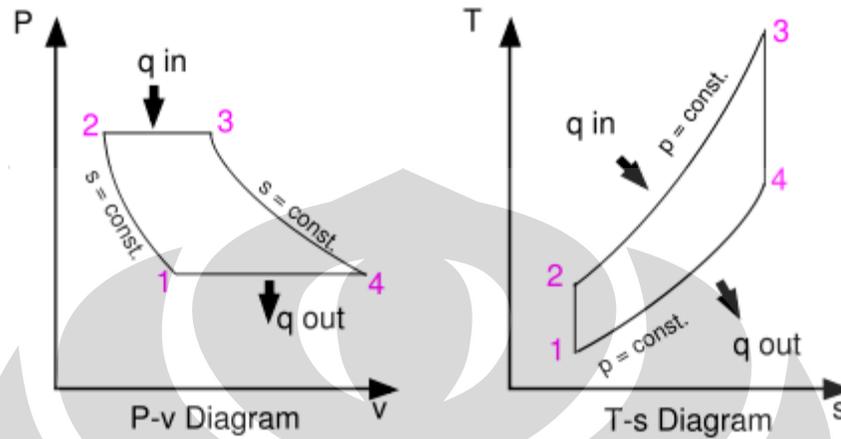


Gambar 2.3 Tipikal efisiensi dari tenaga pembangkit<sup>[1]</sup>.



Gambar 2.4 Skematik gambar gas turbin siklus terbuka<sup>[20]</sup>.

Prinsip termodinamika dari turbin gas dengan siklus Brayton adalah sebagai berikut:



Gambar 2.5 Diagram siklus brayton ideal<sup>[20]</sup>.

1 – 2 proses kompresi isentropik di dalam kompresor

2 – 3 proses pemasukan kalor pada tekanan konstan di dalam ruang bakar

3 – 4 proses ekspansi isentropik di dalam turbin

4 – 1 proses pembuangan kalor tekanan konstan dalam alat pemindah kalor.

Di samping itu, fluida kerja dianggap sebagai gas ideal dengan kalor spesifik  $C_p$  yang konstan. Maka dari hukum pertama termodinamika

$$dQ = dU + \frac{dW}{J} \quad (2.1)$$

sehingga kerja yang dihasilkan oleh sistem turbin gas selama satu siklus adalah

$$\frac{\int dW}{J} = \int dQ \quad (2.2)$$

atau

$$\frac{W}{J} = Q_m - Q_k$$

atau

$$\frac{W}{J} = Q_m - Q_k = C_p (T_3 - T_2) - C_p (T_4 - T_1)$$

Maka efisiensi siklus Brayton adalah

$$\eta = \frac{W}{J \times Q_m} = 1 - \left( \frac{Q_k}{Q_m} \right) \quad (2.3)$$

atau

$$\eta = 1 - \left( \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \right)$$

tetapi

$$\left( \frac{P_2}{P_1} \right) = \left( \frac{P_3}{P_4} \right) \quad (2.4)$$

dan oleh karena proses 1 – 2 dan 3 – 4 adalah isentropik, maka

$$\left( \frac{P_2}{P_1} \right) = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\left( \frac{k}{k-1} \right)} \quad (2.5)$$

dan

$$\left( \frac{P_3}{P_4} \right) = \left( \frac{T_3}{T_4} \right)^{\left( \frac{k}{k-1} \right)} \quad (2.6)$$

oleh karena

$$\left( \frac{P_2}{P_1} \right) = \left( \frac{P_3}{P_4} \right) \quad (2.7)$$

maka

$$\left( \frac{T_2}{T_1} \right) = \left( \frac{T_3}{T_4} \right) \quad (2.8)$$

atau

$$\left( \frac{T_2}{T_1} \right) = \left( \frac{T_3}{T_4} \right) \quad (2.9)$$

sehingga persamaan menjadi

$$\eta = 1 - \left( \frac{T_1}{T_2} \right) = 1 - \left( \frac{1}{\left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\left( \frac{k-1}{k} \right)}} \right) \quad (2.10)$$

Jadi, efisiensi siklus Brayton akan naik apabila dapat digunakan perbandingan tekanan kompresi  $\left( \frac{P_2}{P_1} \right)$  yang lebih tinggi.

Prosesnya diawali dengan udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (*inlet*). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan

udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk kedalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar beban lainnya seperti generator listrik, dll. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (*exhaust*).

Secara umum proses yang terjadi pada suatu siklus sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

1. Pemampatan (*compression*) udara di hisap dan dimampatkan
2. Pembakaran (*combustion*) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian di bakar.
3. Pemuaian (*expansion*) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (*nozzle*).
4. Pembuangan gas (*exhaust*) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.

Pada kenyataannya, tidak ada proses yang selalu ideal, tetap terjadi kerugian-kerugian yang dapat menyebabkan turunnya daya yang dihasilkan oleh turbin gas dan berakibat pada menurunnya performa turbin gas itu sendiri. Kerugian-kerugian tersebut dapat terjadi pada ketiga komponen sistem turbin gas. Sebab-sebab terjadinya kerugian antara lain:

1. Adanya gesekan fluida yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan (*pressure losses*) di ruang bakar.

2. Adanya kerja yang berlebih waktu proses kompresi yang menyebabkan terjadinya gesekan antara bantalan turbin dengan angin.
3. Berubahnya nilai  $C_p$  dari fluida kerja akibat terjadinya perubahan temperatur dan perubahan komposisi kimia dari fluida kerja.
4. Adanya *mechanical loss*, dsb.

## 2.2 KOROSI

Korosi merupakan degradasi material akibat adanya reaksi antara material dengan lingkungannya baik secara kimia maupun secara elektrokimia. Korosi menurut bidangnya terbagi menjadi ilmu korosi (*corrosion science*) dan aplikasi korosi (*corrosion engineering*). *Corrosion science* adalah studi yang mempelajari proses kimia dan metalurgi yang terjadi selama korosi, sedangkan *corrosion engineering* adalah disain dan aplikasi dari metode-metode untuk menghambat proses korosi.

Prinsip dasar korosi adalah reaksi elektrokimia yang berupa oksidasi dan reduksi. Daerah anodik akan mengalami reaksi oksidasi sedangkan daerah katodik akan mengalami reduksi. Reaksi anodik dalam proses korosi merupakan reaksi perubahan logam menjadi ion logamnya:



Proses ini akan selalu disertai oleh proses katodik pada aplikasi nyatanya.

Akibat dari terjadinya korosi dan degradasi dari material akan memberikan efek atau konsekuensi sebagai berikut:

1. Rusaknya penampakkan material
2. Keselamatan dan ketahanan material
3. Kontaminasi produk yang dihasilkan
4. Hilangnya produk yang bernilai
5. Liabilitas produk
6. Berhentinya operasional

## 7. Perawatan dan biaya operasional

Selain memberikan kerugian secara teknis peristiwa korosi juga memberikan dampak ekonomis. Peristiwa korosi dapat menjadi penyebab utama kerusakan dalam gas turbin atau membuat material menjadi sensitif terhadap kerusakan dengan mekanisme lainnya-

### 2.2.1 Jenis Jenis Korosi

Secara umum korosi dapat dibedakan menjadi:

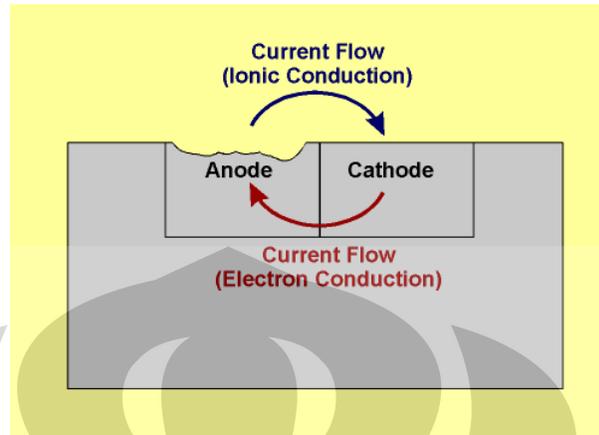
#### 1. Korosi merata (uniform corrosion)

Korosi merata didefinisikan sebagai degradasi material akibat material terkena lingkungan korosif yang sama dan material tersebut harus mempunyai komposisi yang sama.



Gambar 2.6 Korosi merata, gambar diambil dari korosi galvanik<sup>[24]</sup>

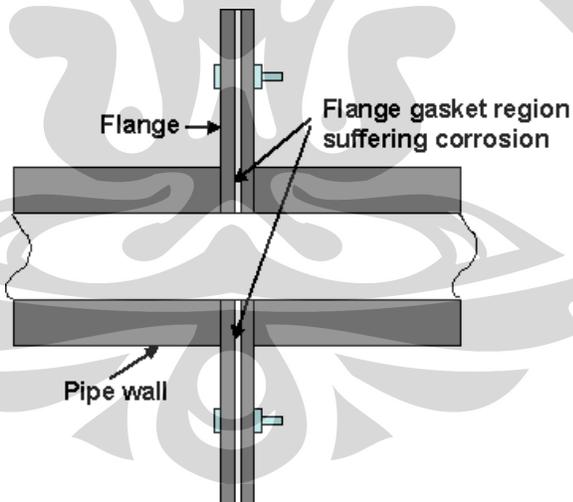
Korosi galvanik adalah korosi yang terjadi bilamana terdapat dua material berbeda yang terhubung secara elektrik. Untuk terjadinya korosi galvanik diperlukan adanya anoda, katoda, elektrolit, dan kontak elektrik untuk mengalirkan elektron. Faktor-faktor penting yang mempengaruhi laju dari korosi galvanik adalah deret logam dalam galvanik seri, lingkungan, dan luas permukaan kontak. [18]



Gambar 2.7 Sel korosi galvanik<sup>[18]</sup>.

## 2. Korosi celah (crevice corrosion)

Korosi celah merupakan bentuk korosi terlokalisasi yang terjadi dimana terdapat celah untuk fluida yang bekerja dan terbentuk sel konsentrasi. Daerah yang mempunyai perbedaan konsentrasi oksigen akan mengalami korosi dengan laju yang lebih tinggi. [20]



Gambar 2.8 Korosi celah yang terjadi pada flange<sup>[24]</sup>.

## 3. Korosi sumuran (pitting corrosion)

Korosi sumuran merupakan bentuk serangan terlokalisir yang menghasilkan lubang atau sumuran pada suatu logam. Sumuran pada umumnya

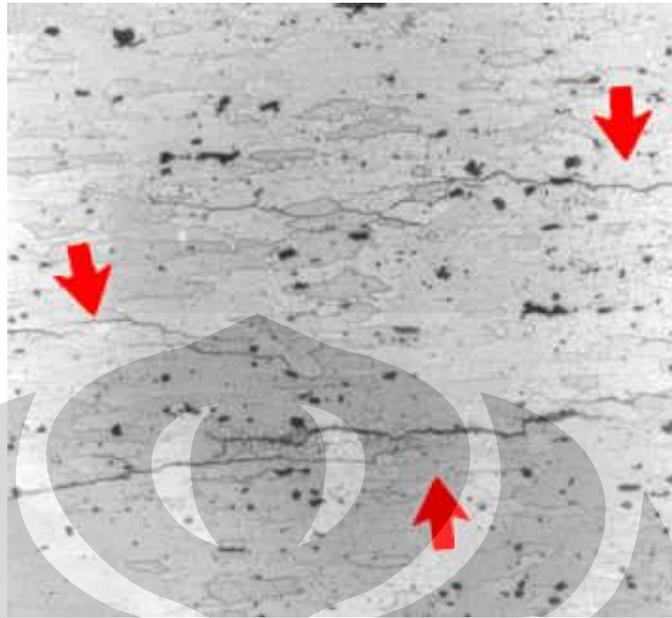
timbul dari permukaan horizontal dan berkembang searah dengan gravitasi. Sekali perumbuhan sumuran dimulai maka penetrasi sumuran akan semakin cepat dan memperluas daerah di bawah permukaan logam. Korosi ini diukur berdasarkan kepadatan sumuran dalam permukaan, ukuran, dan kedalaman dari sumuran yang terbentuk.



Gambar 2.9 Korosi sumuran yang terjadi pada baja austenitik<sup>[17]</sup>.

#### 4. Korosi batas butir (intergranular corrosion)

Mikrostruktur dari logam dan paduan terdiri dari butir-butir yang dipisahkan oleh batas-batas butir atau perbedaan orientasi dari butir. Korosi jenis ini terjadi pada sepanjang batas butir maupun daerah dekat batas butir. Bentuk korosi ini biasanya diasosiasikan dengan terjadinya efek segregasi kimia (pengotor cenderung berada pada daerah batas butir) fasa yang berada batas butir. Daerah tersebut bisa mengurangi ketahanan korosi pada batas butir dan sekitarnya.[21]



Gambar 2.10 Korosi batas butir pada komponen pesawat terbang yang terbuat dari Al 7075 T6, dengan perbesaran 500 kali<sup>[17]</sup>

#### 5. Pelarutan seleksi (selective leaching)

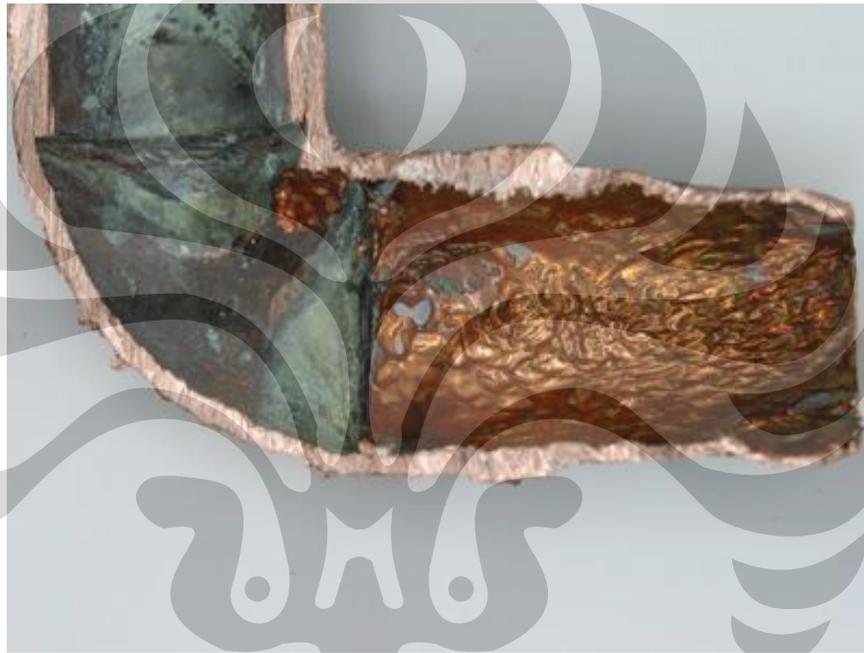
Merupakan jenis korosi yang hanya merusak material dari komposisi tertentu di dalamnya. Korosi ini disebut juga dengan dealloying, yaitu pelarutan selekti dari satu komponen atau lebih dalam larutan padat. Contoh umum jenis korosi pelarutan selektif adalah dekarburisasi, dekobaltisasi, denikelisasi, dezingfikasi, dan grafitisasi. [22]



Gambar 2.11 Korosi pelarutan selektif<sup>[21]</sup>.

#### 6. Korosi erosi (erosion corrosion)

Korosi jenis erosi terjadi karena adanya peningkatan gerakan dipermukaan logam dengan fluida yang mengalir. Korosi jenis ini terjadi cukup cepat dan disertai adanya faktor friksi atau gesekan. Korosi ini biasanya terjadi pada aliran fluida yang sangat kencang atau bersifat turbulen. Karakteristik yang dihasilkan dari korosi erosi adalah terjadi cekungan, gelombang-gelombang, lubang melingkar, dan bukit-bukit yang biasanya menampilkan jejak-jejak dari arah aliran fluida.



Gambar 2.12 Korosi erosi pada material paduan tembaga<sup>[24]</sup>.

#### 7. Korosi retak tegang (stress corrosion cracking)

Korosi retak tegang adalah degradasi retak yang terjadi akibat kombinasi antara tegangan yang bekerja dengan lingkungan yang korosif. Sumber tegangan pada material yang mengalami korosi retak tegang bisa berasal tegangan aplikasi ataupun dari tegangan sisa dalam proses material.[21]



Gambar 2.13 Mikrostruktur yang mengalami korosi retak tegang<sup>[19]</sup>.

### 2.2.2 Korosi Temperatur Tinggi Pada Turbin Gas

Korosi temperatur tinggi telah dikenal sejak tahun 1950'an. Korosi ini merupakan proses oksidasi yang sangat cepat yang terjadi pada rentang temperatur antara 815 - 950<sup>0</sup>C dengan adanya sodium sulfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

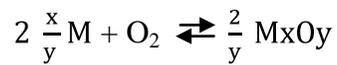
Korosi temperatur tinggi pada turbin gas dapat didefinisikan sebagai degradasi dari material akibat reaksi material dengan fluida gas pembakaran. Degradasi tersebut terbagi menjadi dua bagian utama yaitu *Gas-Induced Corrosion* dan *Hot Corrosion*. [2]

#### 2.2.2.1 Korosi Induksi Gas

Korosi ini dari mekanisme utama yang berbeda sebagai oksidasi, sulfidasi, nitridasi, karburisasi dan klorinasi. Mekanisme-mekanisme tersebut dapat terjadi secara sendiri atau terpisah maupun secara kombinasi keduanya. Jenis – jenis korosi induksi gas adalah sebagai berikut:

##### 1) Oksidasi

Pada turbin gas, pembakaran terjadi dengan reaksi oksigen yang berlebih dan berada pada tekanan oksidasi. Namun, tekanannya dapat juga berada pada karakter reduksi yang terlokalisasi berdasarkan tempat dan waktu. Pembentukan oksida logam M<sub>x</sub>O<sub>y</sub> akan terjadi jika energi bebas bernilai negatif untuk reaksi sebagai berikut:



Dan tekanan parsial dari oksigennya lebih besar dari

$$P_{O_2} \geq \exp(\Delta G^0/RT)$$

## 2) Korosi akibat Oksidasi dan Sulfidisasi

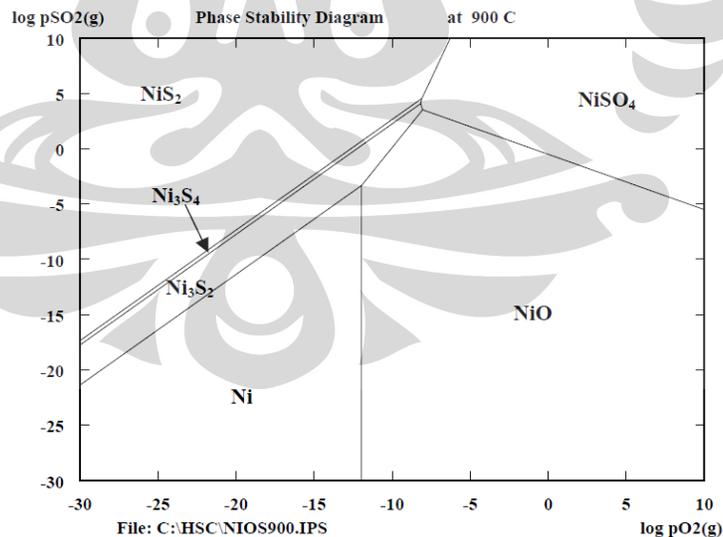
Selain oksidasi, sulfidisasi dari logam dan paduan merupakan fenomena yang umum terjadi pada pembakaran gas. Pada umumnya, gas pembakaran merupakan atmosfer pengoksidasi yang berupa jumlah  $SO_2/SO_3$  yang signifikan. Dalam  $SO_2$  mengandung udara, tekanan parsial sulfur diberikan melalui kesetimbangan:



dengan:

$$p(S_2) = K \left( \frac{pSO_2}{pO_2} \right)^2$$

Dalam diagram kesetimbangan termodinamika, fasa stabil yang terbentuk pada atmosfer oksidasi dan sulfidasi adalah seperti gambar 2.14



Gambar 2.14 Diagram kestabilan termodinamika untuk Ni-S-O pada  $900^\circ C^{[2]}$ .

Aktivitas sulfur yang tinggi terjadi pada tekanan parsial oksigen yang rendah, yang akan membentuk senyawa – senyawa sulfida. Pada tekanan parsial oksigen dan  $\text{SO}_2$  yang tinggi, senyawa sulfat terbentuk.

3) Fenomena Korosi Lainnya: Nitridasi, Karburisasi dan Klorinasi

Stainless steels dan banyak paduan-paduan tinggi akan perlahan-lahan membentuk lapisan nitrida yang getas jika berada pada atmosfer nitridasi pada temperatur lebih dari  $400^\circ\text{C}$  atau  $750^\circ\text{F}$ . Selama ini atmosfer nitridasi yang paling umum adalah amonia ataupun campuran gas yang kaya akan amonia. Laju nitridasi biasanya lebih rendah jika dibandingkan dengan laju karburisasi. Paduan khusus dan atau aluminium maupun pelapisan aluminium secara deposisi uap digunakan untuk menahan nitridasi. Pemilihan material dilakukan untuk menentukan material yang mampu menahan nitridasi dengan nilai yang diperbolehkan misalnya 1,5mm.

Karburisasi mengacu pada pembentukan lapisan-lapisan yang kaya akan karbida pada permukaan dari suatu material yang diekspos pada lingkungan hidrokarbon yang bersifat reduksi. Karburisasi dapat menyebabkan kegagalan secara prematur. Kegagalannya sering disebabkan akibat perpatahan akibat besarnya perbedaan dari koefisien ekspansi termal antara material induk dengan lapisan akibat karburisasi. Perpatahan tersebut menyebabkan lapisan terkaburisasi lepas dari material induk, dan menyebabkan material terkaburisasi secara terulang-ulang. Siklus panas atau *thermal cycling* merupakan contoh yang menyebabkan terjadinya kegagalan akibat karburisasi. Kehilangan material logam merupakan bentuk dari kegagalan akibat mekanisme karburisasi yang dikenal sebagai *metal dusting*, yang dapat terjadi dengan sangat cepat. Mekanisme karburisasi merupakan proses yang sangat terbatas yang melibatkan aliran dari perbandingan  $\text{CO}/\text{CO}_2$  pada orde 3 sampai 5, dalam rentang temperatur  $650\text{-}845^\circ\text{C}$ , biasanya melibatkan

paduan-paduan Fe-Cr dan Fe-Cr-Ni yang mempunyai kandungan krom 25 persen atau lebih. *Metal dusting* biasanya menyebabkan permukaan-permukaan menjadi halus, lubang sumuran sirkular, dan sangat buruk pada daerah yang stagnan. Pada beberapa kasus, kerusakan akibat sumuran merupakan permasalahan yang umum. [3]

#### 2.2.2.2 Korosi Induksi Deposit

Korosi induksi deposit atau *hot corrosion* didefinisikan sebagai percepatan korosi pada material yang berada pada temperatur tinggi yang terinduksi oleh lapisan film dari deposit lelehan garam. Sebagai inisiasi dari *hot corrosion* maka dibutuhkan deposisi dari agen korosif, seperti sulfat.

Tipikal rentang temperatur untuk *hot corrosion* pada turbin gas adalah 600 – 900°C. Batas atas ditetapkan oleh nilai *dew point* dari agen korosif, yang tergantung pada nilai konsentrasi dari impurities gas buang. Batas bawah temperatur ditetapkan oleh titik eutektik terendah yang tergantung oleh material dan komposisi dari deposit-deposit. Jenis – jenis korosi induksi deposit adalah sebagai berikut:

- 1) Disolusi dari Produk Oksida

Paduan yang digunakan pada turbin gas akan membentuk produk oksida atau scales oxide pada temperatur tinggi. Sebagai reaksi awal dari korosi, produk produk oksida terlarut oleh deposit-deposit garam. Mekanisme ini disebut juga sebagai fluxing.

- 2) Korosi Temperatur Tinggi Tipe I

Tipe I dari korosi temperatur tinggi atau High Temperature *Hot corrosion* (HTHC) terjadi pada rentang temperatur antara 800 – 950°C. Batas atas dari temperatur ditetapkan oleh nilai dew point dari agen korosif yang ada sedangkan batas bawahnya lebih variatif. Tipe ini dilaporkan juga terjadi pada temperatur 750°C.

### 3) Korosi Temperatur Tinggi Tipe II

Tipe I dari korosi temperatur tinggi atau Low Temperature *Hot corrosion* (LTHC) terjadi pada rentang temperatur antara 600 – 800°C. Morfologi dari produk korosinya ditandai dengan adanya korosi jenis sumuran yang tidak merata atau *non-uniform pitting corrosion* dengan sedikit atau tanpa sulfidisasi internal.

## 2.3 Material Aplikasi Temperatur Tinggi dan Perlindungan

### 2.3.1 Material Paduan Khusus Untuk Aplikasi Temperatur Tinggi

Batasan temperatur merupakan masalah terbesar sebagai faktor pembatas pada efisiensi turbin gas. Komponen-komponen turbin gas beroperasi pada tegangan yang, temperatur, dan kondisi korosi yang bervariasi. Kompresor beroperasi pada temperatur yang relatif rendah tetapi berada pada tegangan yang tinggi. Ruang bakar beroperasi pada temperatur yang relatif tinggi dan kondisi tegangan yang rendah. Sudu turbin beroperasi pada temperatur, tegangan, dan kondisi korosi yang ekstrim. Pada akhirnya, pemilihan material untuk tiap-tiap bagian komponen dipilih berdasarkan variasi kriteria dari kondisi operasinya.

Material paduan untuk aplikasi temperatur tinggi yang banyak digunakan pada umumnya adalah material paduan super berjenis material tahan temperatur tinggi atau disebut heat resistant alloy. Material paduan super ini terbagi menjadi tiga kelas yaitu material berbahan dasar nikel, material berbahan kobalt, dan material yang berbahan dasar besi namun dengan syarat maksimal kandungan Fe adalah 50%.

### 2.3.2 Perlindungan Material Aplikasi Temperatur Tinggi

Perlindungan material aplikasi temperatur tinggi semakin meningkat seiring dengan perkembangan jenis-jenis pelapisan yang ada. Pada aplikasi temperatur tinggi perkembangan itu ditandai dengan kemampuannya menahan terhadap panas, serangan lingkungan seperti *hot corrosion* dan okidasi, dan kekuatan mekanisnya. Jenis pelapisan pada aplikasi temperatur tinggi antara lain adalah sistem pelapisan logam (metallic coating system) dan sistem pelapisan keramik (ceramic coating

system). Jenis tersebut banyak digunakan pada aplikasi turbin gas dan material temperatur tinggi lainnya. Salah satu dari jenis pelapisan dengan keramik yang banyak dipakai adalah pelapisan penghambat panas atau *thermal barrier coating*.

### 2.3.2.1 *Thermal barrier coating*

*Thermal barrier coating* digunakan untuk menginsulasi dan melindungi material dari panas. Untuk meningkatkan keefektifan *thermal barrier coating* maka material yang dilindungi perlu mendapatkan pendinginan supaya panas yang dihambat pada permukaan pelapisan dapat terbuang atau tidak terakumulasi. Untuk menjaga sifat mekanis, termal, dan ketahanan korosi maka panas yang diserap harus dibuang. *Thermal barrier coating* mampu mereduksi temperatur logam dari 50-150°C. Sekitar 50% panas dari energi yang dihasilkan pada proses pembakaran dibuang melalui sistem pendingin udara dan melalui pembuangan gas secara konveksi. Penggunaan *thermal barrier coating* ini biasanya pada daerah ruang pembakaran, daerah transisi atau daerah aliran panas, nosel, dan sudu-sudu turbin. [1]

Persyaratan yang sangat dibutuhkan pada *thermal barrier coating* adalah:

1. Konduktivitas termal yang rendah
2. Tahan terhadap lingkungan korosi dan erosi
3. Koefisien termal ekspansi yang tinggi (untuk kesesuaian terhadap lapisan metalik agar terhindar dari *mismatch*).
4. Tahan terhadap panas kejutan atau thermal shock.

Tabel 2.1 Karakteristik yang dibutuhkan pada *thermal barrier coating*<sup>[4]</sup>.

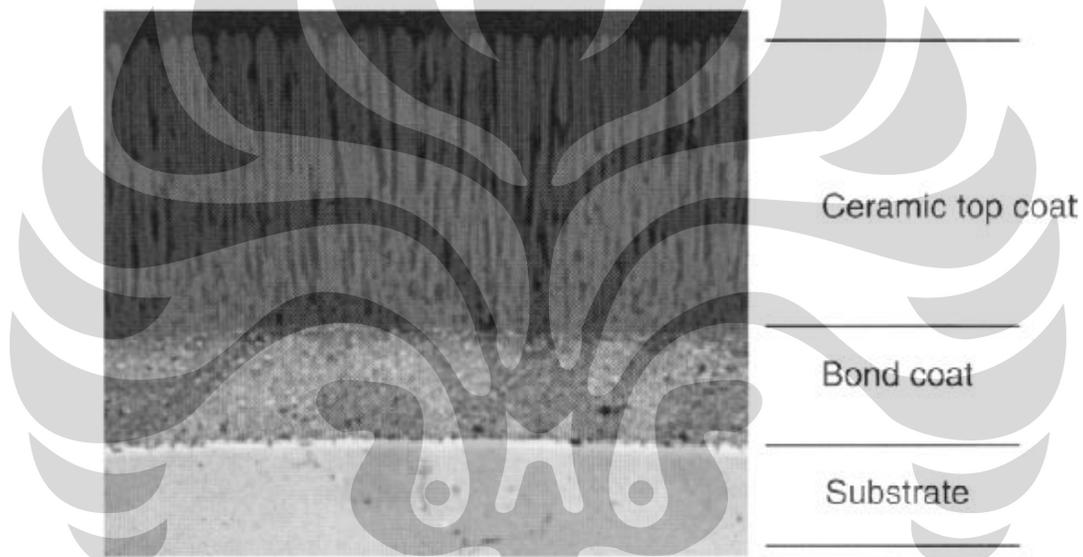
Karakter	Kebutuhan	Pertimbangan
Titik lebur	Tinggi	Lingkungan operasional pada temperatur tinggi
Konduktivitas termal	Rendah	Penurunan panas berbanding terbalik dengan konduktivitasnya

Koefisien ekspansi termal	Tinggi	Ekspansi dari <i>bond coat</i> , <i>top coat</i> , dan <i>base metal</i> harus seimbang
Fasa	Stabil	Perubahan fasa pada lingkungan siklus termomekanikal yang akan merusak secara struktur
Ketahanan Oksidasi	Tinggi	Temperatur operasional sangat okidasi
Ketahanan Korosi	Moderat hingga tinggi	Lingkungan mungkin korosif
Toleransi regangan	Tinggi	Temperatur operasi memaksakan terjadi regangan pada rentang yang besar.

Tabel 2.2 Elemen pada pelapisan logam, fungsi dan pengaruhnya<sup>[4]</sup>.

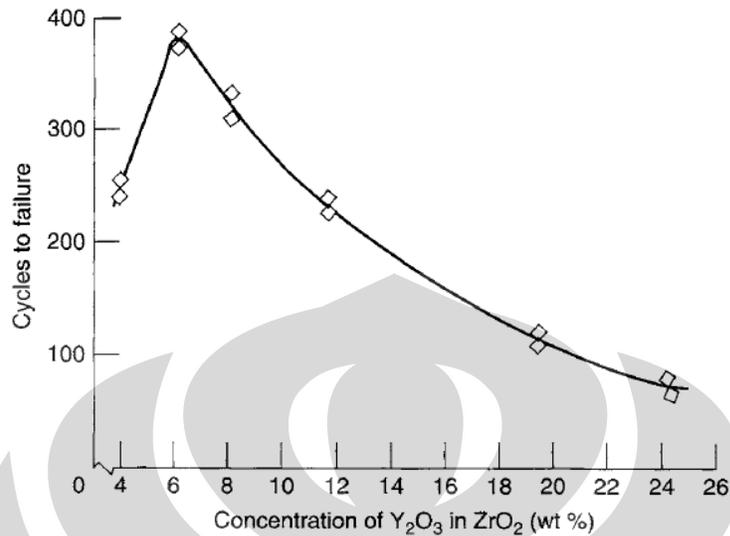
Elemen	Keuntungan	Kekurangan
Ni	Elemen utama, meningkatkan kekuatan.	Mudah rusak karena pengaruh sulfur
Co	Elemen utama untuk subsrat paduan. Meningkatkan kekuatan dan memberikan kestabilan mikrostruktur.	Mudah rusak karena pengaruh sulfur
Al	Elemen utama untuk subsrat paduan. Meningkatkan kekuatan dan ketahanan oksidasi.	Jika berlebih maka menurunkan titik lebur
Cr	Elemen pada subsrat paduan. Ketahanan oksidasi sampai 1500 <sup>o</sup> F, mengurangi kebutuhan akan Al untuk membentuk oksida aluminium, dan memberikan ketahanan <i>hot corrosion</i> .	Menurunkan kekuatan mulur
Ta	Meningkatkan ketahanan <i>hot corrosion</i> dan menambah kekuatan.	

Si	Meningkatkan ketahanan oksidasi dan <i>hot corrosion</i> tipe II	Jika berlebih akan transformasi menjadi fasa yang getas
Hf, Y, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , oksida dan elemen reaktif lainnya	Meningkatkan kekuatan ikatan alumina dan oksida krom	Jumlah yang besar akan merusak
Pt	Meningkatkan oksidasi dan <i>hot corrosion</i>	



Gambar 2.15 Lapisan-lapisan pada *thermal barrier coating*<sup>[4]</sup>.

*Thermal barrier coating* terdiri dari bagian atas dan bagian pengikat. Bagian atas atau top coat merupakan bagian keramik ZrO<sub>2</sub> yang distabilkan dengan penambahan Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, CeO, Sc<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, atau In<sub>2</sub>O<sub>2</sub> untuk menghindari transformasi fasa, menstabilkan fasa pada temperatur tinggi dan mengeliminasi perubahan volume. Dari jenis-jenis penstabil yang ada Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> merupakan penstabil yang paling optimal dalam pemakaian bersama zirkonia, tepatnya jenis 7YSZ atau ZrO<sub>2</sub> – 7% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang merupakan standard pemakaian di industri.

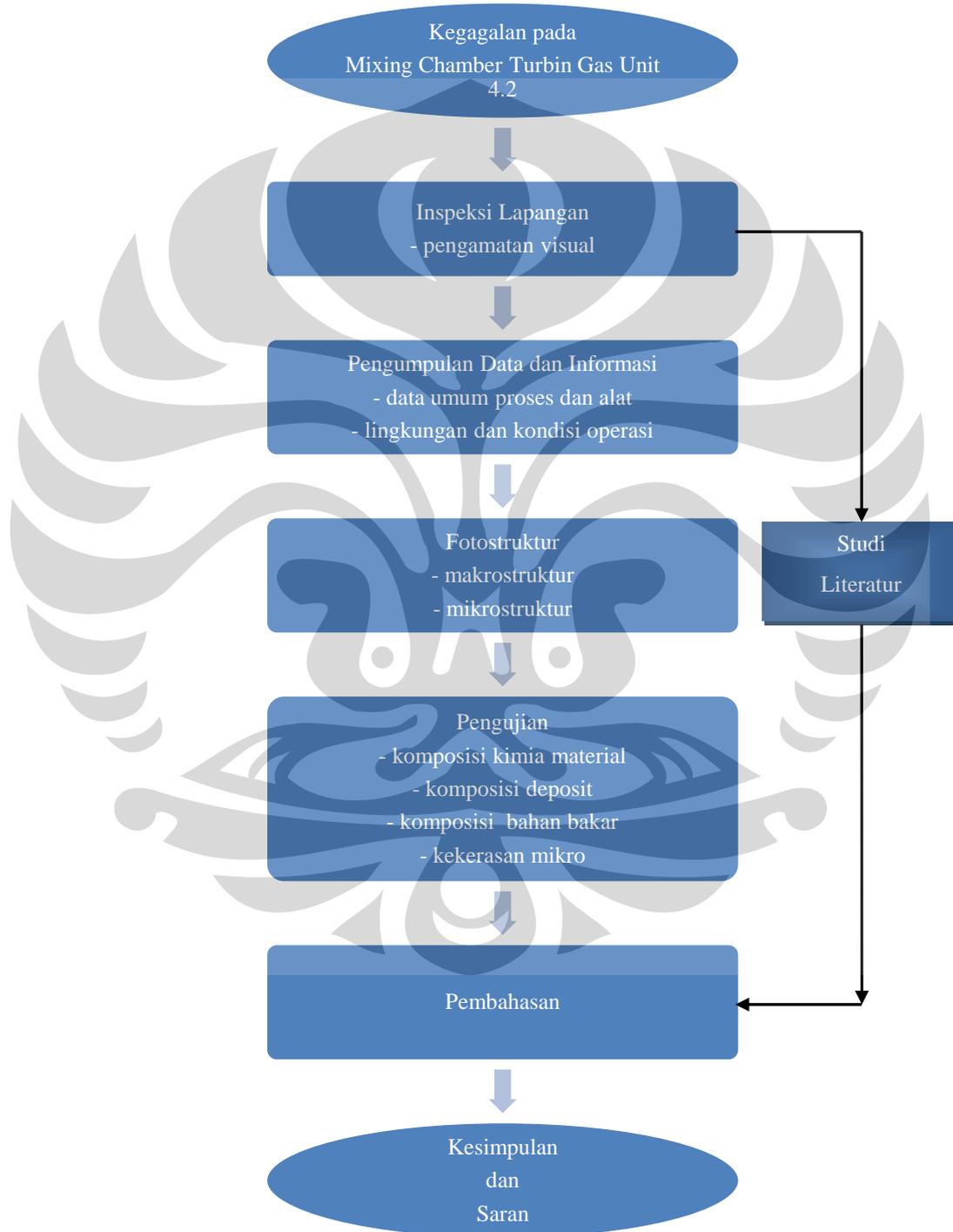


Gambar 2.16 Komposisi dan optimisasi dari  $ZrO_2 - Y_2O_3$  pada sistem *thermal barrier coating* berdasarkan waktu pakai<sup>[4]</sup>.

*Thermal barrier coating* harus mempunyai permukaan yang mampu mengikat lapisan atas. Sehingga lapisan ini juga dilapisi oleh jenis pelapisan lainnya seperti *diffusion coating* maupun *overlay coating*. Normalnya, tebal lapisan protektif yang kaya akan aluminium oksida dengan ketebalan  $1\mu m$  digunakan untuk tujuan menguatkan ikatan pada lapisan atas tersebut. Karena kandungan aluminium pada material biasanya tidak cukup untuk membentuk lapisan aluminium yang bersifat protektif, maka lapisan kaya akan aluminium *bond coat* diaplikasikan kedalamnya dimana pertumbuhan lapisan oksida secara termal mungkin terbentuk. Lapisan dengan ketebalan sekitar  $50\mu m$  Pt - Al dengan kandungan sulfur rendah maupun MCrAlY dimana M adalah Ni atau Co digunakan.

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Berdasarkan permasalahan maka dalam melakukan analisa kegagalan langkah penelitian yang dilakukan umumnya adalah seperti metodologi pada bagan di atas. Data-data yang diambil dan tujuannya adalah sebagai berikut:

### **3.2 Alat dan Bahan**

#### 3.2.1 Alat

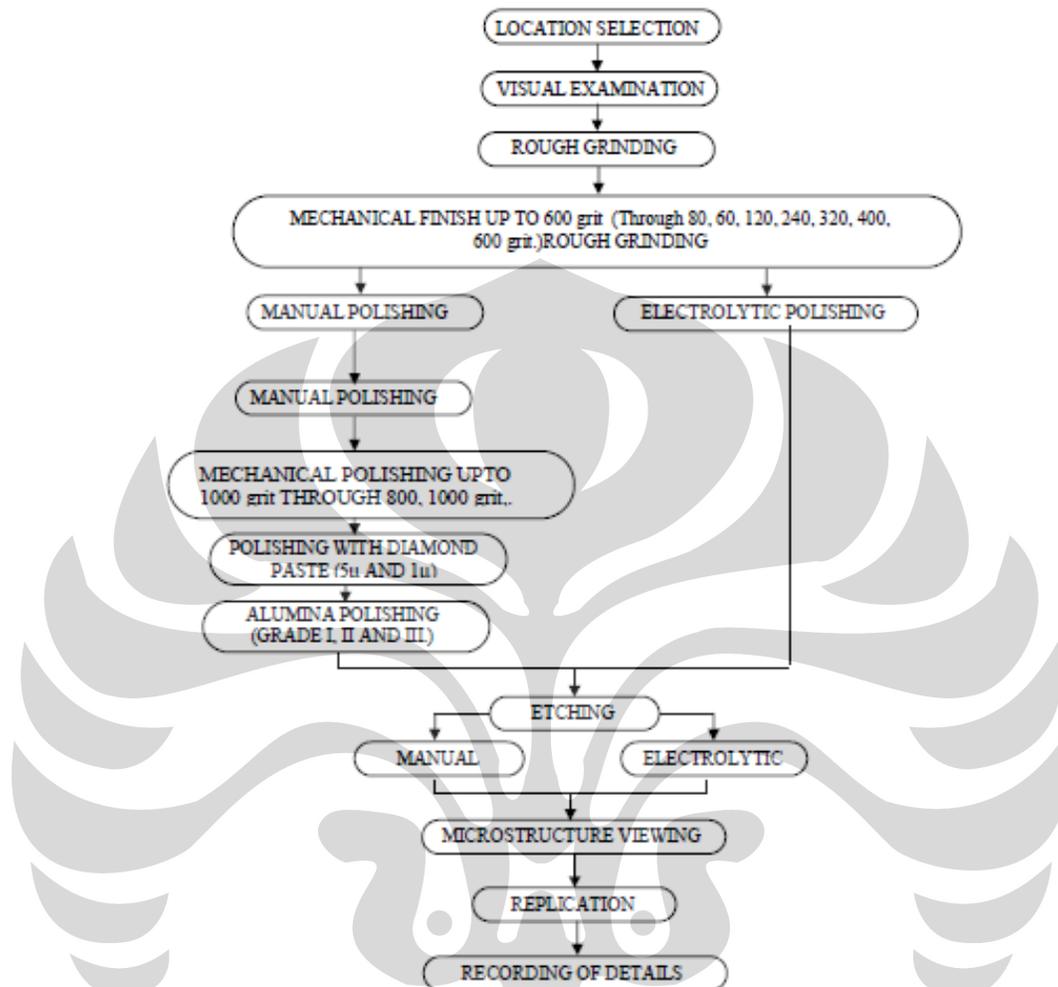
1. Kertas amplas dan *portable hand grinding*
2. Mikroskop optik dan kamera digital
3. *Equotip hardness tester*

#### 3.2.2 Bahan

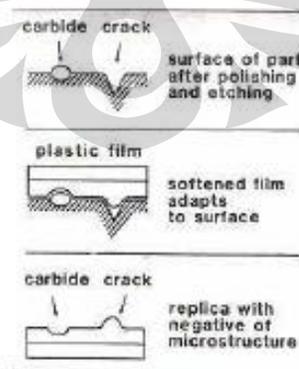
1. Kertas amplas berbagai grit
2. Resin dan hardener
3. Pasta poles
4. Larutan etsa:
  - a. Aqua regia
  - b. Kalling reagent

### **3.3 Prosedur *In-Situ Metallography***

Dikarenakan material yang digunakan pada *mixing chamber* gas turbin merupakan material yang tidak bisa dipisahkan atau dibawa dengan mudah maka metode replika atau biasa dikenal sebagai *in-situ metallography* lebih tepat untuk dilakukan. Proses untuk melakukan pemeriksaan secara in-situ secara garis besar pengujiannya sama dengan proses metalografi pada umumnya. Hanya saja di sini digunakan alat-alat yang sifatnya mudah dibawa untuk melakukan pengujian di tempat dan tidak melakukan proses mounting tetapi dilakukan replikasi permukaan dengan lapisan film. Berikut ini adalah diagram alir yang dilakukan untuk pemeriksaan *in-situ metallography*.



Gambar 3.1 Diagram alir untuk *in-situ metallography*<sup>[8]</sup>.



Gambar 3.2 Skema representasi dari proses replika<sup>[8]</sup>

### 3.4 Pengujian komposisi kimia

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah material yang digunakan pada *mixing chamber* sesuai dengan dokumen dan sesuai dengan standard yang ada. Berdasarkan dokumen, material yang digunakan adalah 16Mo3 atau 17Mn4 yang identik dengan standard ASTM 204 Gr.B yang dikenal dengan baja paduan. Dengan dilakukannya uji komposisi ini maka kita dapat mengetahui apakah komposisi kimia dalam baja paduan telah sesuai pada standard untuk aplikasi. Namun pada penelitian ini hanya digunakan literatur dari material 16Mo3.

### 3.5 Pengujian komposisi bahan bakar

Pengujian komposisi bahan bakar utamanya ditujukan untuk mengetahui kandungan sulfur, alkali dan lainnya yang sangat berpengaruh dalam proses pembakaran. Pengujian ini dilakukan oleh PT PLN menggunakan pihak luar.

### 3.6 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu material. Pengujian kekerasan secara in-situ metalografi ini menggunakan alat *equotip hardness tester* dengan skala vickers. Pengujian ini menggunakan standard DIN 50133. Pengambilan data ini dilakukan sebanyak tiga kali untuk tiap-tiap daerah yang mengalami kerusakan ataupun daerah yang representatif.



Gambar 3.3 *Equotip Hardness Tester* untuk pengujian kekerasan<sup>[8]</sup>

### **3.7 Pengujian mikrostruktur**

Pengujian mikrostruktur bertujuan untuk mengetahui struktur mikro dari material  $16\text{Mo}_3$ , utamanya adalah untuk membandingkan antara mikrostruktur referensi dengan mikrostruktur hasil replika atau yang telah digunakan. Pada pengujian ini, sampel yang telah dietsa dan direplika diberikan lapisan kaca pada kedua permukaannya kemudian diamati dengan mikroskop optik. Setelah mendapatkan gambar dengan perbesaran yang baik maka pencitraan dilakukan. Tetapi untuk mikrostruktur dari material  $16\text{Mo}_3$  peneliti menggunakan literatur dari sumber yang dicantumkan pada daftar pustaka.

### **3.8 Pengujian deposit**

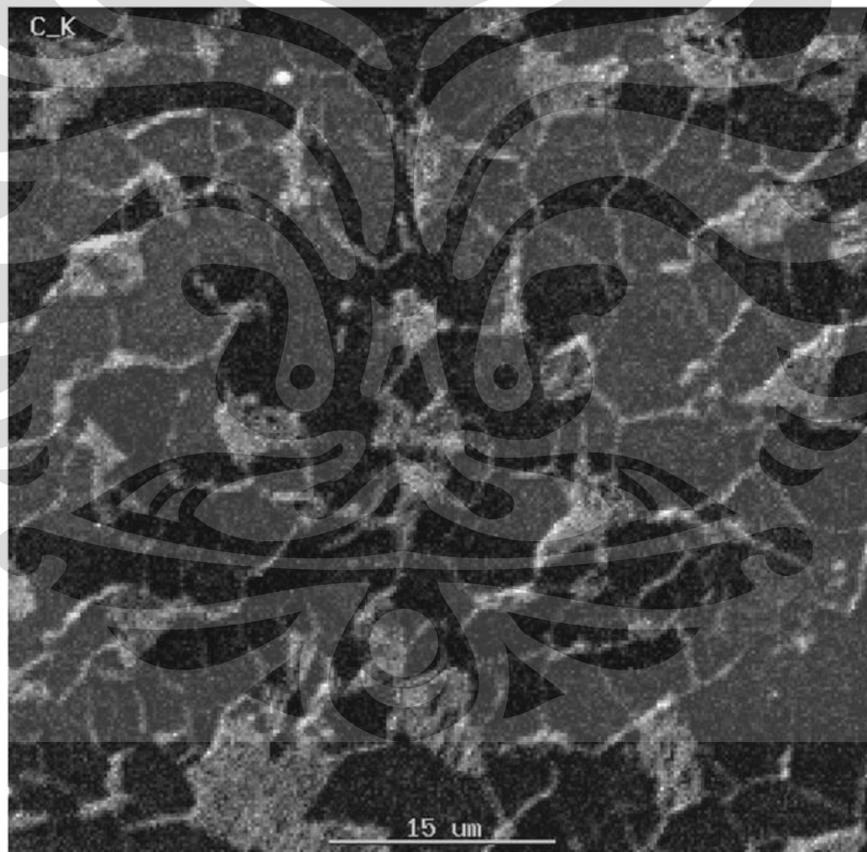
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui produk-produk yang terbentuk akibat material yang bereaksi dengan lingkungan aliran gas panas. Dengan mengetahui komposisi yang ada maka kita dapat mengetahui proses ataupun penyebab yang membuat material mengalami degradasi. Pengujian ini dilakukan oleh PT PLN menggunakan jasa luar dari LUK BPPT.

## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Latar Belakang Material

Material yang digunakan pada bagian *mixing chamber* turbin gas 143MW milik PLN Muara Tawar merupakan material berjenis baja paduan yang sesuai dengan standard DIN 17155 dan setara dengan baja paduan molibdenum atau ASTM 204 grade B dengan mikrostruktur ferit dan bainit. Material ini mempunyai ketahanan sampai pada temperatur 550 - 600°C. Dan dengan ditambahkan lapisan pelindung maka ketahanan temperturnya akan meningkat.



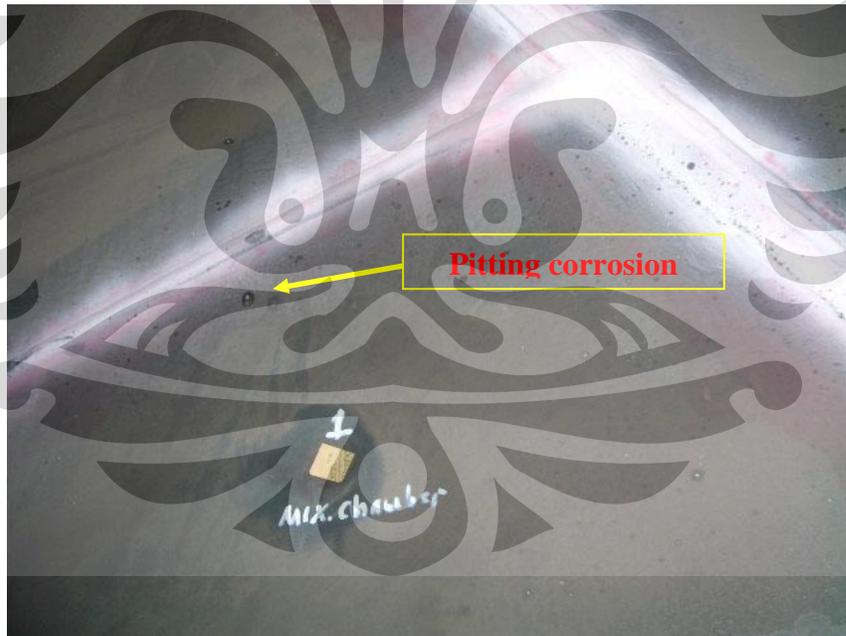
Gambar 4.1 Struktur mikro dari material 15Mo3 yang juga ekuivalen dengan material DIN 17155 untuk aplikasi plat tahan panas<sup>[14]</sup>.

## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Hasil Pengamatan Visual

Dari foto yang diambil pada daerah-daerah terjadinya kegagalan terlihat pada tiap lokasi baik sisi kiri maupun kanan ditemukan adanya korosi sumuran yang cukup besar. Pada gambar 4.2 sampai 4.4 penampakan terjadinya korosi sumuran terlihat dengan jelas, hal ini menandakan bahwa telah terjadi peristiwa korosi temperatur tinggi tipe II yang terjadi pada temperatur 600 – 800°C yang berarti pada rentang temperatur operasional *mixing chamber*. [2,22]

Berikut ini adalah gambar-gambar lokasi untuk daerah yang dilakukan pengambilan uji kekerasan maupun mikrostruktur pada material *mixing chamber* berdasarkan indikasi kerusakan yang terjadi.



Gambar 4.2 Pengamatan visual pada *mixing chamber* sisi kiri lokasi ke-1

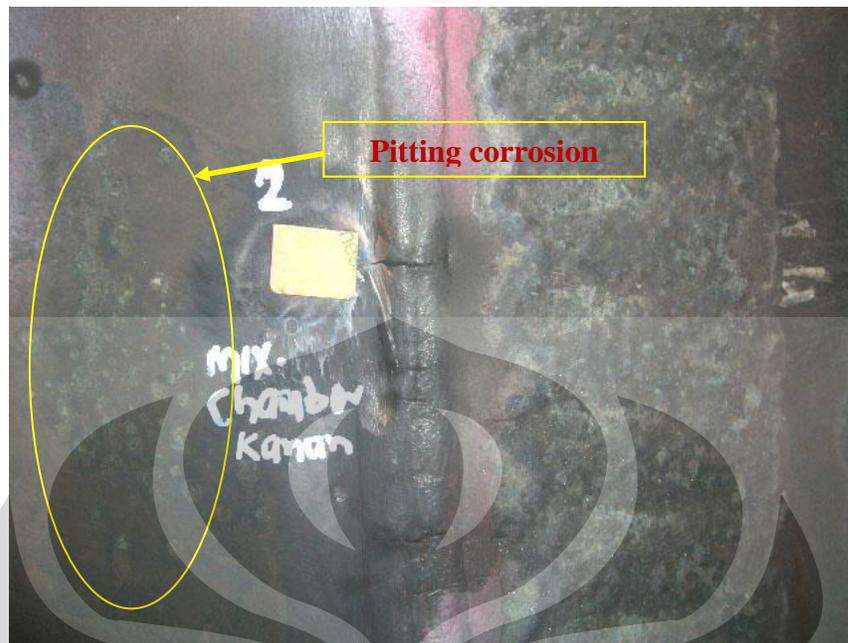
Dari gambar di atas terlihat adanya sebaran korosi sumuran yang tidak merata baik pada daerah dekat penyambungan maupun pada material utama.



Gambar 4.3 Pengamatan visual pada *mixing chamber* sisi kiri lokasi ke-2

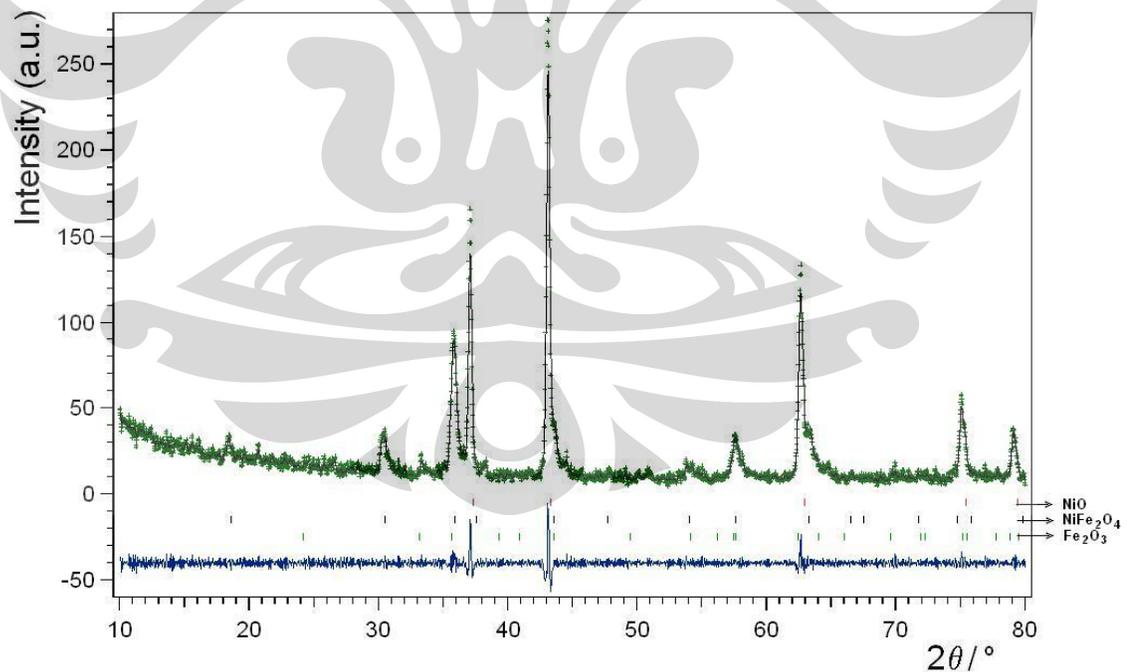


Gambar 4.4 Pengamatan visual pada *mixing chamber* sisi kanan lokasi ke-1

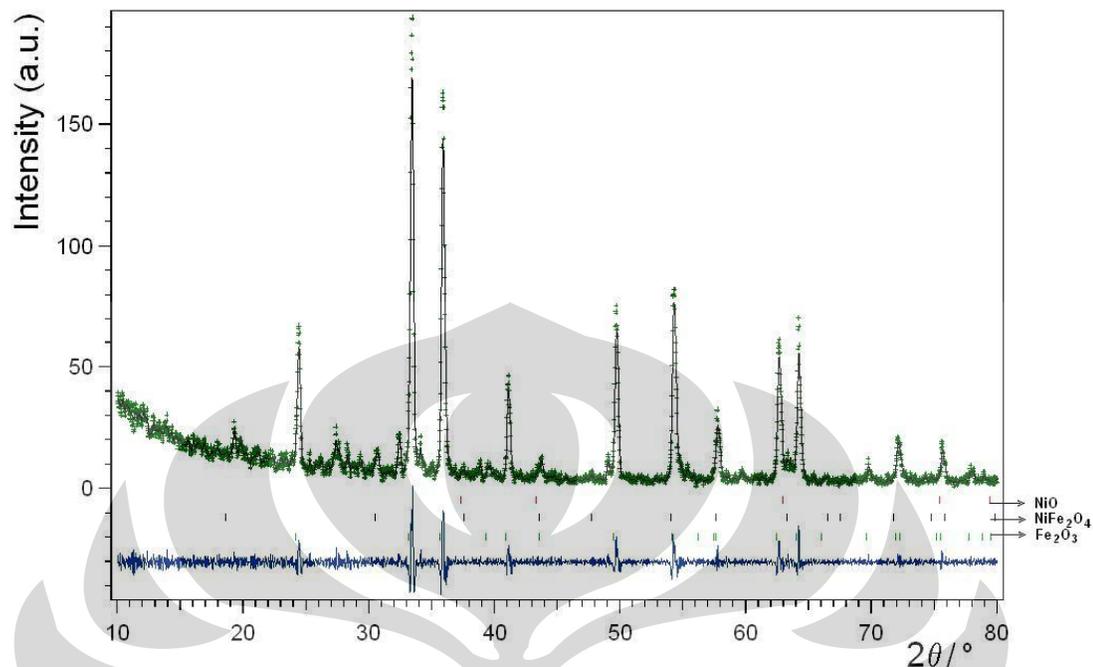


Gambar 4.5 Pengamatan visual pada *mixing chamber* sisi kanan lokasi ke-2

#### 4.2.2 Hasil Pengujian Komposisi Deposit



Gambar 4.6 Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 4.2 berupa senyawa NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Gambar 4.7 Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 4.2 berupa senyawa NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

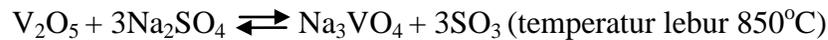
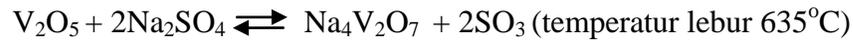
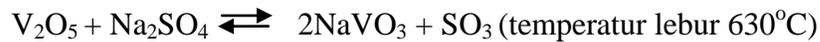
Berdasarkan hasil pengujian XRD diketahui bahwa produk-produk korosi yang terbentuk akibat material berada pada lingkungan temperatur tinggi adalah NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Jika kita sesuaikan dengan spesifikasi material yang ada maka tidak dimungkinkan senyawa oksida nikel tersebut terbentuk. Dengan material berbasis Fe maka produk NiO tidak bisa didapatkan dari material baja paduan molibdenum yang hanya mengandung nikel dalam jumlah kecil. Dan diperkirakan bahwa produk NiO ini merupakan hasil bentukan dari paduan yang terdapat pada pelapis atau penguat dari NiCrAlY. NiO ini adalah lapisan pertumbuhan oksida yang terletak dibawah lapisan keramik bagian dari *thermal barrier coating* yang terbentuk pada proses deposisi lapisan keramik atau *top coat* dilakukan. Lapisan NiO dapat terbentuk jika kandungan Al yang rendah di dalam lapisan pengikat atau *bond coat* [4]. NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> yang terdeteksi pada pengujian diketahui sebagai spinel-spinel yang terbentuk antara besi dengan oksida nikel [15]. Dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> merupakan hasil pembentukan dari material Fe yang teroksidasi.

Tabel 4.1 Hasil analisa kandungan unsur-unsur kimia pada bahan bakar turbin gas dengan metoda XRF

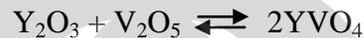
No.	Deposit	Fasa	Fraksi Massa (%)
1	<i>HSD Treated</i>	<i>Amorphus Sulfur Oxide (S<sub>8</sub>O)</i>	90,12
		<i>Chromoiium Oxide (CrO<sub>0,87</sub>)</i>	9,02
		<i>Iron (Fe)</i>	< 1
2	<i>HSD Untreated</i>	<i>Amorphus Sulfur Oxide (S<sub>8</sub>O)</i>	90,34
		<i>Chromoiium Oxide (CrO<sub>0,87</sub>)</i>	8,90
		<i>Iron (Fe)</i>	< 1

Dari hasil pengujian XRF pada bahan bakar yang tidak mengalami proses dan yang mengalami proses diketahui bahwa kandungan sulfur di dalam bahan bakar cukup tinggi yaitu 90,34 dan 90,12 dari dalam persen fraksi massa. Sulfur merupakan unsur yang sangat perlu diperhatikan keberadaannya di dalam bahan bakar. Sulfur jika bereaksi dengan logam alkali seperti natrium akan membentuk garam natrium sulfat. Ketika Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> terbentuk maka *hot corrosion* terjadi dengan sangat cepat. Keberadaan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> walaupun hanya beberapa ppm sudah cukup untuk menyebabkan kerusakan melalui mekanisme *hot corrosion* [1]. Dan dari adanya kehadiran sulfur dalam bahan bakar yang digunakan dapat menyebabkan terbentuknya SO<sub>3</sub> yang sangat aktif menyerang material penstabil lapisan pelindung dan dapat menyebabkan terjadinya korosi sumuran yang disertai sulfidasi.

Selain itu, berdasarkan data yang didapat melalui diskusi dengan ahli dan pembimbing di lapangan diketahui bahwa bahan bakar yang digunakan juga mengandung vanadium, natrium dan alkali lainnya. Pada proses pembakaran vanadium akan menghasilkan vanadium oksida berupa V<sub>2</sub>O<sub>4</sub> atau V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Oksida-oksida vanadium tersebut akan segera bereaksi dengan natrium sulfat membentuk natrium vanadat yang bersifat sangat asam dan aktif menyerang lapisan oksida melalui mekanisme *fluxing* [3].



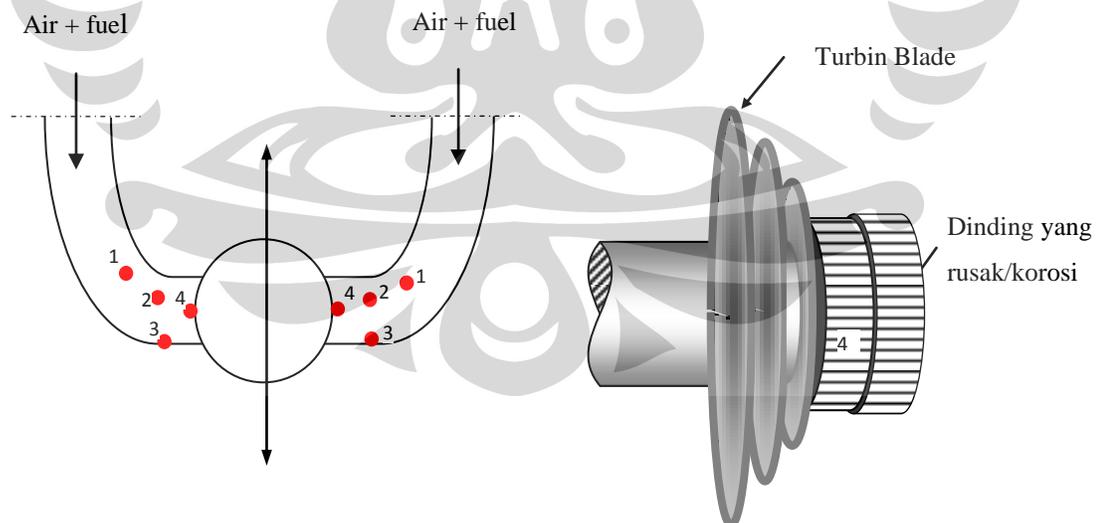
Vanadium oksida terbentuk dari pembakaran bahan bakar yang mengandung unsure V sedangkan natrium sulfat terbentuk akibat Na bereaksi dengan senyawa sulfur hasil pembakaran. Oksida vanadium hasil pembakaran akan bereaksi dengan penstabil pada lapisan *thermal barrier coating*. Reaksinya adalah sebagai berikut



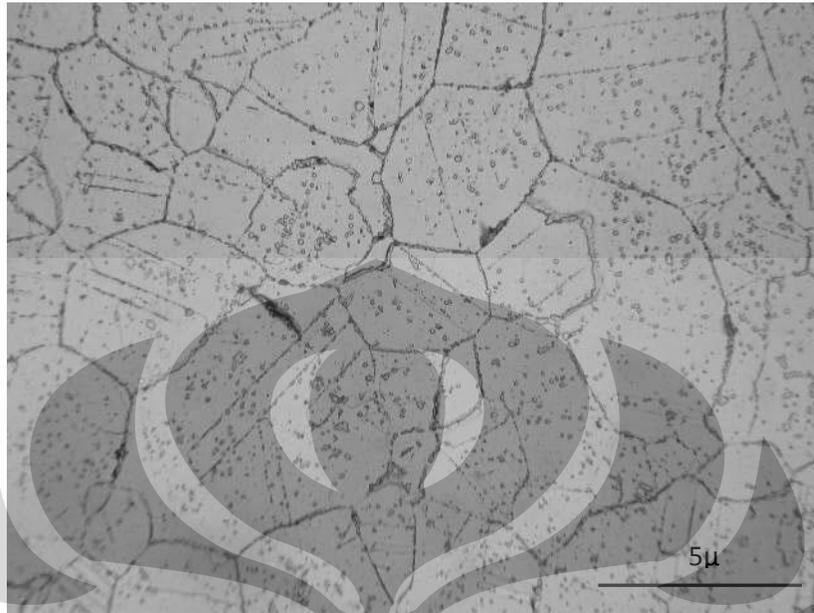
Vanadium oksida mampu menembus permukaan lapisan *top coat* dimana karakternya mempunyai pori 10 – 15%. Produk yang terbentuk itu menyebabkan berkurangnya kestabilan sehingga menyebabkan kerusakan *thermal barrier coating* terjadi dengan cepat secara siklus termal [3]. Mekanisme ini juga disebut dengan peristiwa korosi *selective leaching*.

#### 4.2.3 Hasil Pengujian Mikrostruktur

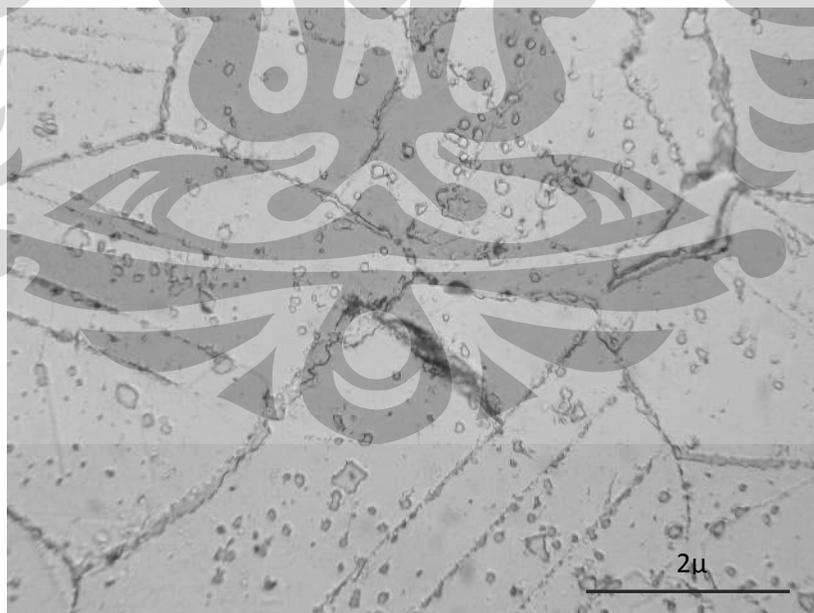
Pengujian mikrostruktur dilakukan pada daerah aliran fluida panas yang mengalami kegagalan akibat operasional dari turbin gas.



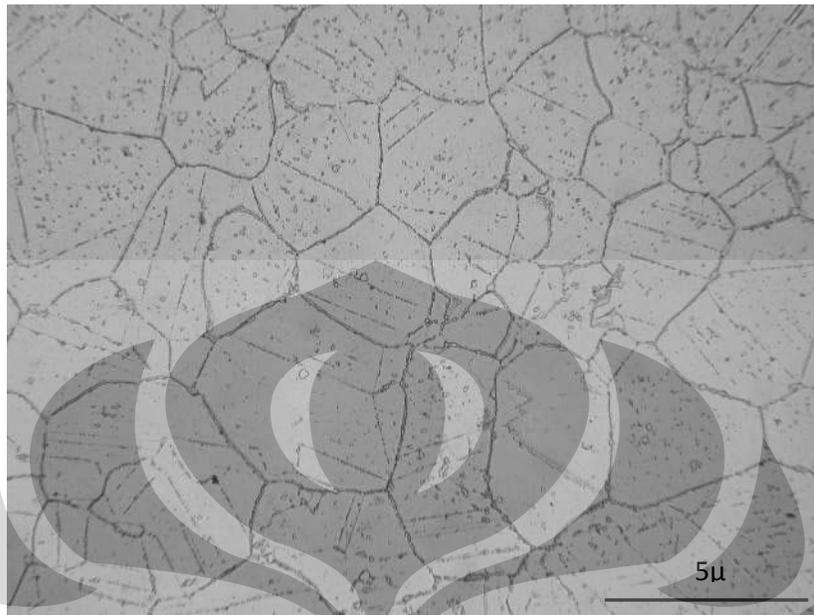
Gambar 4.8 Titik lokasi pengambilan sampel pada penampang dari turbin gas.



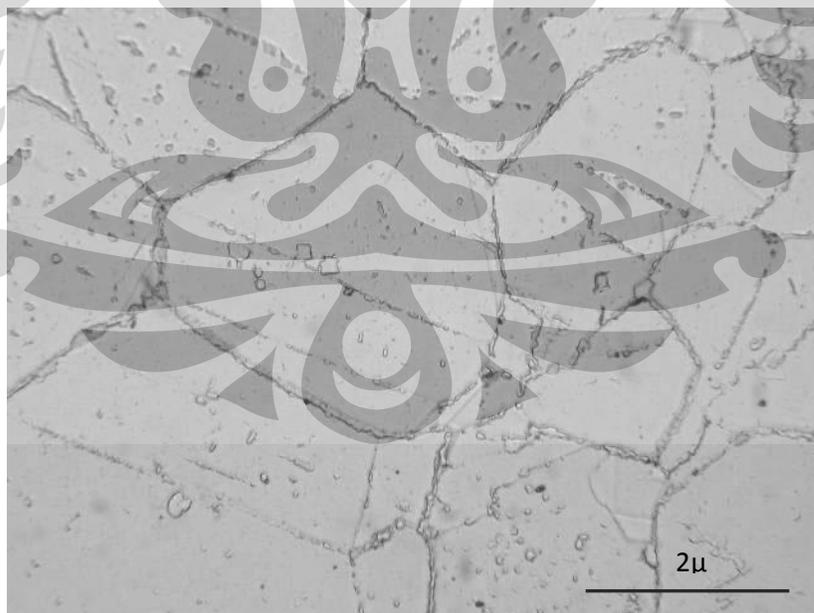
Gambar 4.9 Struktur mikro dari *mixing chamber* sisi kiri lokasi ke-1 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 200 kali.



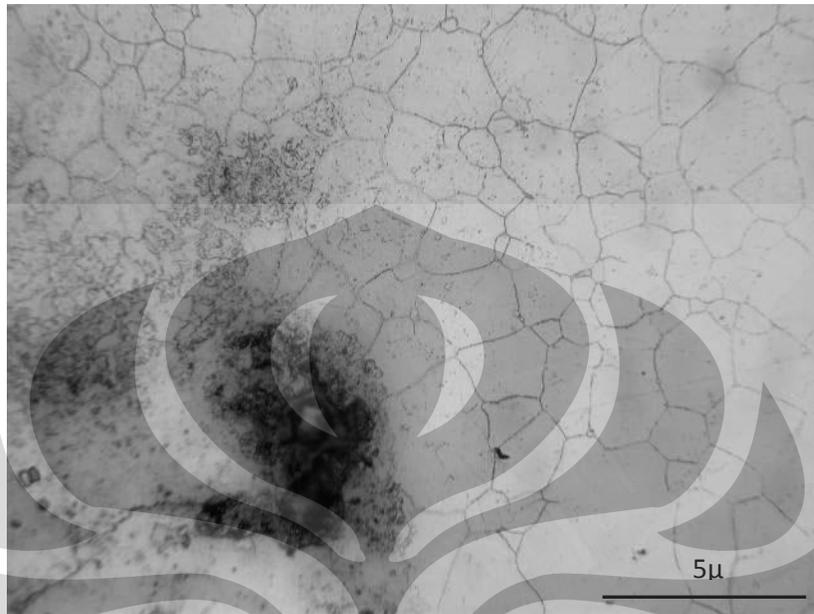
Gambar 4.10 Struktur mikro dari *mixing chamber* sisi kiri lokasi 1 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 500 kali.



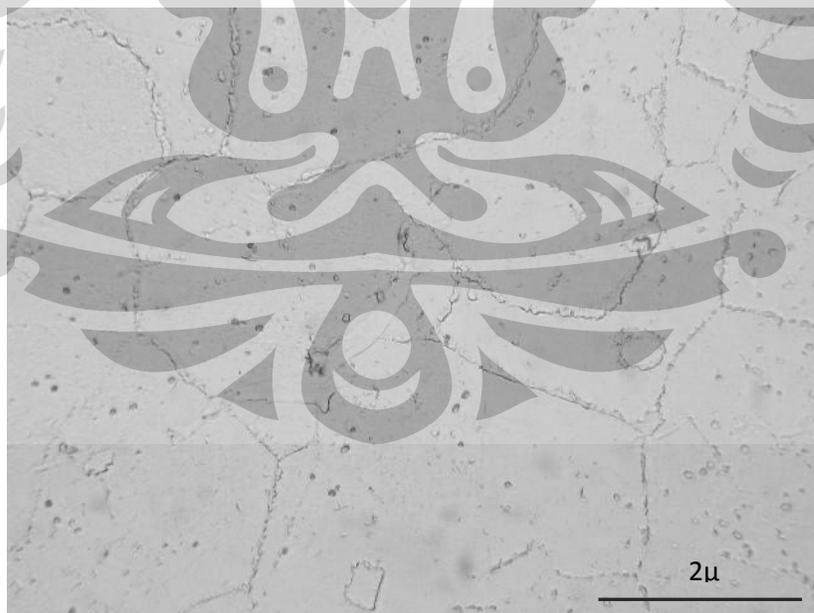
Gambar 4.11 Struktur mikro dari *mixing chamber* sisi kiri lokasi 2 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 200 kali.



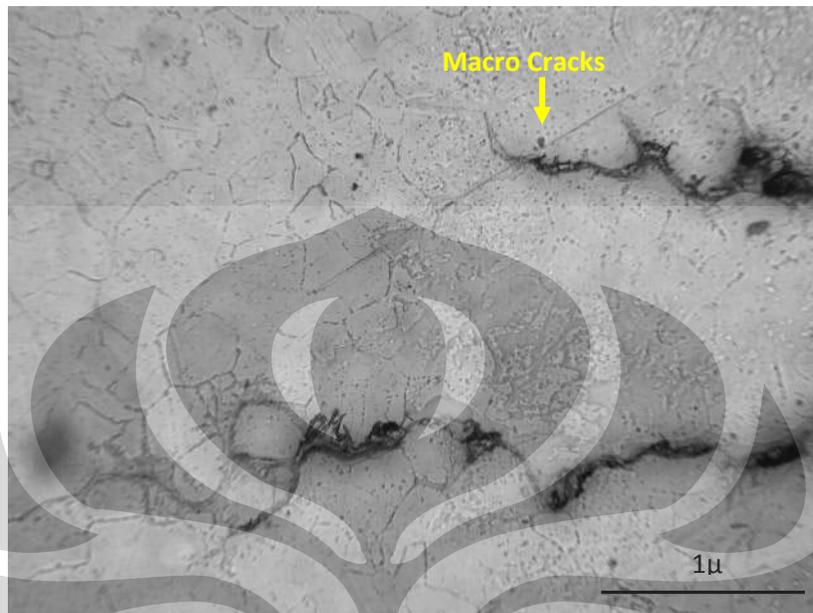
Gambar 4.12 Struktur mikro dari *mixing chamber* sisi kiri lokasi 2 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 500 kali.



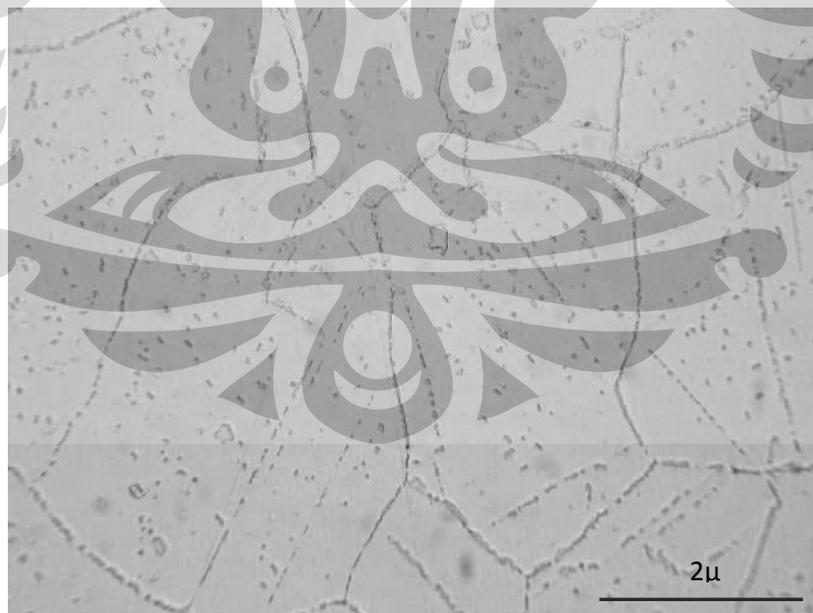
Gambar 4.13 Struktur mikro dari *mixing chamber* sisi kanan lokasi 1 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 200 kali.



Gambar 4.14 Struktur mikro dari *mixing chamber* sisi kanan lokasi 1 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 500 kali.



Gambar 4.15 Struktur mikro dari *mixing chamber* sisi kanan lokasi 2 dengan etsa aqua regia pada perbesaran 100 kali.



Gambar 4.16 Struktur mikro dari *mixing chamber* sisi kanan lokasi 2 pada daerah normal dengan etsa aqua regia dan pada perbesaran 500 kali.

Dari struktur mikro terlihat bahwa material yang digunakan merupakan material dengan fasa austenit. Jika dibandingkan dengan gambar 4.1 yang merupakan material awal maka material hasil pengujian ini tidak sama. Semakin menguatkan bahwa berdasarkan hasil uji deposit maka material tersebut teruji pada permukaan pelapisnya dimana oksida nikel yang ada terbentuk dari elemen Ni dalam NiCrAlY yang telah terekspos pada lingkungan temperatur tinggi.

#### 4.2.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Tabel 4.2 Hasil pengujian kekerasan pada material *mixing chamber*

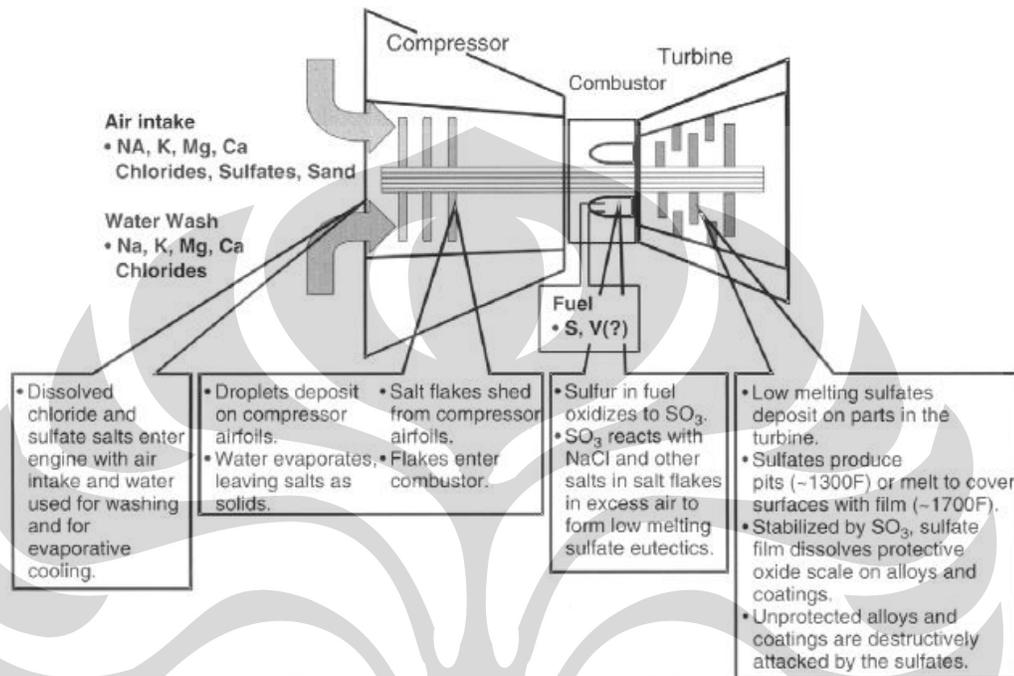
No.	Lokasi	Kekerasan (HV)
1	<i>Mixing chamber</i> (lokasi 1) sisi kiri	137, 137, 135
2	<i>Mixing chamber</i> (lokasi 2) sisi kiri	145, 143, 142,
3	<i>Mixing chamber</i> (lokasi 1) sisi kanan	152, 156, 153
4	<i>Mixing chamber</i> (lokasi 2) sisi kanan	143, 140, 137

Dari data hasil pengujian kekerasan mikrostruktur pada material 16Mo3 didapatkan nilai kekerasan rata-ratanya adalah 136,33 dan 143,33 untuk bagian *mixing chamber* sisi kiri lokasi ke-1 dan lokasi ke-2; 153,67 dan 140,00 untuk bagian *mixing chamber* sisi kanan lokasi ke-1 dan lokasi ke-2. [12]

Material 16Mo3 atau 17Mn4 mempunyai nilai kekuatan tarik berada pada rentang 440 – 590 MPa. Jika data kekerasan hasil uji di atas dilakukan konversi menjadi kekuatan tarik maka nilai yang didapat berada pada rentang 1337 MPa untuk 136,33 HV dan 1507 MPa untuk 153,67 HV.

### 4.3 Analisa Penyebab Kegagalan Material *Mixing chamber*

Berdasarkan kebanyakan kasus kegagalan yang telah terjadi pada turbin persoalan yang sering terjadi adalah seperti terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.17 Skema proses terjadinya hot corrosion pada mesin turbin gas<sup>[4]</sup>.

Dari data dan pembahasan maka dapat dikatakan bahwa kerusakan utama material *mixing chamber* disebabkan oleh *hot corrosion* dan sulfidisasi. Hal ini dapat diketahui dari adanya kerusakan akibat korosi sumuran dan sulfidisasi yang terlihat baik pada foto makro atau pengamatan visual dan dari pengamatan mikrostrukturnya.

Proses terjadinya sulfidisasi ini diawali dari reaksi pembakaran pada combustion chamber dengan bahan bakar yang mengandung sulfur, vanadium, dan logam alkali seperti natrium dan kalium<sup>[7]</sup>.



dimana nilai x dan y tergantung dari jenis bahan bakar dan nitrogen diasumsikan bersifat inert. Akibat reaksi di atas maka nitrogen dapat mengalami oksidasi dan

membentuk berbagai produk nitrogen oksida. Selain itu produk pembakaran lainnya yang tidak diinginkan adalah sulfur dioksida yang berasal dari kontaminasi dalam bahan bakar yang digunakan. Sulfur akan bereaksi dengan natrium membentuk garam natrium sulfat dalam pembakaran. Lelehan garam natrium sulfat serta vanadium pentaoksida yang terbentuk akan merusak kestabilan dari paduan penstabil pada *thermal barrier coating*. Selanjutnya kerusakan retakan pada lapisan keramik akibat terjadi siklus termal yang menyebabkan adanya tegangan termal antara lapisan atas *top coat* dengan lapisan ikatan *bond coat* maupun antara *bond coat* dengan material dasar. Proses tersebut kemudian diikuti dengan terjadinya kerontokan lapisan pelindung. Setelah terjadi kerusakan lapisan keramik maka otomatis lapisan thermal grown oxide dari NiO mengalami sulidasi dari  $\text{SO}_3$  atau  $\text{SO}_2$  dan kerusakan lapisan pengikat. Setelah semua lapisan mengalami kerusakan, mengingat material dasar *mixing chamber* hanya mampu bertahan pada temperatur antara  $500 - 600^\circ\text{C}$  maka kerusakan retak-retak banyak terbentuk.

Jadi kerusakan utama diakibatkan oleh terjadinya kerusakan lapisan pelindung *thermal barrier coating* akibat reaksi dari produk pembakaran yang mengandung vanadium oksida dan natrium sulfat sehingga menyebabkan lapisan tersebut mengalami kerusakan.

## Bab 5

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari studi yang telah dilakukan, analisa kegagalan prematur pada material *mixing chamber* turbin gas dilakukan dengan studi korosi temperatur tinggi. Pendekatan dilakukan berdasarkan unsur – unsur yang dapat menyebabkan inisiasi pada korosi temperatur tinggi. Evaluasi dilakukan dengan meninjau bahan bakar, material dasar dan material pelindung, serta proses dan operasional dari turbin gas.

Bahan bakar solar yang digunakan pada mesin turbin gas terdapat senyawa sulfur, alkali dan vanadium yang merupakan sebagai unsur bersifat korosif. Unsur – unsur ini akan bereaksi setelah pembakaran terjadi pada *combustion chamber* yang akan menghasilkan udara panas untuk menggerakkan turbin.

Material dasar yang berupa *alloy steel molybdenum* hanya mampu digunakan hingga temperatur 500 - 550°C namun jika diberi perlindungan TBC mampu hingga 600 - 650°C. Mekanisme kegagalan diawali oleh terbentuknya senyawa vanadium oksida yang mampu mengikat titanium oksida pada TBC. Karakter pada TBC yang mengandung porositas 10 – 15% dapat menyebabkan senyawa vanadium oksida penetrasi dan merusak kestabilan. Kemudian korosi sumuran pada *mixing chamber* disebabkan oleh adanya sulfur oksida berupa  $SO_3$ .

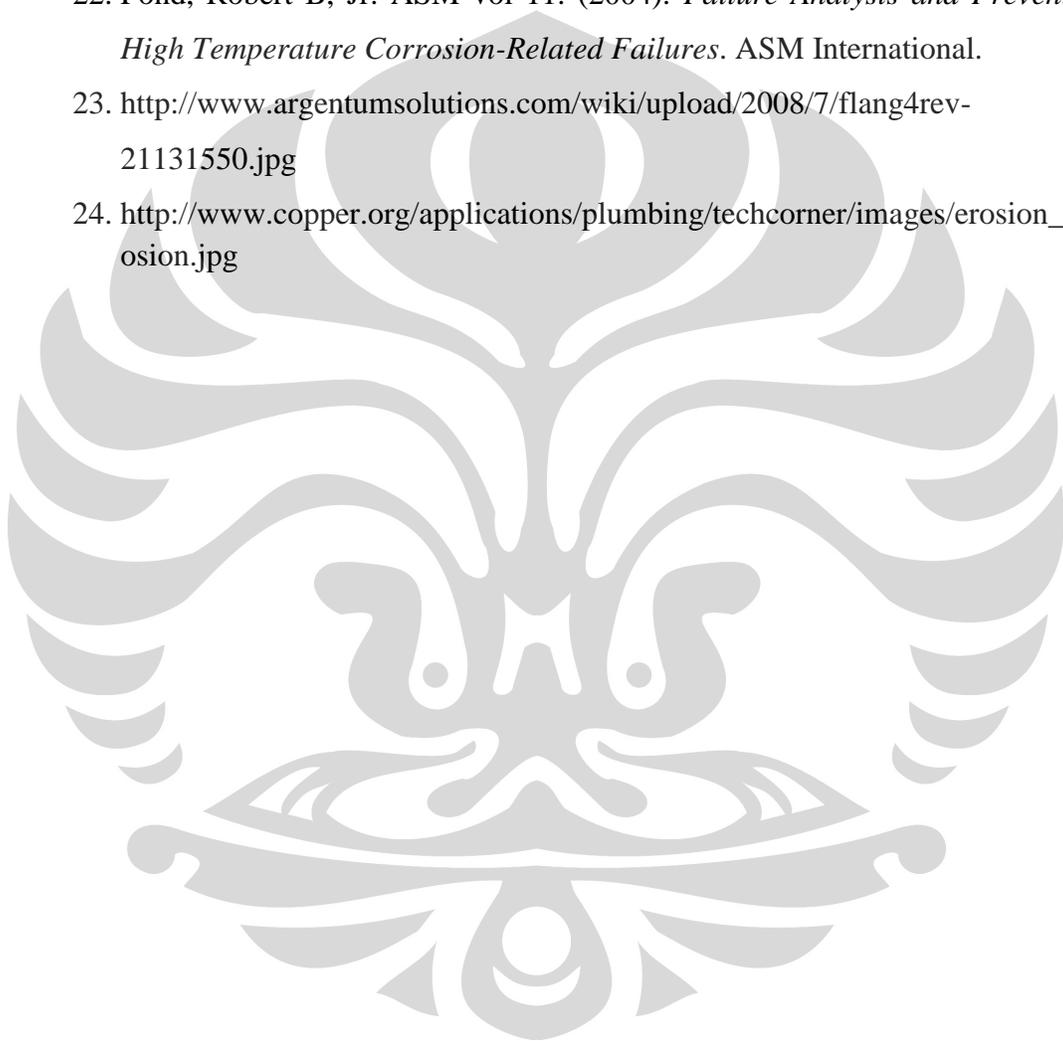
Operasional dari turbin gas atau *start - stop* dapat memberikan pengaruh *thermal shock* pada lapisan pelindung. Lapisan pelindung yang telah rusak kestabilannya akan mengalami *spalling* akibat jumlah *start – stop*.

Untuk menjaga proses korosi temperatur tinggi pada turbin gas, maka bisa dilakukan proses seleksi material dan mereduksi pengotor pada bahan bahan bakar yang digunakan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Meherwan, P. Boyce, *Gas Turbine Engineering Handbook* (3<sup>rd</sup> ed.). Houston: Gulf Professional Publishing.
2. Bordenet, B.M.E., *Dissertation: High Temperature Corrosion in Gas Turbin Thermodynamic Modelling and Experimental Results*, Technischen Hochschule Aachen. (2004).
3. Hansen, D.A., Puyear, R.B. (1996). *Materials Selection for Hydrocarbon and Chemical Plants*. CRC Press: Taylor and Francis Grup.
4. Bose, S. (2007). *High Temperature Coatings*. Connecticut: Elsevier Science & Technology Books.
5. Schweitzer, P.A. (2006). *Paint and Coatings: Applications and Corrosion Resistance*. CRC Press: Taylor and Francis Grup.
6. Moran, J.M., Saphiro, H.N., *Engineering Thermodynamics*, terjemahan Nugroho, Y.S., Surjosatyo, A., Erlangga (2004).
7. [http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil\\_fuel\\_power\\_plant](http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil_fuel_power_plant)
8. <http://www.ndt.net/article/mendt2007/papers/bafna.pdf>
9. <http://www.oakleysteel.co.uk/16mo3.htm>
10. [http://wb7.itrademarket.com/pdimage/96/1140096\\_image002.jpg](http://wb7.itrademarket.com/pdimage/96/1140096_image002.jpg)
11. <http://www.paclink.com.cn/pdf/65.pdf>
12. <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/hvconv.htm>
13. <http://www.engineershandbook.com/Tables/hardness.htm>
14. <http://www.emeraldinsight.com/fig/1280490204016.png>
15. [http://www3.interscience.wiley.com/journal/119314660/abstract?CRETRY=1  
&SRETRY=0](http://www3.interscience.wiley.com/journal/119314660/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0)
16. [http://www.iaea.or.at/NuclearPower/Downloads/PLIM/2008-Dec-RWS-  
Argentina/R&D\\_on\\_FlowAcceleratedCorrosion\\_EAC\\_Fatigue.pdf](http://www.iaea.or.at/NuclearPower/Downloads/PLIM/2008-Dec-RWS-Argentina/R&D_on_FlowAcceleratedCorrosion_EAC_Fatigue.pdf)
17. Pierre Roberge. (2008). *Corrosion Engineering Principle and Practice*. McGraw Hill.

18. <http://www.corrosion-club.com/images/corrosioncell.gif>
19. <http://corrosion-doctors.org/Forms-SCC/scc.htm>
20. <http://en.wikipedia.org/wiki/Corrosion>
21. [http://www.corrosionclinic.com/types\\_of\\_corrosion/dealloying\\_selective\\_leaching\\_graphitic\\_corrosion.htm](http://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/dealloying_selective_leaching_graphitic_corrosion.htm)
22. Pond, Robert B, Jr. ASM vol 11. (2004). *Failure Analysis and Prevention: High Temperature Corrosion-Related Failures*. ASM International.
23. <http://www.argentumsolutions.com/wiki/upload/2008/7/flang4rev-21131550.jpg>
24. [http://www.copper.org/applications/plumbing/techcorner/images/erosion\\_corrosion.jpg](http://www.copper.org/applications/plumbing/techcorner/images/erosion_corrosion.jpg)



LAMPIRAN 1. Spesifikasi Material

Spesifikasi Turbinenanlage <i>Specification Turbine Plant</i>		QST - GT V 94.2	Revision: 09	Blatt: 25 / 28 Page:
siehe Deckblatt see cover page		GT-Nr.: GT-No.:	800 486	
Qualitätsprüfblatt Quality Test Sheet		Q - Blatt Nr.: Q - Sheet No.:	GT.00.002.41	
Brennkammer Combustion chamber Bleche Plates		Werkstoff: Material:	16Mo3 / 17Mn4	
intern dokumentierte Prüfung internal documented examination				Prüfung durchgeführt durch Examination performed by SIEMENS PG
Stichprobe Spot check				Eingangskontrolle ng inspection
Nachweis der Prüfung auf Arbeitsplan Performance of test confirmed of route chart				Fertigungskontrolle ess inspection
Teilnahme SPG beim Lieferanten Participation SPG at supplier				Werkstatteinrichtung nly in factory
				Dokumentation für Kunden umentation for customer

### Mechanical Properties:

	16Mo3
Tensile Strength (MPa)	440 – 590
Yield Strength (MPa)	220 – 275
Elongation in 100 - 150mm (%)	19
Elongation in 16mm (%)	24
Max Thickness (mm)	250

### Chemical Properties:

	Composition (%)
Carbon (C) (Max)	0.12 – 0.2
Manganese (Mn)	0.4 – 0.9
Silicon (Si)	0.35
Phosphorous (P)	0.025
Sulphur (S)	0.01
Chromium (Cr)	0.3
Molybdenum	0.25 – 0.35
Nickel (Ni)	0.3
Copper (Cu)	0.3
Nitrogen (N)	0.0120

16Mo3 Steel for is used for boilers and pressure vessels with elevated temperatures according to EN 10028–2 (2003). It is equivalent to 15Mo3 (DIN 17155 – Germany), 15D3 (NFA 36–205 – France), BS1501–243b (BS1501 – UK) and ASTM 204 Gr.B. Oakley Steel stocks 16Mo3 – ASTM 204 B – in lengths of 4000mm, 6000mm, 8000mm and 12000mm. Widths are either 2000mm or 3000mm and thicknesses are from 2mm to 250mm.

<http://www.oakleysteel.co.uk/16mo3.htm>

## DIN 17155 - EN 10083 : Heat-Resistant Plates

Grade	Chemical Composition (ladle analysis) %													Mechanical Properties				
	C	Si	Mn	P max	S max	Al <sub>total</sub>	Cr	Cu max	Mo	Nb max	Ni max	Ti max	V max	Upper Yield Stress (transv.)				
														thickness t (mm)				N/mm <sup>2</sup>
														16<t t <sub>0</sub> 16	40<t t <sub>0</sub> 40	60<t t <sub>0</sub> 60	100<t t <sub>0</sub> 100	
H11	≤ 0.20	≤ 0.35	0.50 - 1.30	0.035	0.030	≥ 0.02	≤ 0.25	0.30	≤ 0.10	0.01	0.30	0.03	0.03	265	255	245	215	200
17 Mn 4	0.14 - 0.20	≤ 0.40	0.90 - 1.40	0.035	0.030	≥ 0.02	≤ 0.25	0.30	≤ 0.10	0.01	0.30	0.03	0.03	290	265	280	255	230
15 Mo 3	0.12 - 0.20	0.10 - 0.35	0.40 - 0.90	0.035	0.030	≥ 0.02	≤ 0.25	0.30	0.25 - 0.35	-	0.30	-	-	275 <sup>4)</sup>	270	260	240	220
13 CrMo 4.4	0.06 - 0.18	0.10 - 0.35	0.40 - 1.00	0.035	0.030	≥ 0.02	0.70 - 1.10	0.30 - 0.60	0.40	-	-	-	-	300	295	295	275	255
16 CrMo 9 10	0.06 - 0.15	≤ 0.50	0.40 - 0.70	0.035	0.030	≥ 0.02	2.00 - 2.50	0.3 - 1.10	0.90	-	-	-	-	310	300	290	270	250
AS141	< 0.20	< 0.35	≥ 0.45	0.045	0.045	-	≤ 0.3	-	-	-	-	-	-	265	255	245	215	200

## Notes:

- 1) Proof of compliance with these limit values required only if specially agreed
- 2) The total mass content of Cr, Cu, Mo and Ni must not exceed 0.70%
- 3) The Al content of the melt is to be determined and stated in the certificate.
- 4) Thickness ≤ 10mm is subject to a minimum value of 285 N/mm<sup>2</sup>
- 5) Hot tensile test at 300°C, per melt



Designation: A 204/A 204M – 03

## Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, Molybdenum<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation A 204/A 204M, the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

### 1. Scope\*

1.1 This specification<sup>2</sup> covers molybdenum-alloy steel plates, intended particularly for welded boilers and other pressure vessels.

1.2 Plates under this specification are available in three grades having different strength levels as follows:

Grade	Tensile Strength, ksi [MPa]
A	65–85 [450–585]
B	70–90 [485–620]
C	75–95 [515–655]

1.3 The maximum thickness of plates is limited only by the capacity of the composition to meet the specified mechanical property requirements; however, current practice normally limits the maximum thickness of plates furnished under this specification as follows:

Grade	Maximum Thickness, in. [mm]
A	6 [150]
B	6 [150]
C	4 [100]

1.4 The values stated in either inch-pound units or SI units are to be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with this specification.

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

A 20/A 20M Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels<sup>3</sup>

<sup>1</sup> This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee A01 on Steel, Stainless Steel, and Related Alloys and is the direct responsibility of Subcommittee A01.11 on Steel Plates for Boilers and Pressure Vessels.

Current edition approved Sept. 10, 2003. Published October 2003. Originally approved in 1937. Last previous edition approved in 1999 as A204/A 204M–93 (1999).

<sup>2</sup> For ASME Boiler and Pressure Vessel Code applications, see related Specification SA-204/SA 204M in Section II of that Code.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01.04.

A 435/A 435M Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Steel Plates<sup>3</sup>

A 577/A 577M Specification for Ultrasonic Angle-Beam Examination of Steel Plates<sup>3</sup>

A 578/A 578M Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Plain and Clad Steel Plates for Special Applications<sup>3</sup>

### 3. General Requirements and Ordering Information

3.1 Plates supplied to this product specification shall conform to Specification A 20/A 20M, which outlines the testing and retesting methods and procedures, permissible variations in dimensions and mass, quality and repair of defects, marking, loading, etc.

3.2 Specification A 20/A 20M also establishes the rules for ordering information that should be complied with when purchasing plates to this specification.

3.3 In addition to the basic requirements of this specification, certain supplementary requirements are available where additional control, testing, or examination is required to meet end use requirements.

3.4 The purchaser is referred to the listed supplementary requirements in this specification and to the detailed requirements in Specification A 20/A 20M.

3.5 Coils are excluded from qualification to this specification until they are processed into finished plates. Plates produced from coil means plates that have been cut to individual lengths from coil. The processor directly controls, or is responsible for, the operations involved in the processing of coils into finished plates. Such operations include decoiling, leveling, cutting to length, testing, inspection, conditioning, heat treatment (if applicable), packaging, marking, loading for shipment, and certification.

NOTE 1—For plates produced from coil and furnished without heat treatment or with stress relieving only, three test results are reported for each qualifying coil. Additional requirements regarding plates from coil are described in Specification A 20/A 20M.

3.6 If the requirements of this specification are in conflict with the requirements of Specification A 20/A 20M, the requirements of this specification shall prevail.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

 A 204/A 204M – 03

#### 4. Materials and Manufacture

4.1 *Steelmaking Practice*—The steel shall be killed.

#### 5. Heat Treatment

5.1 Plates 1½ in. [40 mm] and under in thickness are normally supplied in the as-rolled condition. The plates may be ordered normalized or stress relieved or both.

5.2 Plates over 1½ in. [40 mm] in thickness shall be normalized.

#### 6. Chemical Requirements

6.1 The steel shall conform to the chemical requirements given in Table 1 unless otherwise modified in accordance with Supplementary Requirement S17, Vacuum Carbon-Deoxidized Steel, in Specification A 20/A 20M.

#### 7. Mechanical Requirements

7.1 *Tension Test Requirements*—The plates, as represented by the tension-test specimens, shall conform to the requirements given in Table 2.

TABLE 1 Chemical Requirements

Element	Composition, %		
	Grade A	Grade B	Grade C
Carbon, max <sup>a</sup> :			
Up to 1 in. [25 mm] incl. in thickness	0.18	0.20	0.23
Over 1 in. to 2 in. [50 mm] incl. in thickness	0.21	0.23	0.26
Over 2 in. to 4 in. [100 mm] incl. in thickness	0.23	0.25	0.28
Over 4 in. [100 mm] in thickness	0.25	0.27	0.28
Manganese, max:			
Heat analysis	0.90	0.90	0.90
Product analysis	0.98	0.98	0.98
Phosphorous, max <sup>a</sup>	0.035	0.035	0.035
Sulfur, max <sup>a</sup>	0.035	0.035	0.035
Silicon:			
Heat analysis	0.15–0.40	0.15–0.40	0.15–0.40
Product analysis	0.13–0.45	0.13–0.45	0.13–0.45
Molybdenum:			
Heat analysis	0.45–0.60	0.45–0.60	0.45–0.60
Product analysis	0.41–0.64	0.41–0.64	0.41–0.64

<sup>a</sup> Applies to both heat and product analyses.

TABLE 2 Tensile Requirements

	Grade A		Grade B		Grade C	
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]
Tensile strength	65–85	[450–585]	70–90	[485–620]	75–95	[515–655]
Yield strength, min <sup>a</sup>	37	[255]	40	[275]	43	[295]
Elongation in 8 in. [200 mm], min, % <sup>a</sup>	19		17		16	
Elongation in 2 in. [50 mm], min, % <sup>a</sup>	23		21		20	

<sup>a</sup> Determined by either the 0.2 % offset method or the 0.5 % extension-under-load method.

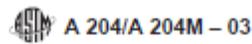
<sup>b</sup> See Specification A 20/A 20M for elongation adjustment.

#### SUPPLEMENTARY REQUIREMENTS

Supplementary requirements shall not apply unless specified in the purchase order.

A list of standardized supplementary requirements for use at the option of the purchaser is included in Specification A 20/A 20M. Those that are considered suitable for use with this specification are listed in this section by title.

- |  |  |
|--|--|
| S1. Vacuum Treatment,  | S8. Ultrasonic Examination in accordance with Specification A 435/A 435M,      |
| S2. Product Analysis,  | S9. Magnetic Particle Examination,   |
| S3. Simulated Post-Weld Heat Treatment of Mechanical Test Coupons, | S11. Ultrasonic Examination in accordance with Specification A 577/A 577M,     |
| S4.1 Additional Tension Test,                                      | S12. Ultrasonic Examination in accordance with Specification A 578/A 578M, and |
| S5. Charpy V-Notch Impact Test,                                    | S17. Vacuum Carbon-Deoxidized Steel.   |
| S6. Drop Weight Test,  |  |
| S7. High-Temperature Tension Test,                                 |  |



A 204/A 204M – 03

## SUMMARY OF CHANGES

Committee A01 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (A 204/A 204M – 93 (1999)) that may impact the use of this standard.

(1) Added 3.5 and Note 1 to be consistent with the terminology and requirements of Specification A 20/A 20M. (2) 3.3 was revised to be more general.

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*

## LAMPIRAN 2. Kalkulator Online Skala Vickers

**Calculator for Conversion between  
Vickers Hardness Number and SI Units MPa and GPa**

There is now a trend towards reporting Vickers hardness in SI units (MPa or GPa) particularly in academic papers. Unfortunately, this can cause confusion. Vickers hardness (e.g. HV/30) value should normally be expressed as a number only (without the units kgf/mm<sup>2</sup>). Rigorous application of SI is a problem. Most Vickers hardness testing machines use forces of 1, 2, 5, 10, 30, 50 and 100 kgf and tables for calculating HV. SI would involve reporting force in newtons (compare 700 HV/30 to HV/294 N = 6.87 GPa) which is practically meaningless and messy to engineers and technicians. To convert a Vickers hardness number the force applied needs converting from kgf to newtons and the area needs converting from mm<sup>2</sup> to m<sup>2</sup> to give results in pascals using the formula below.

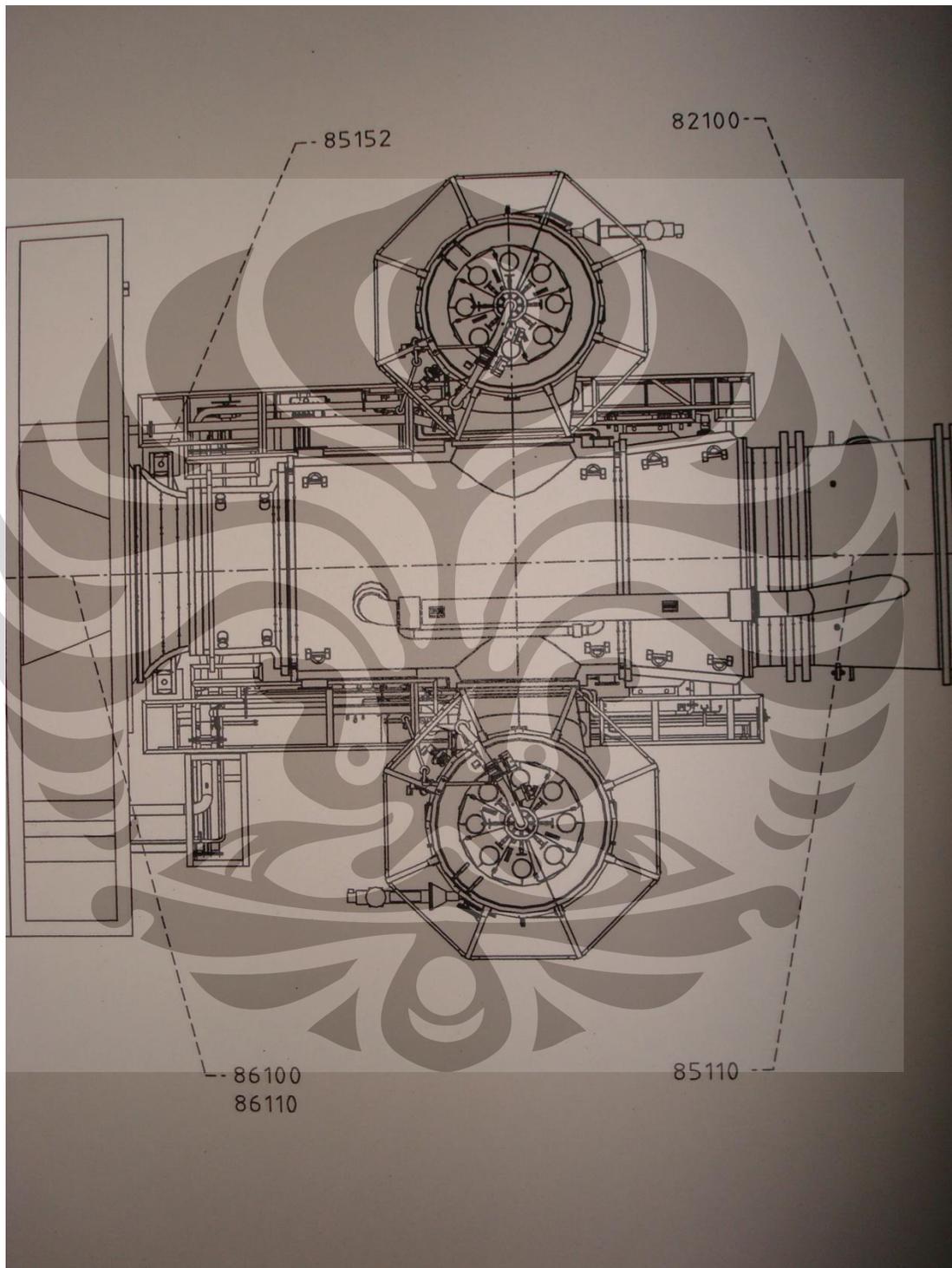
HV = Vickers hardness

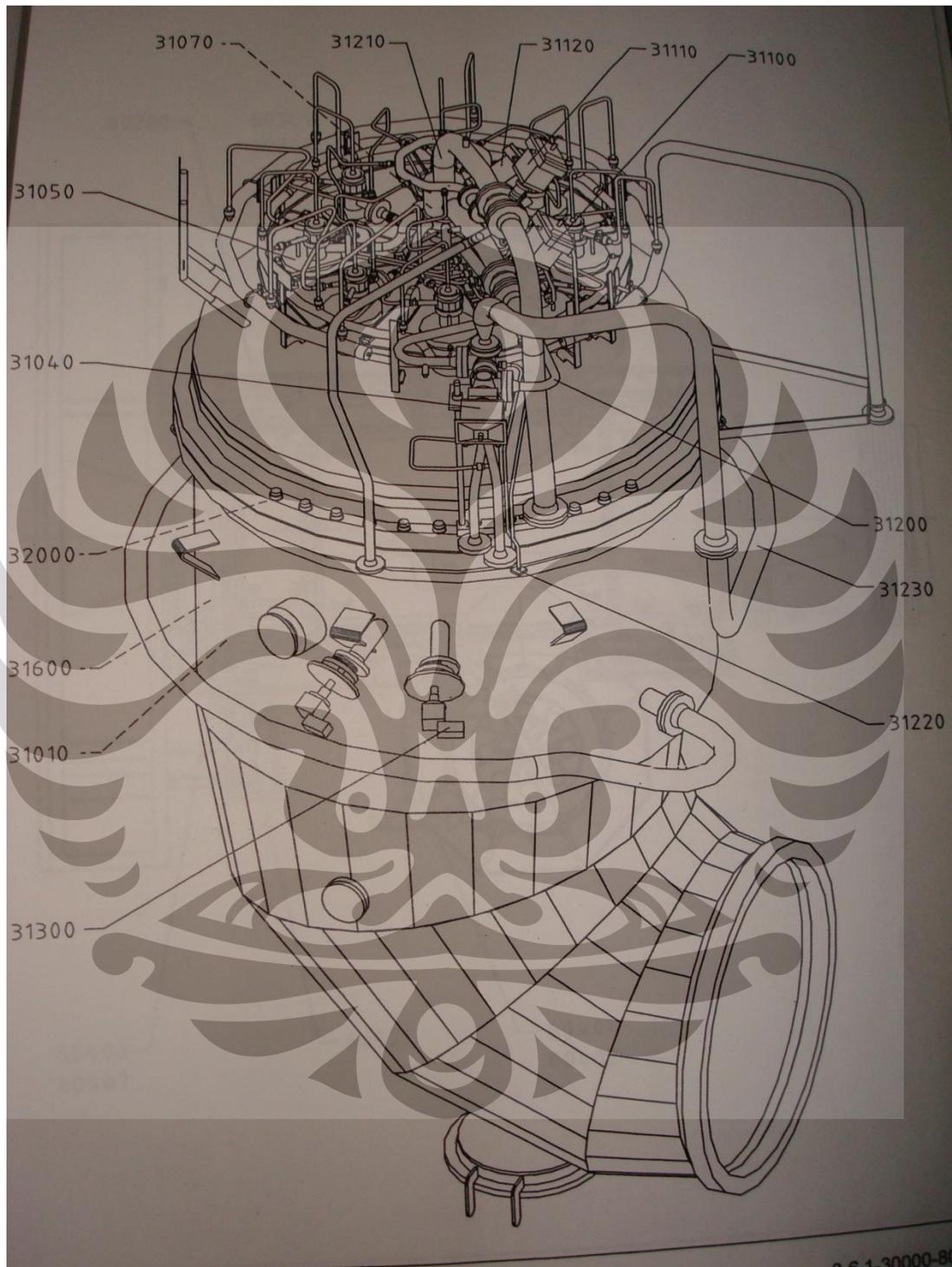
$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \text{ approximately}$$

To convert HV to MPa multiply by 9.807

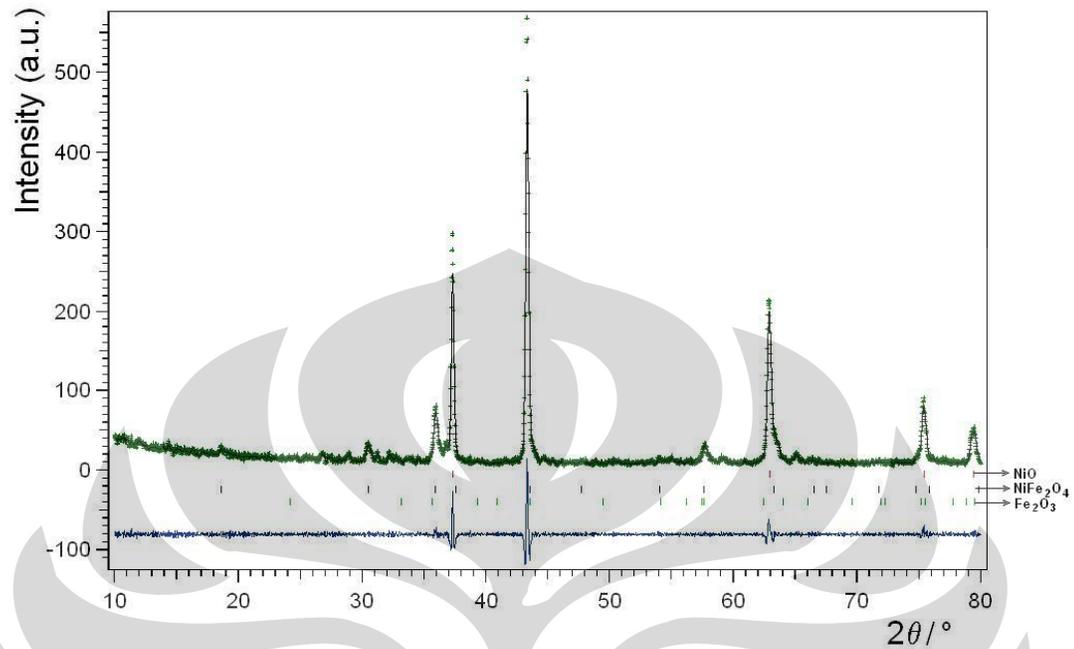
To convert HV to GPa multiply by 0.009807

## LAMPIRAN 3. Mesin Turbin Gas Tampak Atas

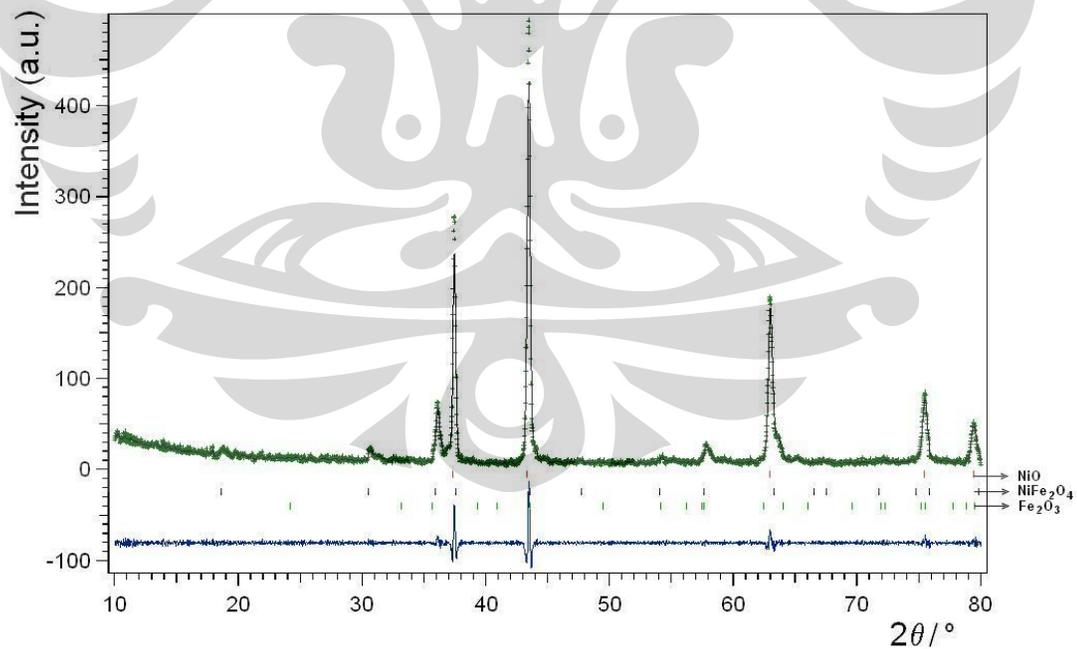


LAMPIRAN 4. Bagian *Combustion Chamber* Turbin Gas

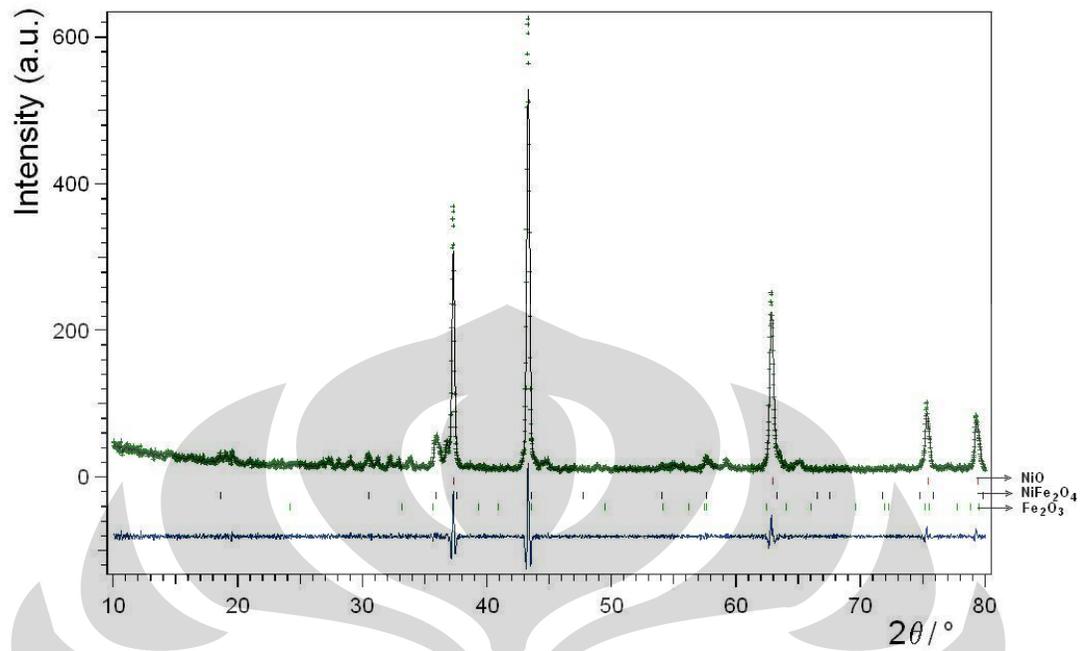
## LAMPIRAN 5. Data XRD Uji Deposit Turbin Gas



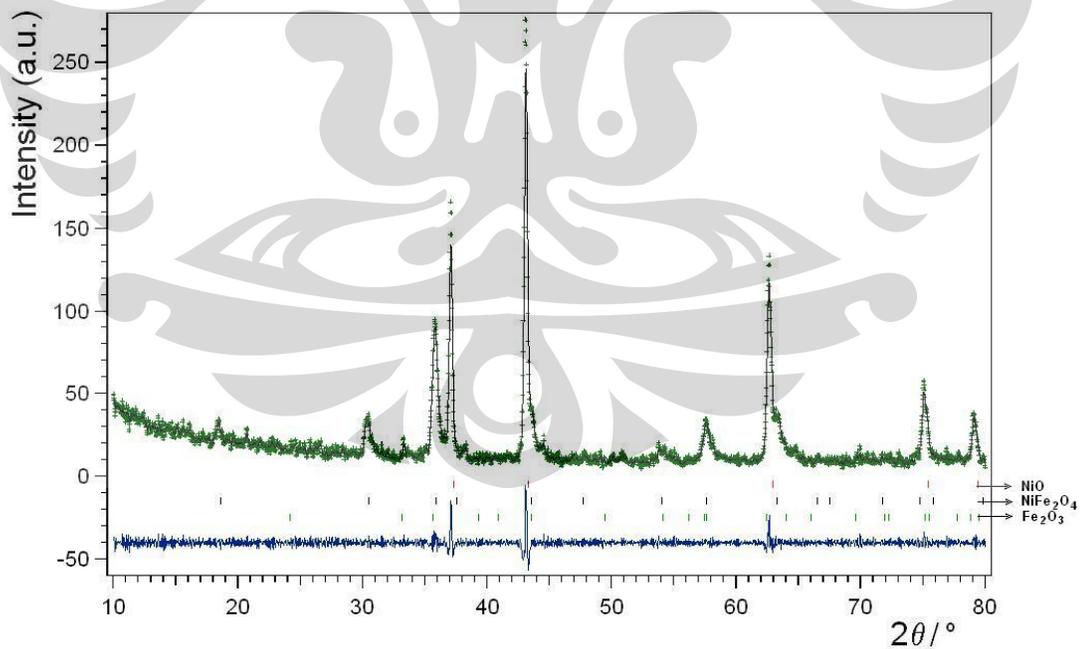
Grafik 1. Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 3.1 berupa senyawa NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



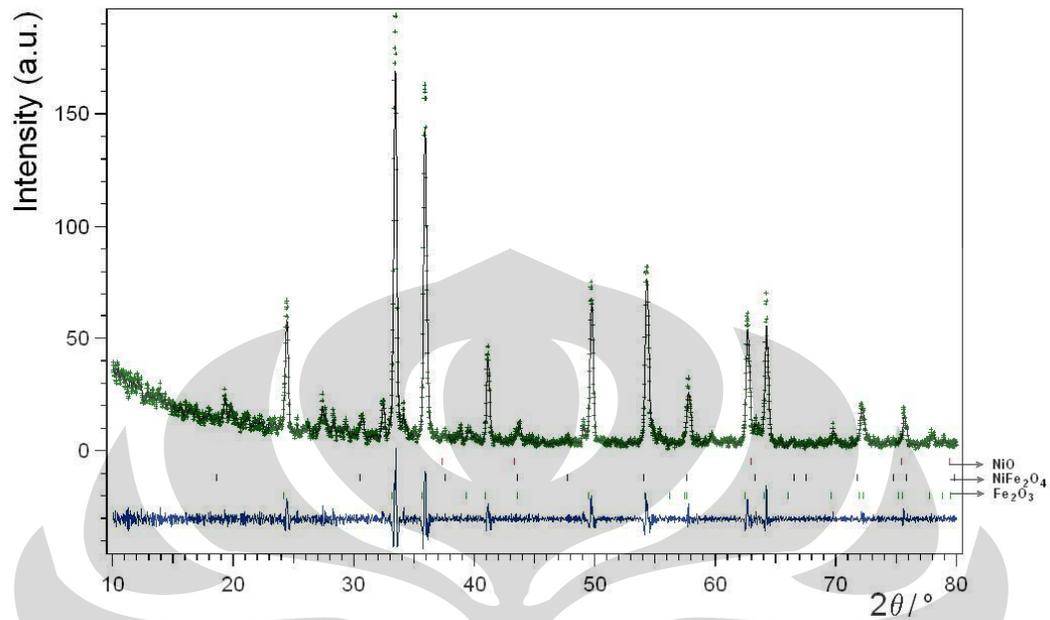
Grafik 2. Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT3.2 berupa senyawa NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



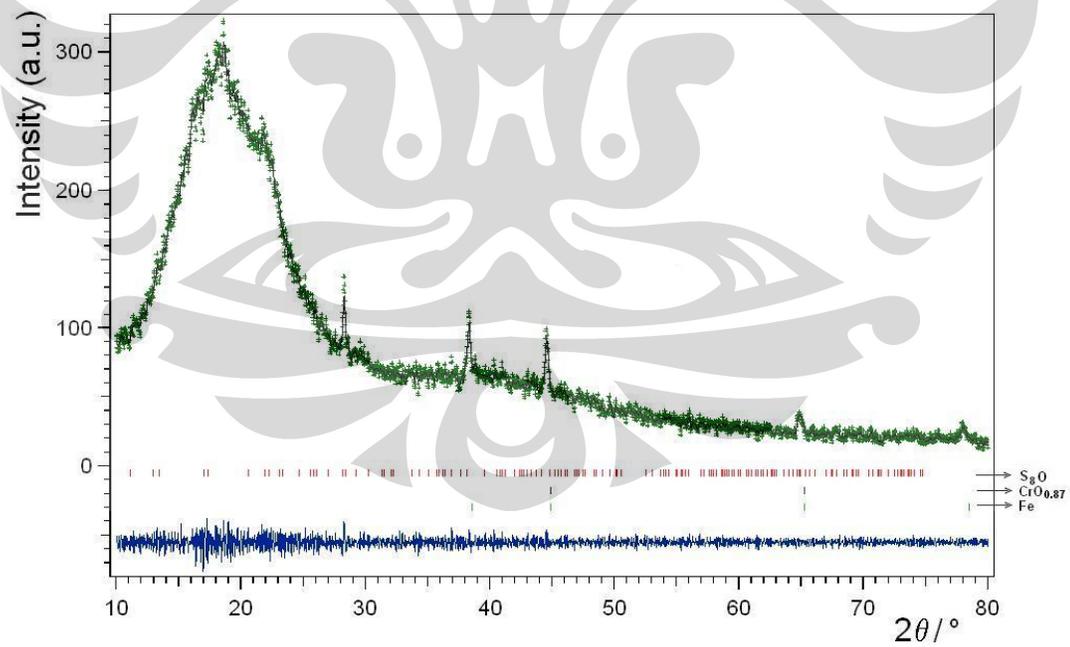
Grafik 3. Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 3.3 berupa senyawa NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Grafik 4. Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 4.2 berupa senyawa NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Grafik 5. Hasil pemeriksaan XRD pada deposit GT 4.2 berupa senyawa NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



Grafik 6. Hasil pemeriksaan XRD pada deposit bahan bakar treated berupa senyawa S<sub>8</sub>O CrO<sub>0,87</sub> dan Fe

## LAMPIRAN 6. Data Uji Bahan Bakar

## Hasil Analisa kandungan unsur kimia pada deposit dengan metoda XRF

No.	Deposit	Fasa	Fraksi Massa (%)
1	HSD Treated	Amorphus Sulfur Oxide (S <sub>8</sub> O)	90,12
		Chromioium Oxide (CrO <sub>0,87</sub> )	9,02
		Iron (Fe)	< 1
2	HSD Untreated	Amorphus Sulfur Oxide (S <sub>8</sub> O)	90,34
		Chromioium Oxide (CrO <sub>0,87</sub> )	8,90
		Iron (Fe)	< 1
3	GT 3.1	Nikel Oxide (NiO)	75,39
		Nikel Iron Oxide (NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	19,54
		Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,07
4	GT 3.2	Nikel Oxide (NiO)	76,08
		Nikel Iron Oxide (NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	16,39
		Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7,53
5	GT 3.3	Nikel Oxide (NiO)	79,48
		Nikel Iron Oxide (NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	12,52
		Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8,00
6.	GT 4.2	Nikel Oxide (NiO)	63,46
		Nikel Iron Oxide (NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	33,71
		Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,84
7.	GT 4.3	Nikel Oxide (NiO)	73,63
		Nikel Iron Oxide (NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	18,84
		Iron Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7,54