



**TUGAS AKHIR – TL184834**

**REVIEW : EVOLUSI STRUKTUR MIKRO DAN FASE INCONEL  
625 PADA OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI**

**YANNE INDRIATI  
NRP. 02511640000085**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.  
Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020**





## **TUGAS AKHIR – TL 184834**

### **REVIEW: EVOLUSI STRUKTUR MIKRO DAN FASE INCONEL 625 PADA OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI**

YANNE INDRIATI  
NRP. 02511640000085

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.  
Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT – TL 184834**

**REVIEW: MICROSTRUCTURE AND PHASE  
EVOLUTION OF INCONEL 625 AT HIGH  
TEMPERATURE OXIDATION**

YANNE INDRIATI  
NRP. 02511640000085

Supervisor  
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.  
Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020

*(This page is intentionally left blank)*

# **REVIEW: EVOLUSI STRUKTUR MIKRO DAN FASE INCONEL 625 PADA OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI**

## **TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**YANNE INDRIATI**  
NRP. 02511640000085

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.....(Pembimbing I)
2. Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.....(Pembimbing II)



**SURABAYA**  
**Juli 2020**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **REVIEW: EVOLUSI STRUKTUR MIKRO DAN FASE INCONEL 625 PADA OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI**

**Nama** : Yanne Indriati  
**NRP** : 02511640000085  
**Departemen** : Teknik Material dan Metalurgi  
**Pembimbing I** : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.  
**Pembimbing II** : Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T  
**Abstrak**

*Seiring dengan perkembangan zaman, perkembangan industri juga mengalami berbagai tantangan. Dalam bidang industri yang beroperasi pada temperatur tinggi, salah satu tantangannya adalah kemampuan material untuk menahan kerusakan maupun kegagalan akibat proses oksidasi yang terjadi pada temperatur tinggi. Inconel 625 merupakan superalloy berbasis nikel yang sering diaplikasikan pada temperatur tinggi. Pada paper review ini akan dipelajari mengenai pengaruh temperatur terhadap pertumbuhan struktur mikro dan fase yang terbentuk pada saat proses oksidasi, lapisan oksida yang terbentuk dan mengetahui temperatur operasional maksimum dari Inconel 625. Metode yang digunakan paper review ini yaitu komparasi dari beberapa jurnal yang membahas tentang oksidasi temperatur tinggi pada Inconel 625. Dalam paper review ini diketahui bahwa fase yang terbentuk saat proses oksidasi adalah  $\delta$ -Ni<sub>3</sub>Nb,  $\eta$ -M<sub>6</sub>C,  $\mu$ -TiN, dan MC. Sedangkan lapisan oksida yang terbentuk adalah kromia jenis spinel kaya Cr/Mn, spinel SiO<sub>2</sub>, dan Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.*

**Kata Kunci:** *Oksidasi Temperatur Tinggi, Inconel 625, Lapisan Oksida, Fasa.*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **REVIEW: MICROSTRUCTURE AND PHASE EVOLUTION OF INCONEL 625 AT HIGH TEMPERATURE OXIDATION**

**Student Name : Yanne Indriati**  
**NRP : 02511640000095**  
**Department : Material and Metallurgical Engineering**  
**Supervisor : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.**  
**Co-Supervisor : Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T**

## **Abstract**

*Along with the times, industrial development faces various challenges. In the industries that use high temperature, one of the challenges is the improve the ability of material from high temperature oxidation. Inconel 625 is nickel-base superalloy often used in high temperature application. This paper review will discuss about effect of temperature on microstructure growth, phase and oxide layer that formed during oxidation process, and knowing the maximum operating temperature from Inconel 625. Method used in this paper review is compared some journals that discuss high temperature oxidation at Inconel 625. The result in this paper review is phase that formed during oxidation process are  $\delta$ -Ni<sub>3</sub>Nb,  $\eta$ -M<sub>6</sub>C,  $\mu$ -TiN, dan MC. While the oxide layers formed are chromia spinel type rich Cr/Mn, SiO<sub>2</sub> spinel and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*

**Keywords: Oxidation, High Temperature, Inconel 625, Oxide Layer, Phase.**

*(This page is intentionally left blank)*

## **KATA PENGANTAR**

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas segala kehendak-Nya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir dengan baik dan tepat pada waktunya sebagai bentuk memenuhi salah satu syarat akademis untuk kelulusan program studi Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada beberapa pihak yang telah memberi dukungan dan bantuan dalam menyelesaikan Laporan Tugas Akhir.

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA dan Ibu Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir.
2. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
3. Bapak Fakhreza Abdul, ST., M.Sc. selaku dosen wali dari penulis yang telah membimbing dan memberi nasihat selama perkuliahan.

Manusia memang tak pernah luput dari kesalahan sebagaimana halnya dengan Laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Penulis juga berharap Laporan Tugas Akhir ini dapat berguna bagi siapapun nantinya.

Surabaya, 20 Mei 2020

Penulis

Yanne Indriati

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>v</b>
<b>Abstrak.....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Korosi.....	5
2.2 Jenis-jenis Korosi.....	5
2.2.1 Korosi Seragam ( <i>Uniform Corrosion</i> ).....	5
2.2.2 Korosi Batas Butir ( <i>Intergranular Corrosion</i> ).....	5
2.2.3 Korosi Galvanik ( <i>Galvanic Corrosion</i> ).....	7
2.2.4 Korosi Celah ( <i>Crevice Corrosion</i> ).....	8
2.2.5 Korosi Erosi ( <i>Erosion Corrosion</i> ).....	9
2.2.6 Korosi Sumuran ( <i>Pitting Corrosion</i> ).....	10
2.2.7 Korosi Tegangan ( <i>Stress Corrosion</i> ).....	11
2.3 Mekanisme Korosi.....	12
2.3.1 Korosi Kering.....	12
2.4 Oksidasi Temperatur Tinggi.....	15
2.5 Material Temperatur Tinggi.....	16
2.5.1 Superalloy.....	16
2.5.2 Keramik.....	20
2.6 Inconel 625.....	21
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	

3.1	Diagram Alir .....	27
3.2	Komposisi Kimia .....	28
3.3	Prosedur Penelitian Berdasarkan Jurnal.....	28
3.3.1	Jurnal Malafaia, et al., 2020. ....	28
3.3.2	Referensi Fresnillo, et al., 2014.....	29
3.3.3	Referensi Chyrkin, et al., (2011) .....	30
3.3.4	Referensi Buscail, et al. (2011) .....	31
3.4	Pengujian Berdasarkan Jurnal.....	32
3.4.1	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	32
3.4.2	<i>X-ray Diffraction</i> .....	33
3.4.3	<i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> .....	34
3.4.4	<i>Transmission Electron Microscope</i> .....	34
3.5	Rancangan Pengujian Berdasarkan Jurnal .....	35
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Analisis Lapisan Oksida.....	37
4.2	Analisis Fasa dan Struktur Mikro .....	62
4.3	Kritisasi Jurnal.....	70
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>		
5.1	Kesimpulan .....	71
5.2	Saran .....	71
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>73</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH.....</b>		<b>77</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>		<b>79</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Ilustrasi partikel kromium karbida yang telah mengendap di sepanjang batas butir baja tahan karat. (Callister & Rethwisch, 2010) .....	6
<b>Gambar 2. 2</b>	Mekanisme korosi celah. (Irwanto, Basir, & Pamuji, 2013) .....	9
<b>Gambar 2. 3</b>	Kegagalan pada pipa bagian siku. (Callister & Rethwisch, 2010) .....	10
<b>Gambar 2. 4</b>	Korosi sumuran (Revie and Uhlig 2011). .....	11
<b>Gambar 2. 5</b>	Korosi tegangan pada batas butir. (Callister & Rethwisch, 2010) .....	11
<b>Gambar 2. 6</b>	Mekanisme pertumbuhan oksida pada permukaan logam. ....	12
<b>Gambar 2. 7</b>	Diagram Ellingham. (Revie & Uhlig, 2008) .....	15
<b>Gambar 2. 8</b>	Diagram <i>time-temperatur-transformation</i> paduan 625 .....	23
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram Alir Pembahasan Jurnal .....	27
<b>Gambar 4. 1</b>	Grafik pola difraksi sinar-X Inconel 625 tebal setelah oksidasi selama 10.000 jam pada temperatur 700 °C dalam Ar-50% H <sub>2</sub> O. (Fresnillo, 2014) .....	37
<b>Gambar 4. 2</b>	Hasil citra SEM pada Inconel 625 tebal setelah dioksidasi selama 10.000 jam pada Ar-50% H <sub>2</sub> O pada temperatur (a, b) 700 dan (c, d) 750 °C. (Fresnillo, 2014) .....	38
<b>Gambar 4. 3</b>	Analisis SEM pada Inconel 625 strip setelah oksidasi selama 10.000 jam pada temperatur (a, b) 700 dan (c, d) 750 °C dalam Ar-50% H <sub>2</sub> O. (Fresnillo, 2014) .....	39
<b>Gambar 4. 4</b>	Grafik pola difraksi sinar-X Inconel 625 setelah oksidasi pada temperatur 800 °C selama 120 dan 240 jam. (Malafaia, 2020) .....	40

<b>Gambar 4. 5</b>	Permukaan Inconel 625 setelah dioksidasi pada 800 °C selama (a) 120 dan (b) 240 jam. (Malafaia, 2020) .....	41
<b>Gambar 4. 6</b>	Cross-section dari Inconel 625 setelah dioksidasi pada temperatur 800 °C selama 240 jam. (Malafaia, 2020) .....	42
<b>Gambar 4. 7</b>	Kurva penambahan massa dan hasil citra SEM permukaan pada Inconel 625 dengan tebal 1 dan 0,3 mm selama proses oksidasi pada temperatur 900 °C (a) di udara dan (b) Ar – 4% H <sub>2</sub> –2% H <sub>2</sub> O. (Chyrkin, 2011).....	43
<b>Gambar 4. 8</b>	Kurva penambahan massa dan analisis SEM permukaan pada Inconel 625 dengan tebal 1 dan 0,3 mm selama proses oksidasi pada temperatur 1000 °C (a) di udara dan (b) Ar – 4% H <sub>2</sub> –2% H <sub>2</sub> O. (Chyrkin, 2011).....	45
<b>Gambar 4. 9</b>	Grafik pola difraksi sinar-X Inconel 625 setelah paparan pada temperatur 1000 °C selama 120 dan 240 jam. (Malafaia, 2020).....	48
<b>Gambar 4. 10</b>	Permukaan atas Inconel 625 setelah terpapar pada temperatur 1000 °C selama (a) 120 jam diamati dengan <i>secondary electron detector</i> dan (b, c, d) 240 jam diamati dengan <i>backscattered electron detector</i> . (Malafaia, 2020) .....	49
<b>Gambar 4. 11</b>	Permukaan Inconel 625 yang diamati dengan BSE-SEM setelah dioksidasi pada 1000 °C selama (a) 120 dan (b) 240 jam. (Malafaia, 2020) .....	51
<b>Gambar 4. 12</b>	Cross-section dari Inconel 625 setelah dioksidasi pada 1000 °C selama 240 jam (a) diamati dengan <i>backscattered electrons detector</i> dan (b sampai h) <i>EDS maps</i> . (Malafaia, 2020) .....	52

<b>Gambar 4. 13</b> Detail endapan pada permukaan Inconel 625 setelah terpapar pada temperatur 1000 °C selama (a) 120 dan (b) 240 jam. (Malafaia, 2020).....	53
<b>Gambar 4. 14</b> Grafik pola difraksi sinar-X spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperature 900, 1000 dan 1100 °C di lingkungan <i>dry air</i> dan <i>wet air</i> . (Buscail, 2011) .....	54
<b>Gambar 4. 15</b> Hasil citra SEM pada permukaan spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperature (1, 2) 900, (3, 4) 1000 dan (5, 6) 1100 °C di lingkungan <i>dry air</i> dan <i>wet air</i> . (Buscail, 2011).....	55
<b>Gambar 4. 16</b> Hasil mikroskop optic pada spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperature 900, 1000 dan 1100 °C di lingkungan <i>dry air</i> dan <i>wet air</i> . (Buscail, 2011) .....	57
<b>Gambar 4. 17</b> Hasil citra SEM dari cross-section spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperature 1100 °C di lingkungan <i>dry air</i> . (Buscail, 2011).....	58
<b>Gambar 4. 18</b> Hasil citra SEM dari cross-section spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperature 1100 °C di lingkungan <i>wet air</i> .....	59
<b>Gambar 4. 19</b> Hasil karakterisasi Inconel 625. (Malafaia, 2020).....	63
<b>Gambar 4. 20</b> Hasil TEM pada paduan 625 setelah dioksidasi pada temperatur 700 °C selama 3000 jam dalam Ar-50% H <sub>2</sub> O. (Fresnillo, 2014).....	64
<b>Gambar 4. 21</b> Hasil citra SEM dan EDX pada wilayah dekat permukaan paduan 625 berdinding tipis setelah dioksidasi pada temperature 700 °C selama 10.000 jam dalam Ar-50% H <sub>2</sub> O. (Fresnillo, 2014) .....	65

<b>Gambar 4. 22</b>	Pembentukan fase kedua pada Inconel 625 setelah dioksidasi pada temperatur 800 °C (Malafia, 2020) .....	66
<b>Gambar 4. 23</b>	Struktur mikro Inconel 625 saat dioksidasi pada temperature (a) 900 dan (b) 1000 °C selama 1000 jam. (Chyrkin, 2011) .....	68
<b>Gambar 4. 24</b>	Hasil citra SEM dari fase presipitasi pada Inconel 625 setelah dipapar 100 jam pada temperatur 900 °C dan analisis EDX pada titik yang ditandai pada bagian (a). (Chyrkin, 2011).....	69

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Standar potensial elektroda. (Callister & Rethwisch,2010).....	8
<b>Tabel 2. 2</b> Klasifikasi paduan berbasis nikel. (Revie & Uhlig, 2011) .....	18
<b>Tabel 2. 3</b> Komposisi paduan berbasis kobalt. (Revie & Uhlig, 2008) .....	20
<b>Tabel 2. 4</b> Komposisi kimia Inconel 625.....	22
<b>Tabel 3. 1</b> Komposisi Kimia Inconel 625 .....	28
<b>Tabel 3. 2</b> Tabel Pengujian pada Inconel 625.....	35
<b>Tabel 4. 1</b> Rangkuman Lapisan Oksida dari Inconel 625 .....	62
<b>Tabel 4. 2</b> Rangkuman Fasa dan Mikrostruktur yang terbentuk dari Inconel 625.....	70

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Perkembangan dalam bidang industri yang beroperasi pada temperatur tinggi saat ini mengalami kemajuan yang sangat pesat, seperti dalam bidang dirgantara, pembangkit energi, petro-kimia, dan bidang nuklir. Perkembangan industri ini tentu memerlukan dukungan dalam berbagai aspek seperti pemilihan material untuk komponen yang dapat digunakan dan tahan terhadap kerusakan maupun kegagalan akibat proses oksidasi yang terjadi pada temperatur tinggi. Contohnya turbin gas pada industri penerbangan dan manufaktur, komponen di dalam sistem turbin gas pesawat terbang yang paling sering bekerja pada temperatur tinggi dan menerima tekanan adalah sudu turbinnya. Semakin tinggi temperatur pembakaran yang dilakukan maka akan semakin tinggi tingkat efisiensi yang akan dihasilkan dari mesin tersebut (Priambodo and Widyanto 2015). Selain pada sudu turbin pesawat terbang, *recuperator* pada microturbines yang digunakan industri pembangkit listrik juga merupakan salah satu aplikasi yang bekerja pada temperatur tinggi. Fungsi dari *microturbines* adalah untuk meningkatkan efisiensi dari pembangkit listrik ini, karena mekanisme dari *microturbines* sendiri adalah dengan menambahkan *recuperator* di dalam siklusnya agar dapat memindahkan panas dari gas buang yang berasal dari turbin ke dalam udara yang masuk, sehingga semakin banyak panas yang bisa dipindahkan dari gas buang maka semakin sedikit bahan bakar yang digunakan (Omatete, et al. 2000). *Recuperator* sendiri memiliki temperatur operasional sebesar 700 – 1100 °C, hal ini menunjukkan bahwa tidak sembarang material dapat digunakan untuk beroperasi pada temperatur tinggi. Contoh material yang dapat digunakan pada aplikasi-aplikasi yang beroperasi pada temperatur tinggi seperti pada *recuperator* pada *microturbine* adalah *superalloy*.

Paduan super atau yang biasa disebut dengan *superalloy* adalah paduan yang dikembangkan untuk dapat digunakan pada temperatur tinggi atau tahan terhadap panas. Paduan super ini pada umumnya mengandung nikel (Ni), besi (Fe), kobalt (Co), kromium (Cr) dan sejumlah wolfram (W), molibdenum (Mo), tantalum (Ta), niobium (Nb), titanium (Ti), serta aluminium (Al) (Donachie and Donachie 2002). Salah satu jenis *superalloy* yang biasa digunakan adalah Inconel, paduan berbasis Ni yang memiliki sifat tahan korosi, oksidasi, dan karburisasi yang baik pada temperatur tinggi. Paduan Inconel biasanya ditambahkan dengan unsur lain agar dapat meningkatkan ketahanan korosi dan sifat mekaniknya (A., et al. 2006). Paduan ini memiliki struktur kristal FCC (*Face-Centered Cubic*) yang sangat stabil apabila digunakan pada temperatur tinggi namun tidak stabil apabila digunakan pada temperatur kamar, sehingga dibutuhkan komposisi paduan lain yang berfungsi sebagai penstabil fasa austenit, salah satu contohnya adalah Ni dan Mn (Callister and Rethwisch, *The Structure of Crystalline Solids* 2009). Berdasarkan paparan latar belakang di atas, oleh karena itu pada *review* jurnal ini didapatkan pengaruh variasi temperatur terhadap pertumbuhan secara berkala antara temperatur 700 °C sampai dengan 1100 °C pada lapisan oksida, struktur mikro dan fasa yang terbentuk saat proses oksidasi Inconel 625.

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada review yang akan dilakukan, didapatkan beberapa rumusan masalah. Adapun rumusan masalah tersebut adalah:

1. Bagaimana pengaruh dari variasi temperatur terhadap lapisan oksida yang terbentuk pada Inconel 625 saat proses oksidasi ?
2. Bagaimana pengaruh dari variasi temperatur terhadap pertumbuhan struktur mikro dan fase yang terbentuk pada Inconel 625 saat proses oksidasi ?

## 1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian yang akan dilakukan, terdapat beberapa batasan masalah. Adapun batasan masalah tersebut adalah:

---



1. Tekanan diabaikan.
2. Kekasaran permukaan diabaikan.
3. *Pre-treatment* dan *post-treatment* diabaikan.
4. *Wet air* dan *dry air*.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Pada review yang akan dilakukan, terdapat beberapa tujuan yang ingin dicapai. Adapun tujuan review tersebut adalah:

1. Mengetahui dan menganalisis pengaruh dari variasi temperatur terhadap lapisan oksida yang terbentuk pada Inconel 625 saat proses oksidasi ?
2. Mengetahui dan menganalisis pengaruh dari variasi temperatur terhadap pertumbuhan struktur mikro dan fase yang terbentuk pada Inconel 625 saat proses oksidasi ?

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yaitu, hasil dari review jurnal ini akan memberikan informasi terkait mekanisme korosi yang terjadi pada paduan berbasis nikel (Inconel 625) saat dioksidasi pada temperatur tinggi.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Korosi**

Korosi dapat didefinisikan proses degradasi sebuah logam akibat reaksi elektrokimia yang bersifat alamiah dan berlangsung secara spontan sehingga korosi tidak dapat dihentikan sama sekali namun dapat dikendalikan atau diperlambat laju korosinya, sehingga dapat memperlambat kerusakan dari suatu logam (Sudradjat and Bayuseno 2014). Material yang bukan logam tidak dapat menjadi salah satu kategori untuk definisi korosi ini (Revie and Uhlig, Definition and Importance of Corrosion 1907).

#### **2.2 Jenis-jenis Korosi**

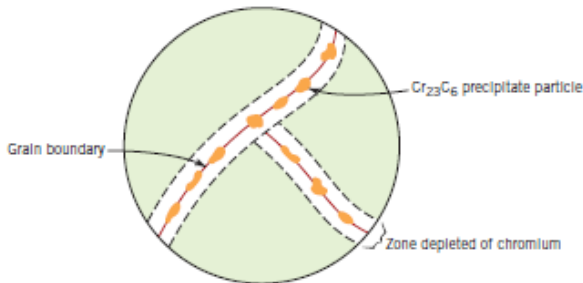
##### **2.2.1 Korosi Seragam (*Uniform Corrosion*)**

Korosi seragam adalah salah satu bentuk korosi paling umum yang terjadi pada logam, dimana terjadi degradasi pada permukaan logam secara merata (Schweitzer 2007). Korosi seragam juga dapat didefinisikan sebagai bentuk korosi elektrokimia yang terjadi dengan pada seluruh permukaan yang terbuka dan biasanya meninggalkan endapan atau deposit (karat). Korosi serangan ini merupakan bentuk korosi yang paling umum, namun juga dapat dikendalikan dengan mudah (Callister and Rethwisch 2010).

##### **2.2.2 Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*)**

Korosi batas butir adalah jenis korosi yang terjadi pada batas butir. Jumlahnya yang sedikit atau tidaknya korosi yang diamati ini akan mengakibatkan hilangnya kekuatan dan keuletan pada suatu logam (Schweitzer 2007). Hasil akhir dari serangan korosi batas butir adalah logam akan mengalami kegagalan secara makroskopis di sepanjang batas butirnya (Callister and Rethwisch, Materials Science and Engineering An Introduction 2010). Pada suhu tinggi, korosi intergranular dapat terjadi karena, dalam beberapa kondisi, seperti saat terbentuknya fasa dengan titik leleh yang rendah lalu dapat menembus di sepanjang batas butir; misalnya, ketika paduan

berbasis nikel terpapar pada lingkungan gas yang mengandung sulfur, maka nikel sulfida akan terbentuk karena sulfur memiliki titik leleh yang rendah dan akan menebus di sepanjang batas butir lalu bereaksi dengan nikel dan menyebabkan kegagalan yang fatal (Revie and Uhlig 1907).



C

**Gambar 2. 1** Ilustrasi partikel kromium karbida yang telah mengendap di sepanjang batas butir baja tahan karat. (Callister & Rethwisch, 2010)

Misalnya ketika baja tahan karat dipanaskan hingga suhu antara 500 dan 800° C (950 dan 1450° F) dalam periode waktu yang cukup lama, maka paduan ini menjadi peka terhadap korosi intergranular. Ketika diberi perlakuan panas ini memungkinkan terjadinya pembentukan partikel endapan kecil kromium karbida ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) melalui reaksi antara kromium dan karbon dalam baja tahan karat. Partikel-partikel ini nantinya akan terbentuk di sepanjang batas butir, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.1. (Callister and Rethwisch, Materials Science and Engineering An Introduction 2010). Pengendapan karbida dapat dicegah dengan menggunakan paduan yang mengandung kurang dari 0,03% karbon, dengan menggunakan paduan yang telah distabilkan dengan niobium atau titanium, atau dengan menentukan solusi perlakuan panas yang sesuai kemudian diikuti dengan pendinginan cepat yang akan menjaga karbida dalam larutan. Solusi yang paling sering dilakukan adalah dengan

menggunakan kadar karbon rendah atau stainless steel austenit yang distabilkan.



Paduan berbasis nikel juga dapat mengalami presipitasi karbida bila terkena suhu lebih rendah dari suhu anilnya. Sama seperti baja tahan karat austenit, paduan dengan kandungan karbon dalam jumlah yang rendah juga direkomendasikan untuk menunda terjadinya pengendapan karbida. Contoh beberapa paduan berbasis nikel, seperti paduan 625, unsur niobium, atau titanium dapat ditambahkan untuk menstabilkan paduan tersebut terhadap terjadinya presipitasi kromium atau molibdenum karbida. Unsur-unsur itu yang nantinya akan bergabung dengan karbon, bukan kromium atau molybdenum (Schweitzer 2007).

### **2.2.3 Korosi Galvanik (*Galvanic Corrosion*)**

Korosi galvanik adalah sebuah reaksi antara dua logam ataupun paduan yang memiliki komposisi yang berbeda, saling kontak dalam larutan elektrolit (Callister and Rethwisch, Materials Science and Engineering An Introduction 2010). Korosi galvanic terjadi ketika dua logam yang berbeda potensialnya ditempatkan dalam larutan elektrolit, dan terjadi kontak metalik. Perbedaan potensial ini akan menyebabkan terjadinya peluruhan pada logam yang memiliki potensial lebih rendah daripada logam lainnya. Prinsip inilah yang dijadikan dasaran ilmiah untuk menggunakan bahan-bahan dengan nilai potensial lebih rendah seperti seng untuk melindungi logam baja tahan karat (Schweitzer 2007). Unsur yang memiliki nilai potensial lebih tinggi dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1** Standar potensial elektroda. (Callister & Rethwisch,2010)

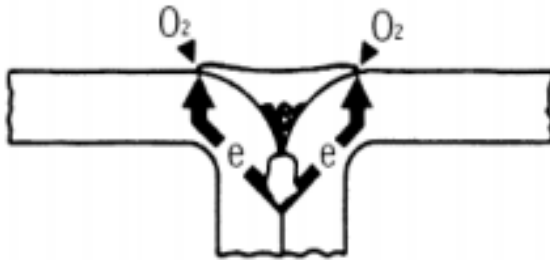
	Reaksi Elektroda	Standar Potensial Elektroda
	$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Au}$	+1.420
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.229
	$\text{Pt}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pt}$	~+1.2
	$\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$	+0.800
	$\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0.771
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4(\text{OH}^-)$	+0.401
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$	+0.340
	$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$	0.000
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pb}$	-0.126
	$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}$	-0.136
	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ni}$	-0.250
	$\text{Co}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Co}$	-0.277
	$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cd}$	-0.403
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Fe}$	-0.440
	$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.744
	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$	-0.763
	$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightarrow \text{Al}$	-1.662
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Mg}$	-2.363
	$\text{Na}^+ + e^- \rightarrow \text{Na}$	-2.714
	$\text{K}^+ + e^- \rightarrow \text{K}$	-2.924

  
 Lebih inert  
(katoda)  
 Lebih aktif (anoda)  


#### 2.2.4 Korosi Celah (*Crevice Corrosion*)

Korosi celah adalah peristiwa korosi yang letak terjadinya di dalam atau berdekatan dengan celah sempit yang merupakan kontak antara dua logam atau logam dengan non-logam. Korosi ini terjadi karena adanya perbedaan dalam konsentrasi oksigen, deposit yang terbentuk pada permukaan logam yang disebabkan

karena adanya larutan larutan yang terperangkap di dalam celah (Schweitzer 2007). Mekanisme terjadinya korosi celah dapat diilustrasikan pada Gambar 2.2., larutan yang terperangkap pada celah akan menimbulkan perbedaan konsentrasi oksigen dan daerah dengan konsentrasi oksigen lebih tinggi akan berperan sebagai katoda. Sedangkan daerah dengan konsentrasi oksigen yang rendah berperan sebagai anoda (Irwanto, Basir and Pamuji 2013).



**Gambar 2. 2** Mekanisme korosi celah. (Irwanto, Basir, & Pamuji, 2013)

### **2.2.5 Korosi Erosi (*Erosion Corrosion*)**

Korosi erosi adalah kerusakan yang disebabkan adanya fluida yang mengalir dengan kecepatan tinggi pada permukaan logam (Schweitzer 2007). Semua paduan logam rentan terhadap korosi erosi, khususnya bagi material yang pasif dalam membentuk lapisan film sebagai lapisan pelindung pada permukaan. Aliran fluida dengan kecepatan tinggi ini merupakan tindakan abrasif yang dapat mengikis lapisan film dan meninggalkan permukaan logam menjadi terbuka. Jika logam tidak mampu membentuk lapisan film kembali secara terus menerus dan dengan cepat, maka kemungkinan untuk logam mengalami korosi erosi mungkin semakin besar. Dalam peristiwa korosi erosi, sifat dari fluida itu sendiri memiliki pengaruh yang penting pada perilaku korosi. Peningkatan kecepatan fluida biasanya meningkatkan laju korosi juga.

Korosi erosi biasanya terjadi pada pipa, terutama pada bagian siku, tikungan, atau penyempitan diameter pipa sehingga membuat aliran fluida tiba-tiba menjadi turbulen. Gambar 2.3 menggambarkan kegagalan yang terjadi pada pipa bagian siku (Callister and Rethwisch 2010).



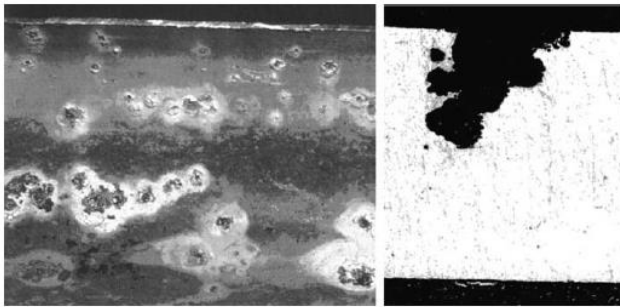
**Gambar 2. 3** Kegagalan pada pipa bagian siku. (Callister & Rethwisch, 2010)

### **2.2.6 Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*)**

Korosi sumuran adalah bentuk lain dari serangan korosi yang sangat biasa terjadi di mana mekanismenya adalah terbentuknya lubang kecil pada logam. Korosi sumuran ini biasanya menembus dari atas permukaan lalu bergerak secara horizontal dan ke bawah dengan arah vertikal. Ini adalah jenis korosi yang sangat berbahaya, seringkali tidak terdeteksi dan menyebabkan berbagai kerugian dari skala yang kecil hingga terjadi kegagalan pada material. Contoh dari korosi sumuran ditunjukkan pada Gambar 2.4. Lubang yang terbetuk pada logam biasanya diawali oleh adanya cacat permukaan seperti goresan (Callister and Rethwisch 2010). Inisiasi dari terbentuknya lubang atau cacat pada permukaan ini diakibatkan karena adanya kerusakan pada lapisan film yang

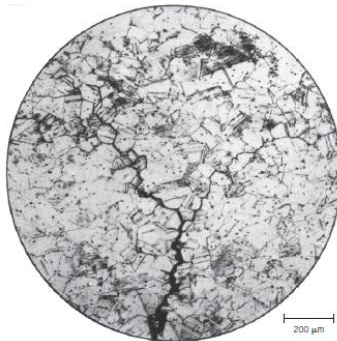


berfungsi sebagai pelindung pada permukaan logam. Lubang yang terbentuk pada logam ini sering tidak terdeteksi saat dilakukan inspeksi dikarenakan sering tertutup oleh produk korosi. Korosi sumuran ini dapat merusak material seperti pipa sehingga tidak dapat digunakan lagi meskipun kerusakan dalam skala yang sangat kecil (Schweitzer 2007)



**Gambar 2. 4** Korosi sumuran (Revie and Uhlig 2011).

### 2.2.7 Korosi Tegangan (*Stress Corrosion*)



**Gambar 2. 5** Korosi tegangan pada batas butir. (Callister & Rethwisch, 2010)

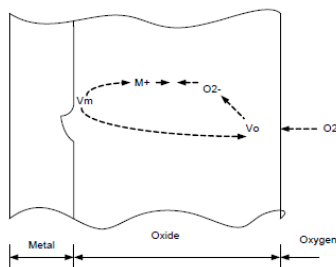
Korosi tegangan (*stress corrosion*) biasanya juga disebut sebagai *stress corrosion crack* (SCC) atau retak korosi tegangan.

Korosi tegangan terjadi karena adanya tegangan tarik yang diterapkan pada material ketika berada dalam lingkungan yang korosif. Hampir semua paduan logam rentan terhadap serangan korosi tegangan pada lingkungan tertentu. Contohnya, baja tahan karat akan mengalami korosi jika diletakkan ke dalam larutan yang mengandung ion klorida, sedangkan logam kuningan sangat rentan bila terkena amonia. Gambar 2.5 adalah gambar yang menunjukkan letak retak korosi intergranular pada logam kuningan (Callister and Rethwisch 2010).

## 2.3 Mekanisme Korosi

### 2.3.1 Korosi Kering

Korosi kering merupakan proses korosi yang akibat oksidasi logam karena adanya gas kimia di lingkungan tidak ada uap air dan kelembaban. Korosi kering biasanya terjadi tanpa adanya larutan elektrolit seperti pada umumnya dan terjadi pada temperatur tinggi. Gas kimia yang dimaksud dapat memicu terjadinya korosi kering seperti oksigen, nitrogen, dan halogen. Hal ini akan memicu pembentukan lapisan film pada permukaan sebagai produk korosi, yang berfungsi sebagai lapisan pelindung. Pada temperatur rendah, logam alkali dan logam alkali tanah seperti Li, Na, K, dan Mg, Ca, Sn, mudah teroksidasi. Sedangkan pada temperatur tinggi, hampir semua logam kecuali Ag, Au, dan Pt teroksidasi (Cicek 2013).



**Gambar 2. 6** Mekanisme pertumbuhan oksida pada permukaan logam.

Selama mengalami proses oksidasi, akan terbentuk oksida yang diawali dari proses penarikan oksigen pada permukaan logam dan mengalami reaksi antara oksigen dengan permukaan logam. Proses oksidasi yang terjadi pada permukaan logam ini yang akan mengawali adanya pertumbuhan oksida pada permukaan logam. Dapat dilihat pada Gambar 2.6 mengenai mekanisme pertumbuhan produk oksida pada permukaan logam (Fontana and Greene 1977).

Terdapat tiga jenis korosi kering yang biasanya diamati:

- a. Oksidasi
- b. Korosi oleh gas lain
- c. Korosi logam cair

### 2.3.1.1 Korosi Oksidasi

Dalam jenis korosi oksidasi, logam yang dioksidasi akan membentuk oksida mereka, menghasilkan empat jenis oksida:

#### i. Oksida Stabil

Sebagai contoh pada kasus aluminium (Al), tembaga (Cu), oksida yang terbentuk pada permukaan logam tersebut bersifat lebih stabil dan tahan air. Oksida yang terbentuk berfungsi sebagai lapisan film, memiliki tujuan untuk melindungi logam di bawahnya. Reaksi dari oksida yang terbentuk dapat dilihat pada persamaan 2.1 dan 2.2 sebagai berikut:

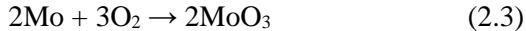


#### ii. Oksida Tidak Stabil

Beberapa kasus terdapat oksida logam yang terbentuk pada permukaan logam akan terurai kembali menjadi logam dan oksigen. Sebagai contoh adalah oksida perak (Ag), emas (Au), dan platinum (Pt) merupakan oksida yang sangat tidak stabil, sehingga ketiganya tidak mengalami korosi oksidasi.

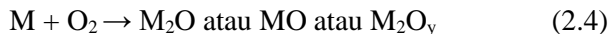
#### iii. Oksida Mudah Menguap

Beberapa oksida logam juga mudah menguap, sehingga proses oksidasi akan terus berlangsung sampai total logam dikonversi menjadi oksida logam yang sesuai. Salah satu contohnya adalah oksidasi pada molibdenum (Mo) yang dapat dilihat pada persamaan 2.3.



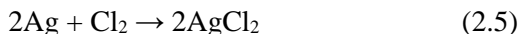
iv. Oksida Berpori

Sifat protektif atau non-protektif dari lapisan film ditentukan berdasarkan aturan yang dikenal sebagai aturan Pilling-Bedworth. Dimana rasio volume dari oksida yang dibentuk dengan volume logam yang dikonsumsi, jika volume dari lapisan oksida lebih besar dari volume logam maka lapisan oksida tersebut bersifat protektif dan tidak berpori. Di sisi lain, jika volume dari lapisan oksida yang terbentuk di permukaan kurang dari logam, maka lapisan oksida yang dihasilkan pada permukaan logam bersifat berpori dan memungkinkan aerasi terus menerus melalui pori-pori tersebut sehingga akan mengakibatkan proses korosi terjadi sampai logam habis. Reaksi dari proses oksida berpori dapat dilihat pada persamaan 2.4, sebagai berikut:

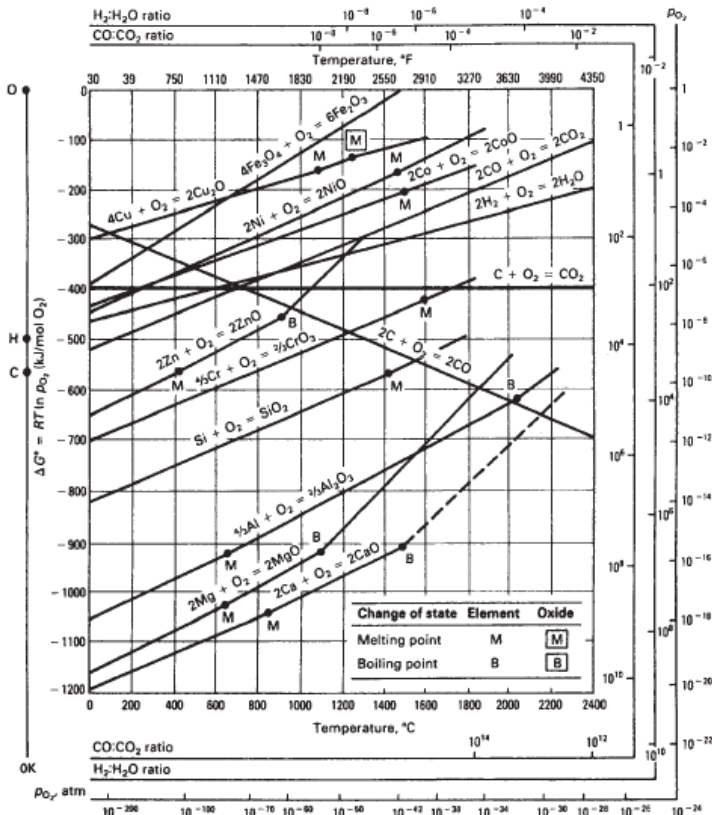


### 2.3.1.2 Korosi oleh Gas Lain

Korosi juga terjadi diakibatkan oleh gas seperti klorin ( $\text{Cl}_2$ ), hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ), dan lainnya. Sebagai contoh, perak (Ag) mengalami korosi akibat adanya gas  $\text{Cl}_2$  sesuai dengan reaksi 2.5 berikut:



## 2.4 Oksidasi Temperatur Tinggi



**Gambar 2. 7** Diagram Ellingham. (Revie & Uhlig, 2008)

Kecenderungan suatu logam untuk mengalami reaksi oksidasi akan ditandai dengan adanya perubahan energi bebas  $\Delta G$  yang disertai dengan pembentukan oksidasi. Berbagai jenis logam yang mudah mengalami reaksi oksidasi dikarenakan logam pada Gambar 2.7 memiliki nilai  $\Delta G$  yang negative. Jika dilihat dari persamaan Gibbs nilai perubahan energy bebas  $\Delta G$  dapat dilihat langsung dari sumbu vertikal sebelah kiri grafik. Contohnya pada

temperatur 1000 ° C, maka energy bebas untuk pembentukan NiO adalah sekitar - 250 kJ untuk dua mol NiO. Nilai  $\Delta G$  untuk reaksi oksidasi akan berkurang seiring dengan meningkatnya temperatur, yang berarti stabilitas oksidasinya juga berkurang. Logam mulia yang mudah tereduksi terdapat di ujung atas diagram dan logam yang lebih reaktif akan terdapat pada bagian dasar diagram. Namun, beberapa jenis logam di bagian dasar seperti Al, Ti, dan Zr tidak mengalami oksidasi pada temperatur ruang karena terdapat lapisan oksida tipis yang terbentuk terlebih dahulu dan tidak dapat ditembus (Revie and Uhlig 2008).

## 2.5 Material Temperatur Tinggi

### 2.5.1 Superalloy

Paduan super atau yang biasa disebut dengan *superalloy* adalah paduan yang dikembangkan untuk dapat digunakan pada temperatur tinggi atau tahan terhadap panas. Paduan super ini pada umumnya mengandung nikel (Ni), besi (Fe), kobalt (Co), kromium (Cr) dan sejumlah wolfram (W), molibdenum (Mo), tantalum (Ta), niobium (Nb), titanium (Ti), serta alumunium (Al) (Donachie and Donachie 2002). Material paduan super dapat digolongkan menjadi 3 yaitu paduan super berbasis besi, paduan super berbasis kobalt, dan paduan super berbasis nikel. Paduan super memiliki banyak kegunaan, seperti: (i) turbin gas pesawat terbang, mis. disk, ruang bakar, baut, tuang, sistem pembuangan poros, bilah, baling-baling, dll.; (ii) pembangkit listrik turbin uap, mis. baut, blades, reheater gas stack; (iii) mesin bolak-balik, mis. turbocharger, katup buang, colokan panas, dll.; (iv) aplikasi medis, mis. penggunaan kedokteran gigi; (v) kendaraan luar angkasa; (vi) peralatan pengolah panas; (vii) sistem tenaga nuklir; (ix) industri kimia dan petrokimia; (x) peralatan pengontrol polusi; dan (xi) sistem gasifikasi dan pencairan batubara (Choudhury and Baradie 1998).

Karakteristik pertama yang dibutuhkan dari material temperatur tinggi adalah memiliki kemampuan untuk bertahan ketika berada pada temperatur operasi yang tinggi dan dekat dengan temperatur leburnya ( $T_m$ ), selanjutnya adalah memiliki

kemampuan menahan degradasi sifat mekanik dalam jangka waktu yang lama, dan karakteristik yang dibutuhkan adalah dapat bekerja pada lingkungan yang parah seperti gas panas yang dihasilkan dari dalam turbin pembangkit listrik berbahan bakar batubara yang bersifat sangat korosif karena tingginya kandungan sulphur di dalam bahan bakarnya (Reed 2006).

#### **2.5.1.1 Paduan Berbasis Nikel**

Paduan berbasis nikel biasa juga disebut sebagai superalloy, yang sudah disebutkan bahwa paduan berbasis nikel memiliki ketahanan pada temperatur tinggi dan ketahanan terhadap oksidasinya yang baik. Selain paduan berbasis nikel yang mengandung unsur kromium sebesar 25-30%, terdapat jenis paduan lainnya yang tergolong ke dalam superalloy seperti paduan kobalt dan paduan besi-nikel. Dalam segi elektrokimia, unsur nikel merupakan unsur yang lebih mulia daripada besi (Schweitzer 2007).

Umumnya nikel dapat membentuk lapisan pasif pada beberapa lingkungan, tetapi tidak stabil. Oleh karena itu, nikel tidak biasa digunakan dalam lingkungan yang mengandung oksidasi seperti asam nitrat. Paduan berbasis nikel ketika dicampur dengan kromium, lapisan pasif yang terbentuk jauh lebih stabil, menghasilkan kemampuan tahan terhadap korosi pada lingkungan pengoksidasi juga jauh lebih besar. Namun, paduan berbasis nikel ini tetap akan dapat terserang korosi apabila diletakkan di dalam media yang mengandung klorida atau halide lainnya. Jenis korosi yang terbentuk adalah korosi *pitting*

**Tabel 2. 2** Klasifikasi paduan berbasis nikel. (Revie & Uhlig, 2011)

Jenis Paduan	Lingkungan Kerja/Kegunaan	Contoh Paduan
Ni	<i>Caustic</i>	Ni-200/201.
Ni-Cu	Halida non-oksidasi, <i>caustic</i>	<i>Alloy</i> 400, K-500
Ni-Mo	Non-oksidasi	<i>Alloy</i> B-2, B-3, B-4, etc.
Ni-Si (beberapa dengan Cr)	Oksidasi tinggi, non-halida	<i>Alloy</i> D, <i>Lewmet</i> , D-205
Ni-Fe	<i>Controlled expansion</i> , non-oksidasi	<i>Invar</i> , <i>Pemifer</i> , etc.
Ni-Cr-Fe	Oksidasi, non-halida	<i>Alloy</i> 600, 800, 690, etc.
Ni-Cr-Fe-Mo	Oksidasi, lingkungan dengan tingkat korosi lokal menengah	825, G-3, G-30, <i>alloy</i> 33, etc.
Ni-Cr-Mo	Oksidasi, lingkungan dengan tingkat korosi lokal yang tinggi	<i>Alloy</i> 625, <i>alloy</i> 276, <i>alloy</i> 22, C-2000
Ni-Cr-Fe-Mo-(Al, Ti, Nb)	Pengerasan presipitasi, lingkungan yang sama tanpa unsur (Al, Ti, Nb)	X-750, 718, 945, etc.
Ni-Cr-Mo-Fe-Co-C-Al-Ti-Nb-Logam Tanah Jarang	Korosi temperatur tinggi, ketahanan aus	X, 214, <i>Nimonic</i> , HR160, 230, MP-35N, etc.
Ni-Ti	<i>Shape memory alloys</i>	Nitinol



Pada Tabel 2.2 dapat dilihat jenis paduan berbasis nikel yang memiliki ketahanan terhadap lingkungan yang berbeda-beda, serta material komersil yang ada. Selain sifat tahan terhadap korosi, alasan paduan berbasis nikel banyak digunakan adalah karena ketahanannya terhadap korosi seperti korosi celah, retak, dan korosi tegangan. Pada baja tahan karat dengan kandungan besi-kromium-nikel biasanya memiliki jumlah karbon yang sangat sedikit, sekitar 0,03% guna menurunkan resiko pada material terhadap kehadiran presipitasi karbida. Jika kadar dari unsur nikel meningkat melebihi 50%, maka sifat dari karbida yang terbentuk akan berubah, terutama dari  $M_{23}C_6$  menjadi  $M_6C$  (Schweitzer 2007).

### 2.5.1.2 Paduan Berbasis Kobalt

Paduan berbasis kobalt dikembangkan pada awal tahun 1900-an dengan tujuan untuk membuat material yang tahan pada lingkungan yang korosif dan untuk tetap mempertahankan kekuatan dan kekerasan pada temperatur tinggi. Biasanya dikombinasikan dengan unsur kromium untuk dapat digunakan pada aplikasi yang sama dengan paduan berbasis nikel, namun memiliki keunggulan dibandingkan paduan nikel seperti lebih tahan terhadap korosi *fretting*, terhadap erosi oleh cairan berkecepatan tinggi maupun terhadap kerusakan kavitasi.

Pada temperatur mencapai  $417^0\text{ C}$ , kobalt memiliki struktur kristal berupa *hexagonal closed packed* (HCP). Sedangkan ketika temperatur mencapai di atas  $417^0\text{ C}$ , struktur yang dimiliki berupa *face center cubic* (FCC), dimana unsur-unsur lain yang dapat menstabilkan fase FCC atau austenite seperti nikel yang dapat menurunkan temperatur transformasi. Selain unsur penstabil FCC, terdapat juga beberapa unsur penstabil HCP seperti kromium, molybdenum, dan tungsten yang berfungsi untuk menaikkan temperatur transformasi. Pada Tabel 2.3 dapat dilihat beberapa komposisi paduan berbasis kobalt dengan tujuan masing-masing. Paduan yang mengandung kromium dan molybdenum ataupun tungsten biasanya membuat paduan berbasis kobalt menjadi lebih

tahan terhadap lingkungan yang gampang teroksidasi (Revie and Uhlig 2008).

**Tabel 2. 3** Komposisi paduan berbasis kobalt. (Revie & Uhlig, 2008)

Unsur	Contoh Paduan					
	6B	25	21	MP35N	Ultimet	Vitallium
Co	Bal	Bal	Bal	Bal	Bal	Bal
Cr	30	20	27	20	26	30
Mo	1.5	-	5.5	9.75	5	6
W	4	15	-	-	2	-
Ni	2.5	10	2.75	35	9	-
Fe	3	3	3	1	3	-
C	1	0.1	0.25	0.025	0.06	0.5
Mn	1.4	1.5	1	0.15	0.8	0.75
Si	0.7	0.4	1	0.15	0.3	-
Lainnya	-	-	0.007 B	1 Ti	0.08 Ni	-

### 2.5.1.3 Paduan Berbasis Nikel-Ferrum

Paduan berbasis nikel-besi juga dapat dikategorikan sebagai *superalloy*. Paduan ini juga banyak diaplikasikan pada turbin gas, pesawat ruang angkasa, reaktor nuklir, pompa dan perkakas karena memiliki sifat kombinasi antara ketahanan korosinya yang baik dan memiliki kekuatan yang tinggi dengan kemampuan las yang baik pada temperatur tinggi (Ping, et al. 2007). Salah satu contoh paduan berbasis nikel-besi adalah Inconel 718. Penggunaan Inconel 718 relatif baru, paduan ini merupakan hasil presipitasi hardening dan mengandung sejumlah Fe, Nb, dan Mo dalam jumlah yang signifikan; selain itu juga mengandung Al dan Ti dalam jumlah yang relative sedikit (Zhang, et al. 2019).

### 2.5.2 Keramik

Keramik dapat didefinisikan secara umum sebagai campuran anantara material anorganik dengan material *non-metallic*.

Umumnya keramik memiliki sifat yang spesifik. Terdapat beberapa sifat mekanik dari material keramik yang perlu diperhatikan.

*Brittleness* merupakan salah satu sifat mekanik yang sering ditinjau karena material keramik dengan struktur Kristal maupun nonkristalin hampir selalu mengalami *fracture* pada temperatur kamar sebelum mengalami deformasi plastis ketika diberi beban tarik. Alasan mengapa sebagian keramik memiliki sifat *brittle* adalah karena campuran yang dibentuk melalui ikatan ion-kovalen sehingga dapat menyatukan atom-atom penyusunnya. Namun kelebihan yang didapat ketika mencampurkan ikatan ion dan kovalen adalah memiliki *high melting* dan *freezing point*, sehingga pada temperatur tinggi keramik tidak bersifat *brittle*, namun bersifat sebagai *liquid* yang kental. Hal ini menyebabkan keramik sangat mudah dibentuk menjadi bentuk yang rumit.

*Low electric* dan *thermal conductivity* merupakan sifat yang diakibatkan oleh adanya elektron valensi dalam ikatan yang tidak bebas seperti pada logam. Setelah itu keramik memiliki *compressive strength* yang baik meskipun memiliki kekuatan tarik yang rendah. Hal ini menjadikan alasan mengapa aplikasi keramik banyak digunakan sebagai *load-bearing*.

*Chemical insensitivity*, dapat dijelaskan bahwa sebagian besar keramik akan stabil apabila bekerja pada lingkungan yang menggunakan kimia dan thermal yang tinggi. Beberapa sifat tersebut tentu dapat dikatakan khas karena berbeda dengan material logam maupun polimer.

## 2.6 Inconel 625

Inconel 625 merupakan paduan berbasis nikel dengan ketahanan korosi yang baik pada temperatur tinggi, dimana hal ini menjadi sebuah keuntungan karena dapat digunakan dalam berbagai aplikasi industri seperti industri pernebangn, kelautan dan nuklir (Suave, Cormier and Villechaise 2014). Inconel 625 atau yang biasa disebut dengan paduan 625 merupakan paduan *solid solution* yang kekuatannya didapat dari tingginya kadar

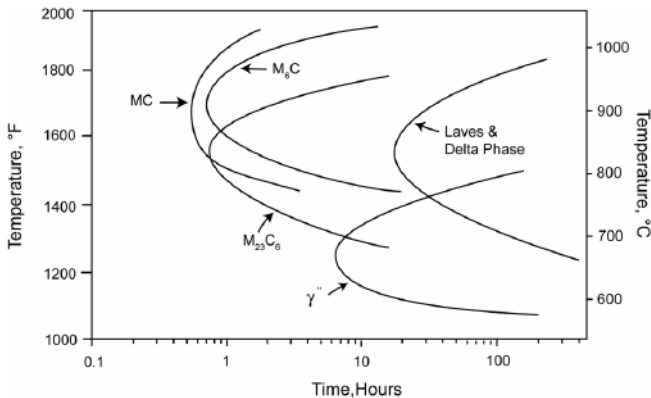
kromium, molybdenum dan niobium. Dalam beberapa penelitian juga disebutkan bahwa dalam paduan ini dapat terbentuk endapan fase intermetalik dan karbida apabila diberi perlakuan *aging* pada temperatur sekitar 550-750 °C.

**Tabel 2. 4** Komposisi kimia Inconel 625.

Unsur	Persentase (%)
Ni	bal
Cr	21.28
Mo	8.7
Fe	5.0 (max)
Nb	3.58
Mn	0.27
Al	0.26
Si	0.30
Ti	0.28
C	0.029
Ta	0.007
P	<0.005
S	<0.002

Perlakuan panas yang diberikan pada temperatur tinggi tersebut dilakukan karena adanya fasa metastabil yang terbentuk, berbentuk fasa  $\gamma''$  [ $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Al}, \text{Ti})$ ]. Namun apabila *aging* dilakukan secara berkepanjangan maka akan fasa  $\gamma''$  akan berubah menjadi fasa  $\delta$  [ $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Mo})$ ], dimana fasa  $\delta$  juga dapat terbentuk saat *supersaturated solid solution* saat *aging* dilakukan pada temperatur diatas 750 °C, hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.9 yang

menunjukkan diagram *time-temperatur transformation* untuk paduan 625 (Shankar, Rao and Mannan 2001)



**Gambar 2. 8** Diagram *time-temperatur-transformation* paduan 625.

Pada Inconel 625, terdapat banyak unsur-unsur yang terlibat dan memiliki peranannya masing-masing:

i. Nikel (Ni)

Nikel berfungsi sebagai matriks yang dapat melarutkan paduan lainnya, meningkatkan stabilitas termal menuju fase intermetalik. Selain itu nikel memiliki peran untuk meningkatkan ketahanan korosi pada lingkungan yang tidak akan teroksidasi walaupun memiliki kandungan Fe yang tinggi, tahan terhadap alkali, dan tahan terhadap *stress corrosion cracking* (SCC) walaupun kandungan klorin meningkat.

ii. Besi (Fe)

Ketika besi ditambahkan ke dalam paduan berbasis nikel, tujuannya adalah untuk mengurangi biaya dan meningkatkan pemanfaatan *scrap*. Apabila ditambahkan ke dalam paduan biner Ni-Fe akan memberikan karakteristik ekspansi termal yang rendah. Selain itu dapat

- meningkatkan kecenderungan untuk membentuk fase intermetalik yang merugikan, seperti sigma; dimana semakin tinggi level Cr, Mo, dan W, maka harus semakin rendah penambahan Fe untuk menjaga stabilitas metalurgi.
- iii. Mangan (Mn)  
Penambahan mangan berguna sebagai *deoxidizer* atau unsur yang berperan untuk dapat menghilangkan kandungan oksigen saat peleburan dilakukan. Namun penambahan unsur mangan dalam jumlah yang tinggi dapat mengganggu kestabilan struktur karena akan membentuk presipitasi intermetalik.
  - iv. Karbon (C)  
Unsur karbon yang ditambahkan dapat meningkatkan kekuatan material pada temperatur tinggi. Namun apabila penambahan unsur karbon dilakukan dalam jumlah yang tinggi akan dapat meningkatkan kemungkinan untuk terjadinya pembentukan karbida pada batas butir yang bersifat merugikan.
  - v. Silikon (Si)  
Silikon dapat meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan yang memiliki tingkat oksidasi tinggi dan lingkungan *non*-halida seperti asam sulfat dan asam nitrat. Terkadang penambahan unsur silikon dapat menyebabkan terjadinya pengerasan presipitasi melalui pembentukan  $\text{Ni}_3\text{Si}$ .
  - vi. Sulfur (S)  
Kandungan sulphur dapat mengurangi sifat ketahanan korosi pada sebuah logam. Terkadang penambahan unsur sulphur berguna untuk meningkatkan *machineability* tetapi tidak dalam jumlah yang banyak.
  - vii. Kobalt (Co)  
Penambahan unsur kobalt dapat meningkatkan ketahanan aus pada sebuah paduan. Namun penambahan unsur kobalt dalam jumlah yang tinggi dapat mengurangi ketahanan sebuah paduan Inconel terhadap *stress corrosion cracking*.

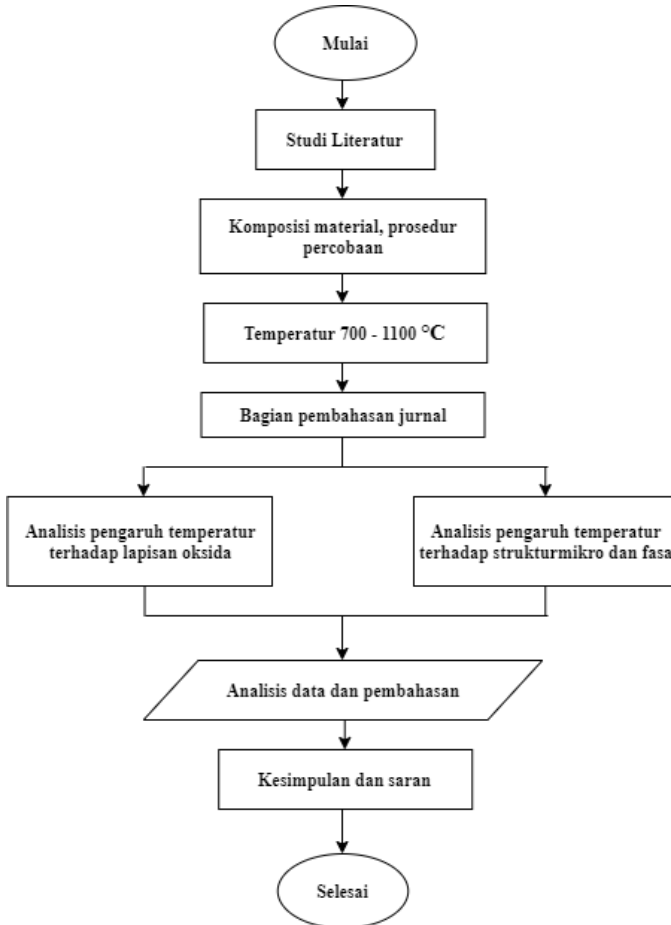
- 
- viii. Aluminium (Al)  
Peranan dari unsur aluminium adalah sebagai *deoxidizer*, jika digunakan pada temperatur tinggi dan dikombinasikan bersama krom maka akan dapat meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi namun dapat mengurangi ketahanan terhadap nitridasi.
  - ix. Titanium (Ti)  
Titanium umumnya ditambahkan sebagai stabilisasi agar tidak terjadi pembentukan kromium karbida dan memberikan pengerasan presipitasi.
  - x. Kromium (Cr)  
Penambahan kromium bertujuan untuk meningkatkan kemampuan tahan terhadap lingkungan dengan tingkat oksidasi yang tinggi. Jika dikombinasi dengan unsur Mo, W, dan N dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi lokal.
  - xi. Molibdenum (Mo)  
Kandungan Mo memiliki peran meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan yang *non*-oksidasi seperti HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Jika dikombinasi dengan Cr maka akan meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan halida.
  - xii. Niobium (Nb)  
Dengan penambahan unsur niobium, dapat mencegah terjadinya pembentukan kromium karbida atau juga dapat memberikan pengerasan presipitasi.
  - xiii. Tantalum (Ta)  
Dengan penambahan unsur tantalum, dapat mencegah terjadinya pembentukan kromium karbida (Revie and Uhlig 2011).
-

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Pembahasan Jurnal

### 3.2 Komposisi Kimia

Adapun komposisi kimia dari Inconel 625 dari setiap jurnal yang dibahas dan dirangkum pada Tabel 3.1, sebagai berikut:

**Tabel 3. 1** Komposisi Kimia Inconel 625

Inconel 625					
Unsur	Referensi				
	Malafaia, et al. (2020)	Fresnillo, et al. (2014)	(2011)		Buscail, et al. (2011)
			Thick	Strip	
Ni	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.
Cr	21,5	20-23	21,8	21,9	22,4
Mo	9	8-10	9,17	8,79	9,1
Fe	3,6	5	1,95	4,6	0,23
Nb	2,5	3,15-4,15	3,71	3,94	3,7
Mn	0,25	-	0,29	0,26	< 0,006
Al	0,2	-	0,15	0,23	0,12
Si	-	-	0,41	0,07	0,14
Ti	0,2	-	0,21	0,23	0,22
C	0,05	-	0,0081	0,0226	0,008
Ta	-	-	-	-	-
P	-	-	-	-	-
S	-	-	-	-	< 0,006
N	-	-	0,0481	0,0222	-
Co	-	-	-	-	0,033

### 3.3 Prosedur Penelitian Berdasarkan Jurnal

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan dari setiap jurnal yang dibahas sebagai berikut:

#### 3.3.1 Jurnal Malafaia, et al., 2020.

Prosedur penelitian yang telah dilakukan oleh Malafaia, dkk (2020) sebagai berikut:

1. Memotong spesimen menjadi bentuk cakram dengan diameter masing-masing 8 dan 2mm.

2. Mempersiapkan specimen dengan cara digosok menggunakan kertas SiC grit 320 dan 600 di dalam air, setelahnya diluruhkan menggunakan alkohol isopropyl.
3. Memasukkan spesimen ke dalam mesin *ultrasonic* selama 20 menit untuk dibersihkan, setelah itu dibiarkan di udara hingga mengering.
4. Memasukkan spesimen yang sudah dipersiapkan ke dalam wadah alumina.
5. Melakukan pengujian oksidasi *isothermal* pada temperatur 800 dan 1000 °C selama 120 dan 240 jam.
6. Melakukan resin pada spesimen yang belum diberi perlakuan oksidasi menggunakan resin fenolik setelah itu digosok dengan kertas SiC grit 320, 400, 600, 800, dan 1200. Spesimen dipoles dengan menggunakan alumina 1 dan 0,3  $\mu\text{m}$  dan silika koloid 0,04  $\mu\text{m}$  yang sudah diencerkan dengan menggunakan 50% volume air suling.
7. Melakukan pengujian karakterisasi mikrostruktur pada spesimen yang sudah diresin dan spesimen yang sudah diberi perlakuan oksidasi menggunakan SEM dan EDS.
8. Melakukan pengujian menggunakan XRD dengan rentang sudut 20-100°.

### 3.3.2 Referensi Fresnillo, et al., 2014.

Prosedur penelitian yang telah dilakukan oleh Fresnillo, dkk (2014) sebagai berikut:

1. Memotong spesimen menjadi dua tipe dengan ukuran 20 x 10 x 6 mm<sup>2</sup> (spesimen tebal) dan 20 x 10 x 0,5 mm<sup>2</sup> (spesimen tipis).
2. Mempersiapkan spesimen dengan cara digosok menggunakan kertas SiC grit 1200.
3. Meletakkan spesimen pada penyangga alumina dan dioksidasi dengan argon kering dengan tambahan uap air dalam jumlah yang sedikit. Proses oksidasi pada

- temperatur 700 °C menggunakan tungku vertical dengan waktu paparan maksimal mencapai 10.000 jam.
4. Melakukan percobaan nomor 3 untuk temperatur 750 dan 800 °C dengan menggunakan tungku horizontal. Setelah mencapai temperatur 300 °C, dialiri gas Ar-50% H<sub>2</sub>O hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Paparan maksimum untuk temperatur 750 °C juga mencapai 10.000 jam, sedangkan untuk 800 °C hanya mencapai 3000 jam.
  5. Melakukan penimbangan setiap 250 jam dengan toleransi  $\pm 0,01$  mg.
  6. Melakukan pelapisan dengan menggunakan lapisan emas tipis lalu dengan nikel secara elektrokimia pada spesimen yang telah dioksidasi. Spesimen yang telah dilapisi dimasukkan ke dalam resin epoksi.
  7. Melakukan pengujian menggunakan SEM, mikroskop optic, EDX/WDX, TEM, dan XRD.
  8. Menggosok spesimen yang telah diuji menggunakan kertas SiC grit 1200 hingga bagian yang belum tidak berdampak terlihat.
  9. Melakukan pengujian XRD kedua.

### 3.3.3 Referensi Chyrkin, et al., (2011)

Prosedur penelitian yang telah dilakukan oleh Chyrkin, dkk (2011) sebagai berikut:

1. Melakukan pemotongan spesimen menjadi dua tipe dengan ukuran 20 x 10 x 0,3 mm dan 20 x 10 x 1 mm.
2. Mempersiapkan spesimen dengan kertas SiC grit 1200.
3. Melakukan proses oksidasi secara terpisah pada temperatur 900 dan 1000 °C dengan waktu paparan selama 1000 jam pada udara dan dalam Ar-4% H<sub>2</sub>-2% H<sub>2</sub>O.
4. Melakukan penimbangan setiap 250 jam setelah didinginkan mencapai temperatur kamar.

5. Melakukan pelapisan nikel pada spesimen yang sudah teroksidasi.
6. Memasukkan spesimen pada resin epoksi dan dipersiapkan menggunakan kertas SiC grit 240-1200, lalu dipolishing.
7. Melakukan pengujian SEM dan EDX/WDX dengan metode *cross-section*.
8. Melakukan pengujian XRD setelah spesimen dioksidasi pada 900 °C selama 1000 jam untuk mengetahui komposisi fasa pada paduan saat temperatur 900 °C.
9. Lapisan oksida diratakan menggunakan kertas SiC grit 1200 hingga mendapatkan bagian spesimen yang tidak berdampak.
10. Melakukan pengujian XRD tambahan untuk mengetahui komposisi pada zona lapisan dan sub-lapisan oksida di permukaan.

#### 3.3.4 Referensi Buscail, et al. (2011)

Prosedur penelitian yang telah dilakukan oleh Buscail, dkk (2011) sebagai berikut:

1. Memotong material sesuai ukuran yang ditetapkan dengan tebal 1,6 mm dengan luas permukaan sebesar 5 cm<sup>2</sup>.
2. Mempersiapkan spesimen dengan menggunakan kertas SiC hingga grit 800.
3. Mencuci spesimen dengan etanol dan dikeringkan.
4. Melakukan pengujian oksidasi isothermal pada temperatur 900, 1000, dan 1100 °C selama 48 jam.
5. Melakukan pengujian XRD pada spesimen yang telah dioksidasi selama 2, 5, 24 atau 48 jam pada temperatur 900, 1000 atau 1100 °C dengan menggunakan derajat 2 $\theta$ .
6. Melakukan pengujian SEM dan EDS untuk mengetahui morfologi dari spesimen.

---

### 3.4 Pengujian Berdasarkan Jurnal

Berdasarkan review jurnal yang telah dilakukan, adapun pengujian yang akan dilakukan, yaitu:

#### 3.4.1 *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

*Scanning Electron Microscopy* (SEM) adalah tipe mikroskop elektron yang menghasilkan gambar dari suatu sampel dengan memindainya menggunakan pancaran elektron berenergi tinggi. Elektron berinteraksi dengan atom di dalam sampel sehingga menghasilkan berbagai sinyal yang memuat informasi tentang topografi permukaan, morfologi, komposisi (unsur dan senyawa beserta jumlah relatif masing-masing) menggunakan EDX (*Energy Dispersive X-Ray Analysis*). Cara kerja SEM dimulai dengan suatu sinar elektron yang dipancarkan dari *electron gun* yang dilengkapi dengan katoda filamen tungsten. Tungsten digunakan pada *electron gun* karena memiliki titik lebur tertinggi dan tekanan uap terendah dari semua logam, sehingga memungkinkan dipanaskan untuk emisi elektron. Kemudian elektron difokuskan pada *fine probe* yang di *scan* melintasi permukaan spesimen. Elektron yang dipancarkan diperkuat oleh adanya suatu kumparan. Pancaran electron yang mengenai specimen akan dihamburkan dan ditangkap oleh *backscatter electron* (BSE) dan *secondary electron detector*. Kemudian hasilnya akan diterjemahkan dan ditampilkan dalam bentuk gambar pada layar. Dari pantulan inelastis didapatkan sinyal elektron sekunder dan karakteristik sinar X sedangkan dari pantulan elastis didapatkan sinyal backscattered electron. Elektron sekunder menghasilkan topografi dari benda yang dianalisa, permukaan yang tinggi berwarna lebih cerah dari permukaan rendah. Sedangkan backscattered electron memberikan perbedaan berat molekul dari atom-atom yang menyusun permukaan, atom dengan berat molekul tinggi akan berwarna lebih cerah daripada atom dengan berat molekul rendah. “*Backscattered electron*” terlepas dari daerah sampel yang lebih dalam dan memberikan informasi terutama pada jumlah atom rata-rata dari sampel.

---

Peristiwa tumbukan berkas sinar electron, yaitu ketika memberikan energi pada sampel, dapat menyebabkan emisi dari sinar-x yang merupakan karakteristik dari atom-atom sampel. Energi dari sinar-x digolongkan dalam suatu tebaran energi spectrometer dan dapat digunakan untuk identifikasi unsur-unsur dalam sampel. Dalam penelitian ini, uji morfologi akan dilakukan untuk mengetahui bagaimana kondisi dari pada material Inconel 625 saat sebelum dan sesudah diberi perlakuan panas. Standar pengujian pengujian yang digunakan adalah ASTM E 2142.

### **3.4.2 X-ray Diffraction**

XRD merupakan pengujian yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan suatu senyawa dengan cara melihat pola pembiasan cahaya yang berasal dari berkas cahaya yang dibiaskan oleh material yang memiliki susunan atom pada kristalnya. Prinsip kerja XRD terdiri dari 4 tahap yaitu produksi, difraksi, deteksi dan interpretasi. Untuk dapat melakukan fungsinya, XRD dilengkapi oleh komponen-komponen penting seperti tabung sinar X, monochromator, detector dan lain-lain. Pada tahap produksi, elektron yang dihasilkan ketika filamen (katoda) dipanaskan akan dipercepat akibat perbedaan tegangan antara fiamen (katoda) dengan specimen target (anoda) sehingga terjadi tumbukan dengan spesimen target yang akan menghasilkan radiasi sinar-X yang keluar dari tabung sehingga berinteraksi dengan struktur kristal yang diuji. Selanjutnya, pada tahap difraksi material akan dianalisis struktur kristalnya harus berada dalam fasa padat karena dalam kondisi tersebut kedudukan atom-atomnya berada dalam susunan yang sangat teratur sehingga membentuk bidang kristal. Ketika sinar-X diarahkan pada bidang kristal tersebut, maka akan timbul pola-pola difraksi ketika sinar-X melewati celah-celah kecil di antara bidang-bidang kristal. Pada tahap selanjutnya, interferensi konstruktif radiasi sinar-X hasil difraksi struktur kristal material yang diuji akan dideteksi oleh detektor. Agar detektor dapat mendeteksi interferensi konstruktif radiasi sinar-X hasil difraksi struktur kristal, maka posisinya harus

berada tepat pada arah sudut pantul radiasi sinar-X tersebut. Tahap terakhir, interferensi konstruktif radiasi sinar-X yang telah dideteksi oleh detektor kemudian akan diperkuat oleh gelombang dengan menggunakan *amplifier*. Lalu interferensi konstruktif radiasi sinar-X tersebut akan terbaca secara spektroskopi sebagai puncak-puncak grafit yang akan ditampilkan oleh *display*. Standar pengujian pengujian yang digunakan adalah ASTM E963-95.

### **3.4.3 *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy***

*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS atau EDX atau EDAX) adalah salah satu teknik analisis untuk menganalisis unsur atau karakteristik kimia dari spesimen. Karakterisasi ini bergantung pada penelitian dari interaksi beberapa eksitasi sinar X dengan spesimen. Kemampuan untuk mengkarakterisasi sejalan dengan sebagian besar prinsip dasar yang menyatakan bahwa setiap elemen memiliki struktur atom yang unik, dan merupakan ciri khas dari struktur atom suatu unsur, sehingga memungkinkan sinar-X untuk mengidentifikasinya. Pengujian EDX ini dilakukan untuk mengetahui komposisi yang terkandung pada permukaan specimen Inconel 625 yang sudah diberi perlakuan panas. Standar pengujian pengujian yang digunakan adalah ASTM E 2142.

### **3.4.4 *Transmission Electron Microscope***

*Transmission Electron Microscope* merupakan sebuah mikroskop elektron yang cara kerjanya hampir sama dengan proyektor dimana elektron ditembakkan dari electron gun yang kemudian melewati oleh dua lensa kondenser yang berguna menguatkan dari elektron yang ditembakkan. Setelahnya, elektron diterima oleh spesimen tipis dan akan terjadi interaksi. Spesimen yang tipis menjadi alasan elektorn dan langsung diteruskan tiga lensa lainnya yaitu lensa objektif, lensa intermediate dan lensa proyektor. Lensa objektif merupakan lensa utama dari TEM karena batas penyimpangannya membatasi dari redolusi mikroskop, lensa intermediate sebagai penguat dari lensa objektif dan untuk lensa proyektor gunanya untuk menggambarkan pada layar flourescent



yang ditangkap film fotografi atau kamera CCD. Standar pengujian pengujian yang digunakan adalah ASTM D 7521.

### 3.5 Rancangan Pengujian Berdasarkan Jurnal

Adapun rancangan pengujian yang dilakukan dari setiap jurnal yang dibahas dan dirangkum dalam Tabel 3.2, sebagai berikut:

**Tabel 3. 2** Tabel Pengujian pada Inconel 625

Referensi	Material	Pengujian			
		SEM	EDX	XRD	TEM
(Malafaia, et al. 2020)	Inconel 625	✓	✓	✓	-
(Fresnillo, et al. 2014)		✓	✓	✓	✓
(Chyrkin, et al. 2011)		✓	✓	✓	-
(Buscail, et al. 2011)		✓	✓	✓	-

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

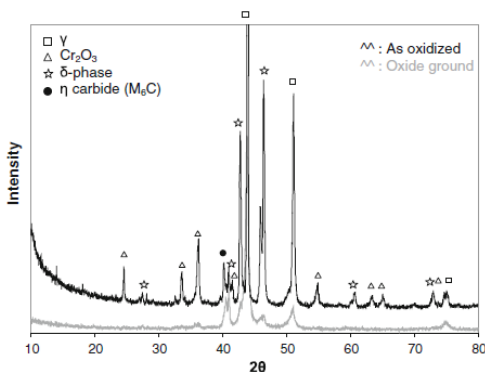
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada review jurnal yang telah dilakukan, didapatkan data yang akan dianalisis dan dibahas berdasarkan tujuan *paper review* ini.

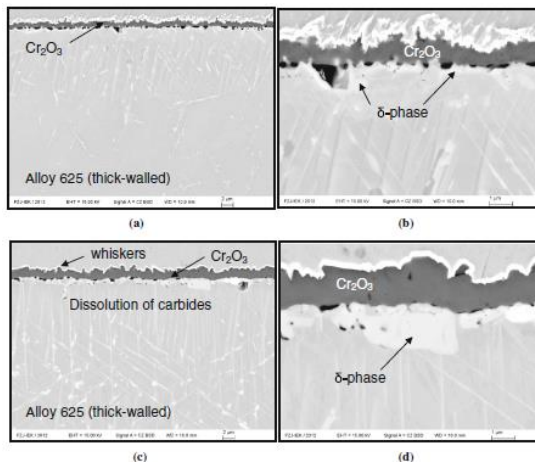
#### 4.1 Analisis Lapisan Oksida

Berdasarkan *paper review* yang telah dilakukan, pada Gambar 4.1 menunjukkan hasil analisis pengujian XRD dari penelitian yang dilakukan dan dibahas dalam jurnal Fresnillo, dkk (2014), yang melakukan pengujian pada temperatur 750 °C dalam lingkungan Ar-50% H<sub>2</sub>O. Hasil analisis pengujian ini digunakan untuk mendapatkan informasi lebih rinci mengenai berbagai fasa dan senyawa yang terbentuk pada wilayah dekat permukaan paduan yang sudah dioksidasi selama 10.000 jam dalam Ar-50% H<sub>2</sub>O. Berdasarkan pada Gambar 4.1, puncak-puncak yang terdeteksi oleh sinar-X berupa fasa gamma, delta dan M<sub>6</sub>C serta senyawa Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Kehadiran Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> juga dapat diamati pada hasil SEM pada Gambar 4.2.



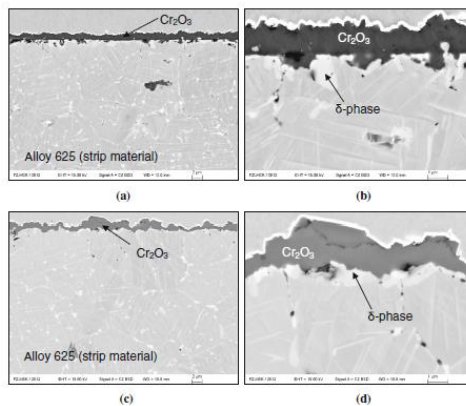
**Gambar 4. 1** Grafik pola difraksi sinar-X Inconel 625 tebal setelah oksidasi selama 10.000 jam pada temperatur 700 °C dalam Ar-50% H<sub>2</sub>O. (Fresnillo, 2014)

Gambar 4.2 menunjukkan analisis SEM terhadap Inconel 625 tebal. Spesimen dengan ukuran tebal akan membentuk *whisker* pada bagian luar lapisan oksida bertipe spinel. Fenomena ini terjadi terutama pada saat proses oksidasi menggunakan temperatur 700 °C dengan durasi paparan yang lama. Lapisan oksida bertipe spinel yang terbentuk dari unsur Cr atau Mn juga akan menunjukkan morfologi berupa *whisker* ketika dioksidasi pada temperatur 800-900 °C. Disadur dari (Higginson and Green 2011) dan (Jonsson, et al. 2009) yang menyebutkan bahwa *whisker* akan tumbuh dengan orientasi yang acak. Pertumbuhan *whisker* juga dipengaruhi oleh unsur-unsur tertentu, dalam kasus Inconel 625 adalah unsur Cr dan Mn. Selain itu pertumbuhan *whisker* biasanya terjadi ketika material dioksidasi pada kondisi *wet air*, namun juga tidak menutup kemungkinan terjadi pada udara kering. Mekanisme dari pertumbuhan *whisker* masih belum banyak dibahas pada banyak penelitian.



**Gambar 4. 2** Hasil citra SEM pada Inconel 625 tebal setelah dioksidasi selama 10.000 jam pada Ar-50%  $\text{H}_2\text{O}$  pada temperatur (a, b) 700 dan (c, d) 750 °C. (Fresnillo, 2014)

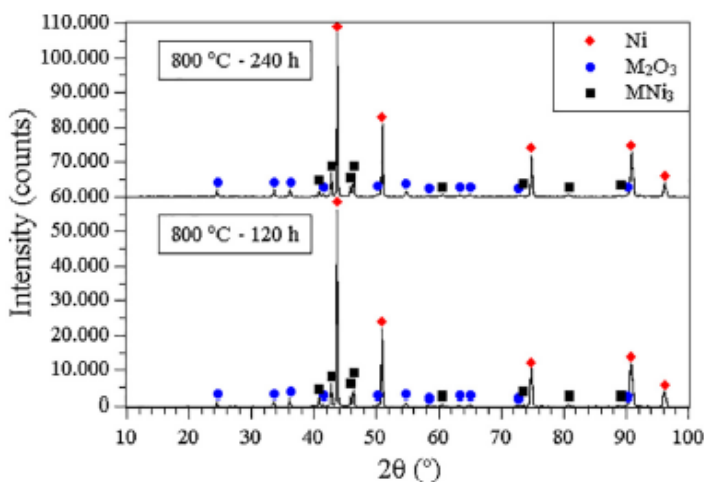
Material Inconel 625 *strip* yang sebelumnya dioksidasi selama 10.000 jam pada temperatur 700 dan 750 °C dalam Ar-50% H<sub>2</sub>O juga dianalisis dengan SEM *cross-section* yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 Berdasarkan hasil SEM menunjukkan bahwa pada Inconel 625 *strip* tidak mengalami pembentukan *whisker* pada permukaannya. Perbedaan ini menunjukkan bahwa jumlah komposisi kimia dari lapisan oksida bertipe spinel yang terbentuk bergantung pada temperatur pengujian dan komposisi kimia dari paduan yang digunakan.



**Gambar 4. 3** Hasil citra SEM pada Inconel 625 *strip* setelah oksidasi selama 10.000 jam pada temperatur (a, b) 700 dan (c, d) 750 °C dalam Ar-50% H<sub>2</sub>O. (Fresnillo, 2014)

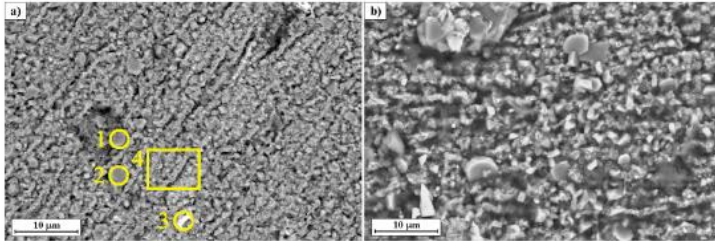
Sedangkan Gambar 4.4 merupakan difraktogram Inconel 625 yang telah dioksidasi pada temperatur 800 °C selama 120 dan 240 jam yang dibahas pada jurnal Malafaia, dkk (2020). Terlihat pada Gambar 4.4 bahwa matriks yang kaya akan Ni dan fase intermetalik MNi<sub>3</sub> dapat terdeteksi. Menurut analisis EDS dan simulasi termodinamika yang telah dilakukan logam M tersebut adalah Nb atau Mo. Kehadiran M<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 memiliki intensitas yang rendah, hal ini dapat

disebabkan karena ketebalan lapisan oksida yang tipis, hal ini merujuk pada  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada difraktogram material yang dideteksi saat dioksidasi pada 120 maupun 240 jam. Fase  $\text{MNi}_3$  yang dideteksi saat pengujian XRD dapat dikonfirmasi bahwa itu adalah fase  $\delta$ , pernyataan tersebut diperkuat dengan analisis SEM / EDS dan juga dibandingkan dengan literatur lain yang menyebutkan bahwa jumlah fase  $\delta$  yang tinggi pada permukaan logam akan memungkinkan fase tersebut dapat terdeteksi saat pengujian XRD.



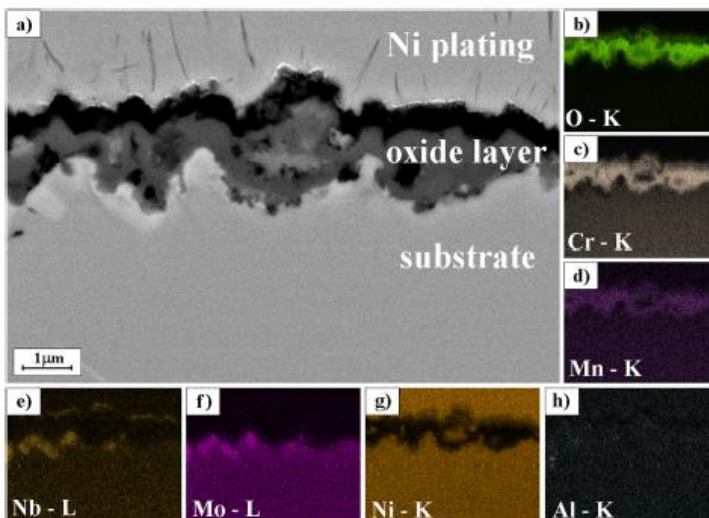
**Gambar 4. 4** Grafik pola difraksi sinar-X Inconel 625 setelah oksidasi pada temperatur 800 °C selama 120 dan 240 jam. (Malafaia, 2020)

Gambar 4.5 menunjukkan hasil permukaan dari Inconel 625 yang telah dioksidasi pada temperatur 800 °C selama 120 dan 240 jam yang diamati menggunakan *backscattered electron*.



**Gambar 4. 5** Permukaan Inconel 625 setelah dioksidasi pada 800 °C selama (a) 120 dan (b) 240 jam. (Malafaia, 2020)

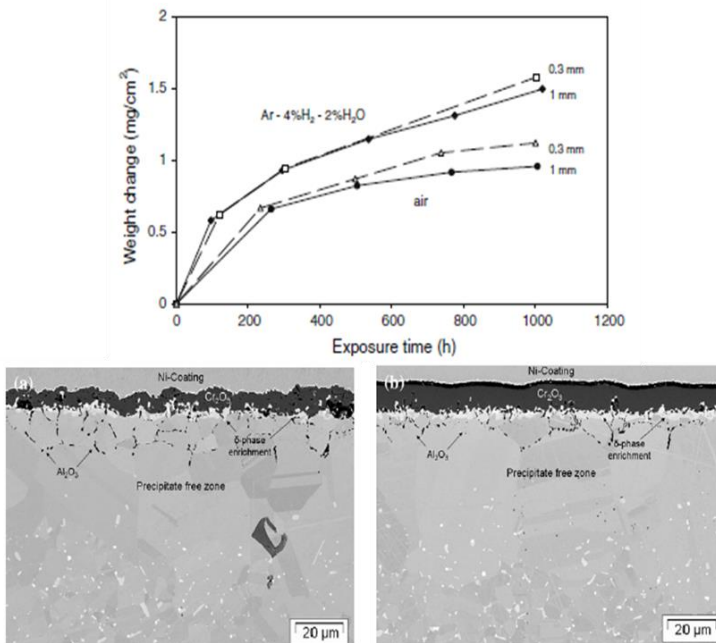
Pada Gambar 4.5 terlihat bahwa permukaan spesimen yang sebelumnya sudah dioksidasi pada temperatur 800 °C selama 120 dan 240 jam. Bagian (a) menunjukkan beberapa titik yang kemudian diidentifikasi menggunakan EDS dan menunjukkan bahwa terdapat unsur Cr dan O di sana. Hal ini disebutkan bahwa lapisan oksida yang kaya akan unsur Cr dan O yang dimaksud adalah  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Sedangkan pada titik yang diberi nomor 3 pada Gambar 4.5 terlihat lebih terang dikarenakan kadar unsur Cr dan O terdapat dalam jumlah yang relatif rendah. Hal ini menyebabkan kadar Ni, Nb dan Mo cenderung dapat mendominasi sehingga proses oksidasi akan berjalan lebih lambat pada wilayah yang dimaksud. Sedangkan bagian (b) merupakan perbesaran dari partikel atau butiran dari spesimen yang sudah dioksidasi pada temperatur 800 °C selama 240 jam.



**Gambar 4. 6** Cross-section dari Inconel 625 setelah dioksidasi pada temperatur 800 °C selama 240 jam. (Malafaia, 2020)

Sedangkan pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa lapisan oksida yang terbentuk terutama tersusun dari kromium, meskipun dapat dilihat bahwa Mn juga tampak terdistribusi secara homogen dalam lapisan oksida. Adanya jumlah Mn pada paduan ini dapat dibuktikan dengan melihat pada diagram fasa Cr-Mn-O dimana ada kemungkinan bahwa unsur Mn (0,25%) ini akan terlarut dalam kromia. Unsur Mn juga mampu membentuk lapisan oksida bertipe spinel yang kaya akan Mn, bergantung pada temperatur operasi yang digunakan juga komposisi kimia dari paduan.

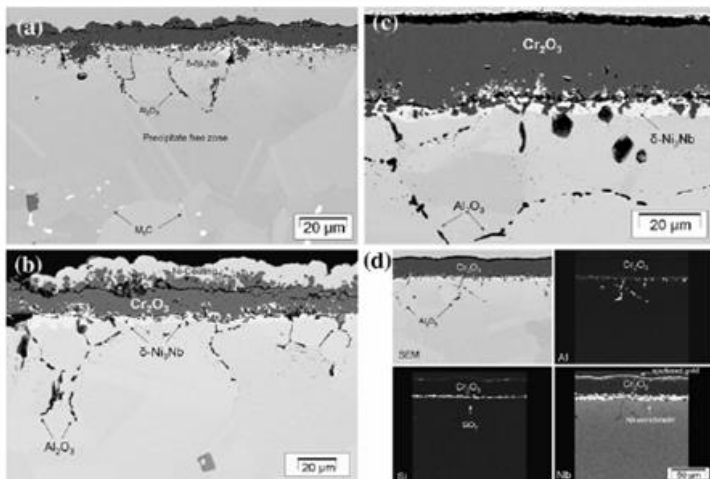
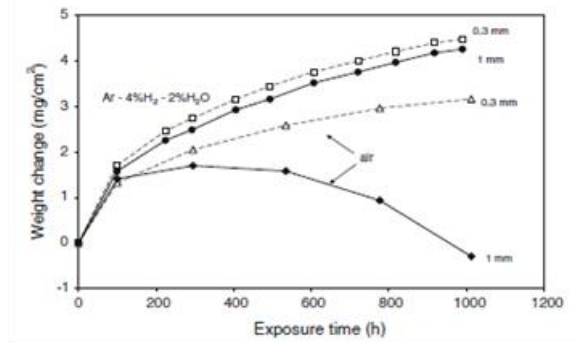




**Gambar 4. 7** Kurva penambahan massa dan hasil citra SEM permukaan pada Inconel 625 dengan tebal 1 dan 0,3 mm selama proses oksidasi pada temperatur 900 °C (a) di udara dan (b) Ar – 4% H<sub>2</sub>–2% H<sub>2</sub>O. (Chyrkin, 2011)

Pada Gambar 4.7 menunjukkan data penambahan massa selama paparan pada temperatur 900 °C di udara dan di lingkungan Ar-4% H<sub>2</sub>-2% H<sub>2</sub>O dan lapisan oksida yang terbentuk yang dibahas dalam jurnal penelitian Chyrkin, dkk (2011). Lapisan oksida yang terbentuk sebagian besar terdiri dari kromia, dimana ketebalan lapisan oksida ini sesuai dengan data penambahan massa. Laju *scalling* (pembentukan lapisan oksida) pada spesimen yang lebih tipis (0.3 mm) sedikit lebih tinggi dibanding dengan specimen yang lebih tebal. Specimen yang terpapar Ar-4%H<sub>2</sub>-2%H<sub>2</sub>O membentuk kerak yang lebih tebal dan lebih halus dibanding dengan yang

terpapar pada udara. Kehadiran uap air ( $H_2O$ ) pada lingkungan oksidasi dapat mengubah proses degradasi pada berbagai jenis logam. Dari penelitian yang telah dilakukan Kubaschewski & Hopkins pada tahun 1962,  $H_2O$  dapat meningkatkan laju oksidasi, menyebabkan terbentuknya lapisan kerak, serta meningkatkan kebutuhan krom untuk membentuk lapisan yang protektif. Jumlah yang sangat sedikit dari presipitasi oksida aluminium internal terbentuk terutama pada batas butir paduan, menunjukkan zona *sub-scale* secara jelas setelah oksidasi  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  dimana awal presipitasi terjadi, akhirnya larut. Setelah 1000 jam eksposur zona ini memiliki lebar sekitar  $60\text{ }\mu\text{m}$ . Presipitasi alumina pada batas butir paduan sekitar interface antara oksida/paduan terlihat menstabilkan mikrostruktur original dari paduan di bawah kerak oksida dengan cara menghambat rekristalisasi butir-butir yang semula kecil menjadi besar yang ditemukan pada zona bebas presipitasi. Terlepas dari peleburan fasa kaya akan Mo dan/atau Nb pada zona ini, pengkayaan presipitasi  $\delta$  tampaknya terjadi di sekitar interface paduan/oksida. Analisis EDX pada Gambar 4.8 dan perbandingan dengan hasil pada bagian sebelumnya jelas menunjukkan adanya fase  $\delta$  pada interface antar oksida/paduan.

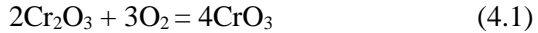


**Gambar 4. 8** Kurva penambahan massa dan hasil citra SEM Inconel 625 dengan tebal (a) 0.3 mm dan (b) 1 mm (c) setelah proses oksidasi pada temperatur 1000 °C pada Ar – 4% H<sub>2</sub>–2% H<sub>2</sub>O, (d) distribusi elemen setelah proses oksidasi. (Chyrkin, 2011)

Pada Gambar 4.8 juga menunjukkan data penambahan massa selama paparan pada temperatur 1000 °C di udara dan di lingkungan Ar-4% H<sub>2</sub>-2% H<sub>2</sub>O dan lapisan oksida yang terbentuk

sebagian besar terdiri dari kromia, dimana ketebalan lapisan oksida ini sesuai dengan data penambahan massa. Proses oksidasi yang dilakukan memiliki proses yang serupa dengan proses oksidasi temperatur 900 °C, namun oksida yang terbentuk lebih mungkin untuk mengalami *spallation* yang terjadi pada temperatur 1000 °C, untuk spesimen dengan tebal 1 mm dan dioksidasi di udara. Selama oksidasi pada temperatur 1000 °C, lapisan oksida yang terbentuk juga serupa dengan yang terbentuk pada temperatur 900 °C, secara kualitatif terbentuk oleh kromia dan juga ditemukan sedikit oksida aluminium akibat adanya oksidasi internal. Walaupun pada spesimen dengan ukuran lebih tipis juga tidak menunjukkan kehilangan massa yang cukup besar pada kurva, retakan paralel *interface* lapisan oksida dengan paduan terdapat di bagian luar lapisan kromia seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 bagian (a). Sedangkan retakan juga terlihat dalam lapisan oksida yang terbentuk pada spesimen berukuran tebal yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 bagian (b). Sebaliknya, lapisan oksida yang terbentuk saat dioksidasi pada Ar-4% H<sub>2</sub>-2% H<sub>2</sub>O terlihat tebal, halus, dan tidak menunjukkan adanya tanda-tanda *spallation* setelah paparan 1000 jam pada temperatur 1000 °C yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 bagian (c). Menurut jurnal Colas pada tahun 2020, *spallation* merupakan proses yang terjadi dikarenakan adanya tegangan sisa yang tinggi. Dimana perbedaan koefisien ekspansi termal dan temperatur juga salah satu yang mempengaruhi tegangan sisa. Disebutkan pada jurnal Colas bahwa perbedaan koefisien ekspansi termal ini kemungkinan merupakan faktor utama terjadinya proses spallasi, karena nilai koefisien ekspansi termal dari Inconel 625 dengan kromia yang terbentuk sekitar 12 dan 9  $\mu\text{m m}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Hal lain yang dapat menyebabkan terjadinya *weight loss* atau kehilangan massa adalah menguapnya lapisan oksida. Menurut jurnal Rakowski pada tahun 2005 disebutkan bahwa efek dari uap air saat oksidasi yang dilakukan pada superalloy selain terjadi oksidasi *breakaway* atau yang menyebabkan spalasi, juga dapat berupa penguapan lapisan oksida. Kromia merupakan salah satu jenis lapisan oksida yang dapat menguap. *Volatile* dari kromia akan

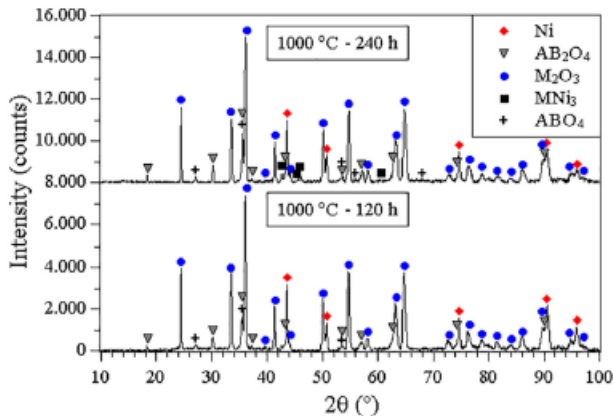
muncul pada temperatur di atas 1000 °C tanpa adanya uap air. *Volatile* kromia berupa kromium trioksida yang dapat dilihat pada persamaan 4.1.



Uap air dapat meningkatkan laju penguapan dari kromia pada temperatur yang lebih rendah. Hal ini terjadi karena membentuk senyawa *volatile oxyhydroxides* dari kromium atau *chromium oxyhydroxides* sesuai persamaan 4.2. Penguapan yang terjadi pada lapisan oksida dapat mengakibatkan kehilangan kromium dari logam substrat ke lingkungan sekitar.



Setelah proses oksidasi selesai dilakukan terhadap kedua jenis spesimen pada kedua lingkungan pengujian, zona *sub-scale* endapan yang terbentuk seperti yang diamati pada oksidasi 900 °C mengalami peningkatan ketebalan menjadi 175 µm setelah dipapar selama 1000 jam. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur yang digunakan maka akan meningkatkan laju oksidasi dan meningkatkan koefisien difusi dari kromium. Pengamatan juga dilakukan pada zona endapan yang terbentuk dimana setelah 1000 jam, ketebalan lapisan ini sekitar 3µm. Analisis yang dilakukan menggunakan EDX dan WDX mengungkapkan bahwa fase yang membentuk lapisan ini bukanlah  $\text{M}_6\text{C}$  yang ada dalam mikrostruktur paduan. Pada Gambar 4.8 bagian (d) terlihat dalam pemetaan elemen, fase yang terbentuk kaya akan niobium dan menurut spektrum dari EDX fase tersebut hanya mengandung molybdenum dalam jumlah yang kecil. Disebutkan di dalam jurnal bahwa setelah melakukan analisis kuantitatif dapat diidentifikasi fase tersebut adalah fase-δ dengan perkiraan komposisi sebesar 74 %Ni, 13 %Nb, 2,5 %Cr, 9 %Mo, dan 1 %Fe; komposisi fase tersebut juga ditemukan pada spesimen yang dioksidasi pada temperatur 900 °C.

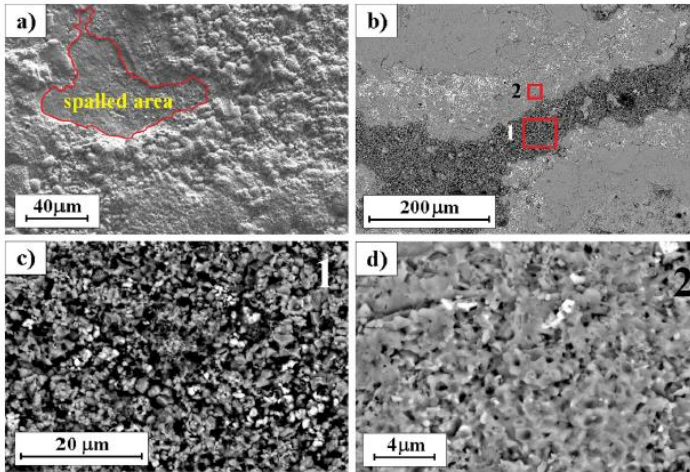


**Gambar 4. 9** Grafik pola difraksi sinar-X Inconel 625 setelah paparan pada temperatur 1000 °C selama 120 dan 240 jam. (Malafaia, 2020)

Gambar 4.9 merupakan difraktogram dari Inconel 625 setelah dioksidasi selama 120 dan 240 jam pada temperatur 1000 °C yang dibahas pada jurnal Malafaia, dkk (2020). Matriks  $\gamma$  terlihat dan diamati sebagai puncak  $M_2O_3$  terlihat lebih kuat dibandingkan dengan paduan yang teroksidasi pada temperatur 800 °C, lapisan oksida ini adalah  $Cr_2O_3$ . Selain itu dua oksida lain dengan struktur  $AB_2O_4$  dan  $ABO_4$  juga teridentifikasi, namun tidak terdapat pada sampel yang sudah dioksidasi pada 800 °C. Oksida pertama mungkin adalah  $(Mn, Cr)_3O_4$  bertipe spinel, sedangkan oksida lain yang memungkinkan adalah  $CrNbO_4$ , hal ini disebutkan berlaku untuk Inconel 718 dan teridentifikasi setelah dioksidasi pada 900 °C.

Pada Gambar 4.10 (a) menunjukkan permukaan dari Inconel 625 setelah dioksidasi selama 120 jam pada temperatur 1000 °C dengan adanya lapisan oksida yang pecah (*spalled*). Analisis EDS mengidentifikasi bahwa keberadaan Cr dan O ditemukan pada lapisan oksida tersebut, selain itu juga menunjukkan pembentukan  $Cr_2O_3$  sama seperti Inconel 625 yang mengalami proses oksidasi pada temperatur 800 °C. Sedangkan pada Gambar 4.10 (b)

menunjukkan lapisan oksida yang pecah juga terjadi pada permukaan material Inconel 625 yang dioksidasi pada 240 jam.



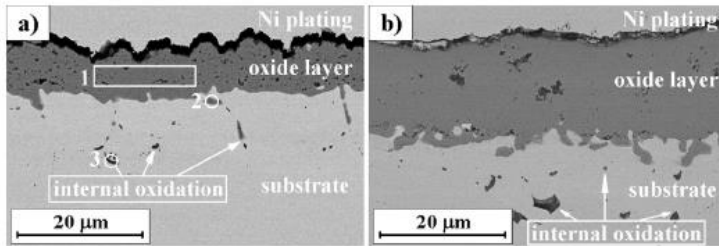
**Gambar 4. 10** Permukaan atas Inconel 625 setelah terpapar pada temperatur 1000 °C selama (a) 120 jam diamati dengan *secondary electron detector* dan (b, c, d) 240 jam diamati dengan *backscattered electron detector*. (Malafaia, 2020)

Pada bagian (a) tampak bahwa permukaan menjadi tidak rata dan ada beberapa lapisan oksida yang pecah. Berdasarkan analisis EDS yang telah dilakukan dapat diidentifikasi bahwa keberadaan unsur Cr dan O untuk membentuk  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  sama seperti yang terbentuk pada spesimen yang diberi paparan pada temperatur 800 °C. Sedangkan pada bagian (b), (c), dan (d) merupakan gambar yang saling terkait, dimana bagian (c) dan (d) merupakan perbesaran analisis EDS pada poin 1 dan 2 yang ditunjukkan pada bagian (b). Bagian (c) menunjukkan bahwa terdapat unsur Cr dan O dalam jumlah yang sedikit, juga mendeteksi elemen lain seperti Nb, Ni, Si, dan Ti. Sedangkan pada bagian (d) hanya mengandung Cr dan O. Peristiwa lapisan oksida yang pecah juga tampak terjadi

pada spesimen yang diberi pengujian oksidasi selama 240 jam. Terlepas dari lapisan oksida yang mengalami *spallation*, Inconel 625 yang sudah dioksidasi tersebut masih memiliki ketahanan oksidasi yang tinggi dengan sisa oksida pada zona *spalled*. Apabila Gambar 4.10 dibahas lebih lanjut menggunakan metode *cross-section* maka dapat dilihat pada Gambar 4.11. Pada Gambar 4.11 tersebut juga menunjukkan struktur mikro pada Inconel 625 yang sudah diberi pengujian oksidasi selama 120 dan 240 jam pada temperatur 1000 °C. Terlihat bahwa ketebalan lapisan oksida yang terbentuk mengalami peningkatan dari yang semula  $7,9 \pm 1,0 \mu\text{m}$  selama 120 jam menjadi  $15,5 \pm 0,9 \mu\text{m}$  saat mencapai 240 jam. Lapisan oksida yang terbentuk selama waktu paparan 240 jam lebih tebal dan lebih tinggi 10x daripada lapisan oksida saat dipapar 800 °C pada durasi yang sama. Poin 1 yang ditunjuk pada Gambar 4.12 juga menunjukkan adanya Cr dan O di dalam lapisan oksida yang terbentuk, juga disebutkan dalam literatur lain bahwa lapisan oksida Inconel 625 yang dipapar selama 1000 jam pada temperatur 1000 °C akan menghasilkan lapisan  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Hal ini juga disebutkan dalam jurnal Chrykin, dkk (2011), pada Gambar 4.8 menunjukkan perubahan massa selama pengujian berlangsung pada temperature 900 °C dalam lingkungan udara biasa dan  $\text{Ar-4\%H}_2\text{-2\%H}_2\text{O}$ . Ketebalan dari lapisan oksida yang terbentuk terhadap waktu paparan bersifat parabola. Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 4.11 bahwa setelah spesimen terpapar pada temperatur 900 °C, zona di bawah lapisan oksida yang terbentuk terjadi presipitasi awal, setelah terpapar selama 1000 jam zona ini melebar hingga mendekati 60  $\mu\text{m}$ .

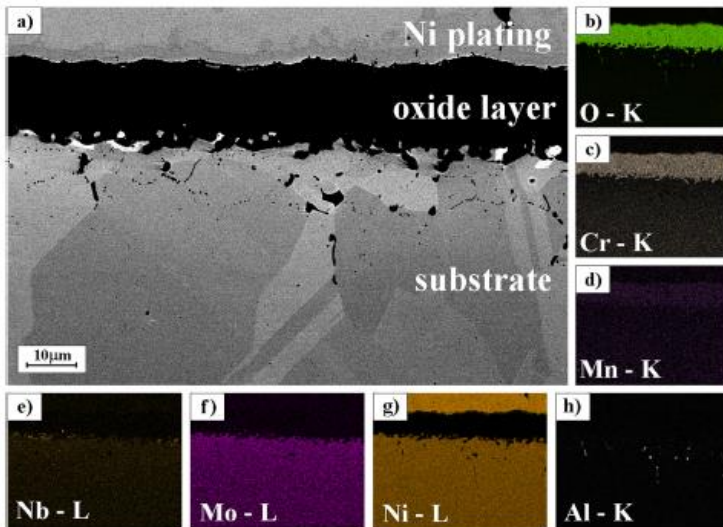
Pada Gambar 4.11 juga menunjukkan adanya lapisan Ni di atas permukaan lapisan oksida yang terbentuk. Disadur dari jurnal (Agboola, Sadiku and Olusesan 2012) yang menyebutkan pelapisan Ni dengan metode elektrokimia atau yang biasa disebut dengan Ni plating bertujuan untuk meningkatkan kemampuannya dalam hal ketahanan korosi dan ketahanan aus.





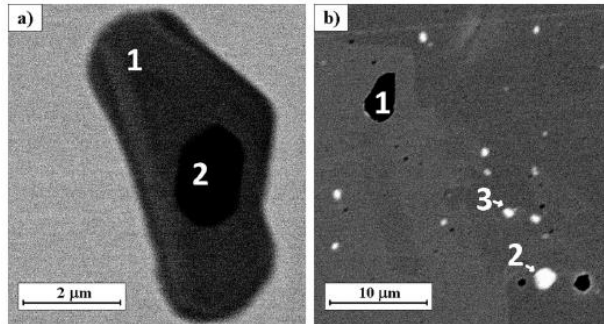
**Gambar 4. 11** Permukaan Inconel 625 yang diamati dengan BSE-SEM setelah dioksidasi pada 1000 °C selama (a) 120 dan (b) 240 jam. (Malafaia, 2020)

Gambar 4.12 merupakan hasil pengujian dari jurnal Malafaia, dkk (2020) menggunakan EDX pada Inconel 625 yang sebelumnya sudah dioksidasi pada temperatur 1000 °C selama 240 jam. Dominasi unsur Cr dan O pada lapisan oksida yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 menunjukkan kemungkinan lapisan oksida yang terbentuk adalah  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Disebutkan juga terdapat sedikit kontribusi unsur Mn yang berfungsi membentuk lapisan oksida berupa spinel. Pembentukan lapisan oksida berbentuk  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  juga dibahas pada saat temperatur oksidasi 800 °C.



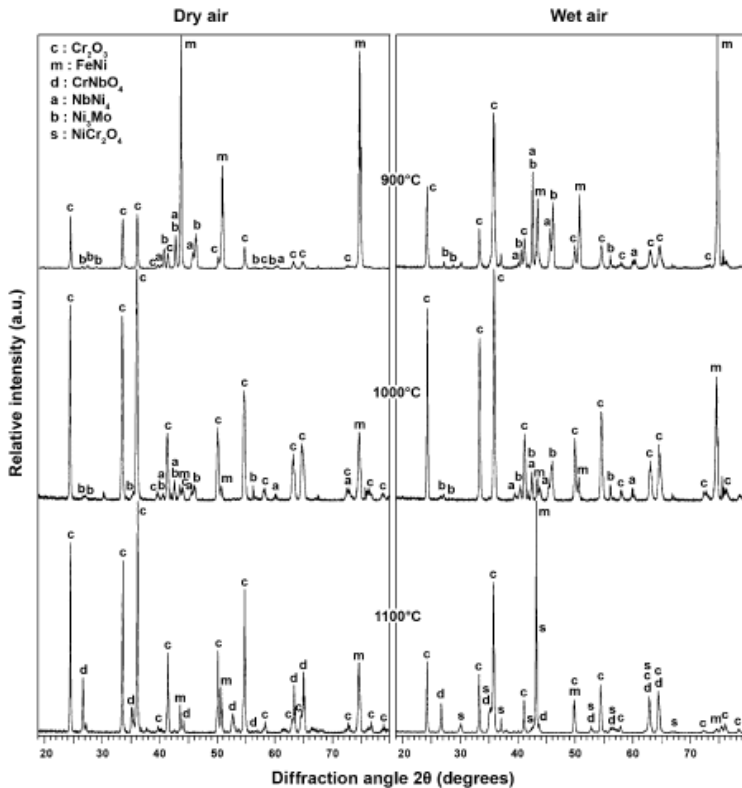
**Gambar 4. 12** Cross-section dari Inconel 625 setelah dioksidasi pada 1000 °C selama 240 jam (a) diamati dengan *backscattered electrons detector* dan (b sampai h) EDS maps. (Malafaia, 2020)

Pada Gambar 4.13 (a) menunjukkan bagian yang terdapat partikel gelap di tengahnya. Warna gelap pada hasil pengujian EDX menunjukkan lapisan oksida yang terbentuk. Setelah dilakukan analisis dengan EDS, poin yang diberi nomor 1 dan 2 menunjukkan adanya Ti (29,6%) dan N (37,7%), sedangkan dibagian paling gelap mengandung Mg (38,6%) dan O (37,7%). Sedangkan pada (b), partikel yang lebih gelap dan lebih terang seperti pada Gambar 4.13, akan ditemukan ketika Inconel 625 diberi perlakuan panas selama 240 jam. Partikel gelap mengandung Ti (31,6%) dan N (41,4%), namun juga mengandung Nb (4,5 %) dan C (22,5%). Untuk poin 2 dan 3 pada (b) menunjukkan Nb (23,0 dan 20,45) dan C (69,3 dan 69,9%). Dengan simulasi termodinamika yang sudah dilakukan pada temperatur 1000 °C, fase yang diharapkan adalah  $M_6C$  dan MC.



**Gambar 4. 13** Detail endapan pada permukaan Inconel 625 setelah terpapar pada temperatur 1000 °C selama (a) 120 dan (b) 240 jam. (Malafaia, 2020)

Gambar 4.14 menunjukkan difraktogram dari Inconel 625 yang telah dioksidasi selama 48 jam pada temperatur 900, 1000 dan 1100 °C yang dibahas pada jurnal Buscail pada tahun 2011. Penelitian tersebut dilakukan pada dua jenis lingkungan, *dry air* dan *wet air*. Pada *dry air*, difraksi sinar-X menunjukkan adanya  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NbNi}_4$  dan  $\text{Ni}_3\text{Mo}$  setelah dioksidasi pada temperature 900 sampai dengan 1000 °C. Sedangkan pada saat dioksidasi pada temperature 1100 °C, struktur dari skala oksida yang terbentuk berbeda yaitu terdiri dari  $\text{CrNbO}_4$ . Setelah diamati pada lingkungan *dry air* struktur dari skala oksida tidak mengalami perubahan. Kromia, intermetalik  $\text{NbNi}_4$  dan  $\text{Ni}_3\text{Mo}$  terbentuk sejak pertama kali dioksidasi hingga akhir selama oksidasi dilakukan pada temperatur 900 sampai dengan 1000 °C. Sedangkan pada saat temperatur oksidasi meningkat mencapai 1100 °C,  $\text{NbNi}_4$  dan  $\text{Ni}_3\text{Mo}$  tidak akan terdeteksi lagi melainkan  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  dan  $\text{CrNbO}_4$  yang akan terbentuk sejak awal oksidasi.

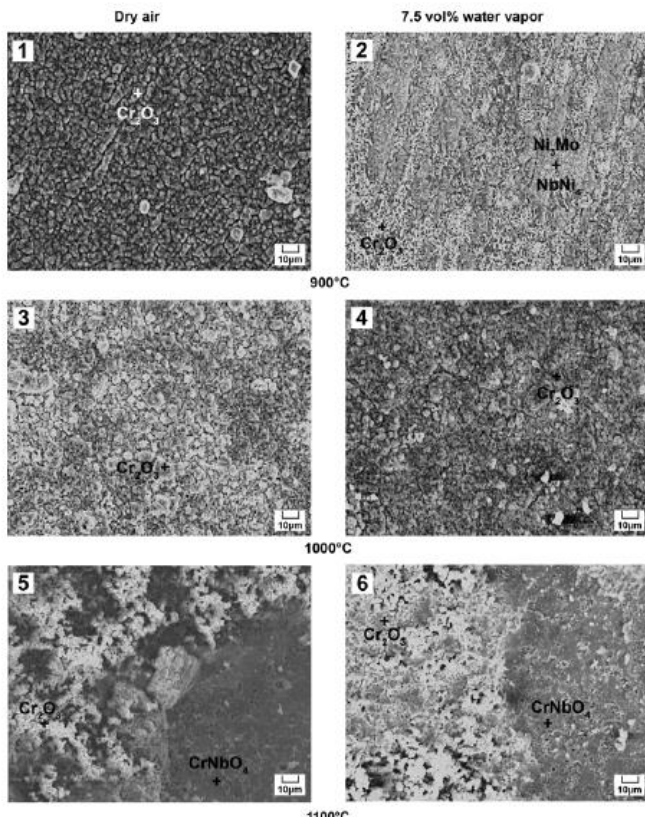


**Gambar 4. 14** Grafik pola difraksi sinar-X spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperature 900, 1000 dan 1100 °C di lingkungan *dry air* dan *wet air*. (Buscail, 2011)

Pada *dry air* perbandingan hasil dari XRD pada temperatur pengujian dengan setelah diberi pendinginan mencapai temperatur kamar menunjukkan bahwa oksida dan terdeteksi tidak mengalami transisi fasa apapun selama proses pendinginan. Sedangkan pada lingkungan *wet air*, sinar-X menunjukkan  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NbNi}_4$ , dan  $\text{Ni}_3\text{Mo}$  setelah dioksidasi pada temperature 900 dan 1000 °C. Pada

temperature 1100 °C oksida yang terbentuk terdiri dari kromia dan  $\text{CrNbO}_4$ . Hal ini menunjukkan bahwa 7,5% vol  $\text{H}_2\text{O}$  tidak mempengaruhi komposisi dari skala oksida yang terbentuk.

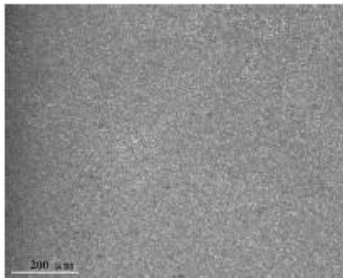
Pada Gambar 4.15 menunjukkan morfologi permukaan dari skala oksida yang terbentuk pada paduan 625 yang telah dioksidasi selama 48 jam dalam lingkungan *dry* atau *wet air*.



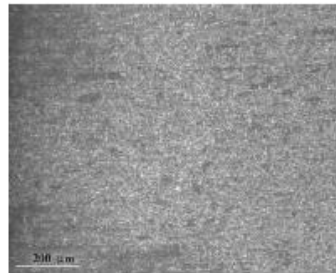
**Gambar 4. 15** Hasil citra SEM pada permukaan spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperature (1, 2) 900, (3, 4) 1000 dan (5, 6) 1100 °C di lingkungan *dry air* dan *wet air*. (Buscail, 2011)

Pada saat temperatur oksidasi sebesar 900 – 1000 °C, skala oksida tidak mengalami spallasi. Pengukuran butir kromia yang dilakukan menunjukkan bahwa pada temperatur 900 dan 1000 °C tidak ada perbedaan yang dapat terdeteksi antara *dry air* dan *wet air*. Ukuran butir kromia rata-rata sekitar 4 µm pada temperatur 900 °C, dan sebesar 5 µm pada saat temperatur 1000 °C. Sedangkan pada temperatur 1100 °C menunjukkan bahwa ukuran rata-rata butir kromia sebesar 5 µm dalam *dry air*, tetapi 20% lebih rendah pada kondisi *wet air* (4 µm).

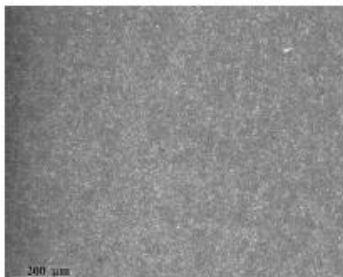
Gambar 4.16 menunjukkan hasil dari mikroskop optik pada spesimen yang telah dioksidasi selama 48 jam pada temperatur 900, 1000, dan 1100 °C dalam kondisi *dry air* dan *wet air*. Efek dari adanya uap air pada butir kromia tidak terlihat saat spesimen dioksidasi pada temperatur 900 – 1000 °C, tetapi terlihat pada saat temperatur oksidasi sebesar 1100 °C. Pada temperatur 1100 °C dalam kondisi *dry air*, 25% dari skala oksida yang terbentuk akan mengalami spallasi selama proses pendinginan. Dalam kondisi *dry air*, skala oksida yang terbentuk terdiri dari 2 skala. Skala kromia yang terletak pada eksternal mengalami spallasi sedangkan subskala internal akan tetap melekat pada permukaan substrat. Berdasarkan analisis EDS, menunjukkan adanya kromium dengan oksigen pada skala eksternal dan menunjukkan keberadaan oksigen, kromium, dan niobium dalam subskala internal. Hasil analisis EDS ini menunjukkan bahwa skala oksida yang terbentuk adalah Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan CrNbO<sub>4</sub>.



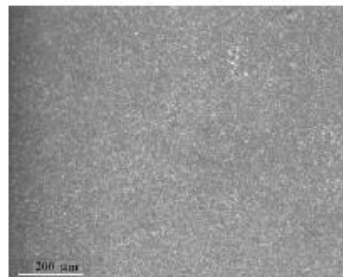
SY 625, Dry air, 900°C, 48h (x 100)  
No scale spallation



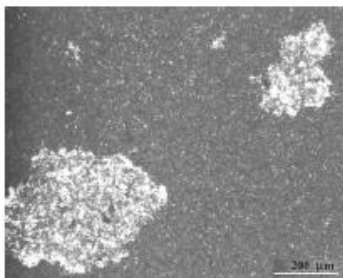
SY 625, 7.5 vol.% H<sub>2</sub>O, 900°C, 48h (x 100)  
No scale spallation



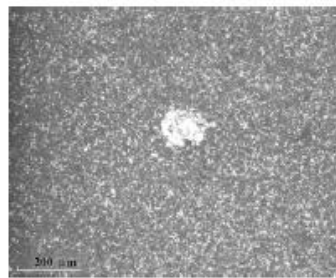
SY 625, Dry air, 1000°C, 48h (x 100)  
No scale spallation



SY 625, 7.5 vol.% H<sub>2</sub>O, 1000°C, 48h (x 100)  
No scale spallation



SY 625, Dry air, 1100°C, 48h (x 100)  
White zones: spalled areas

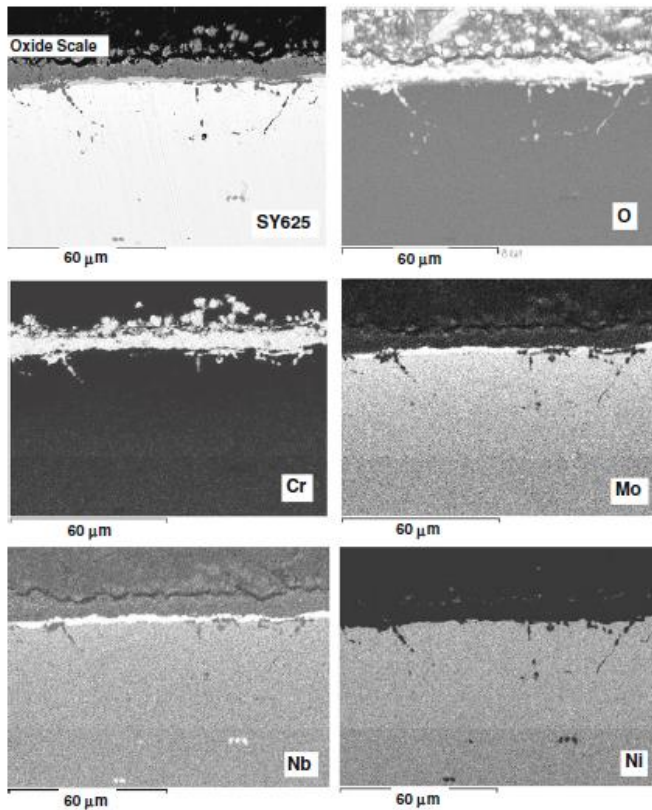


SY 625, 7.5 vol.% H<sub>2</sub>O, 1100°C, 48h (x 100)  
White zones: spalled area (the only one)

**Gambar 4. 16** Hasil mikroskop optik pada spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperature 900, 1000 dan 1100 °C di lingkungan *dry air* dan *wet air*. (Buscail, 2011)



Sedangkan dalam kondisi *wet air*, skala oksida yang terbentuk terlihat lebih melekat. Satu-satunya skala oksida yang mengalami spallasi terlihat pada Gambar 4.16.

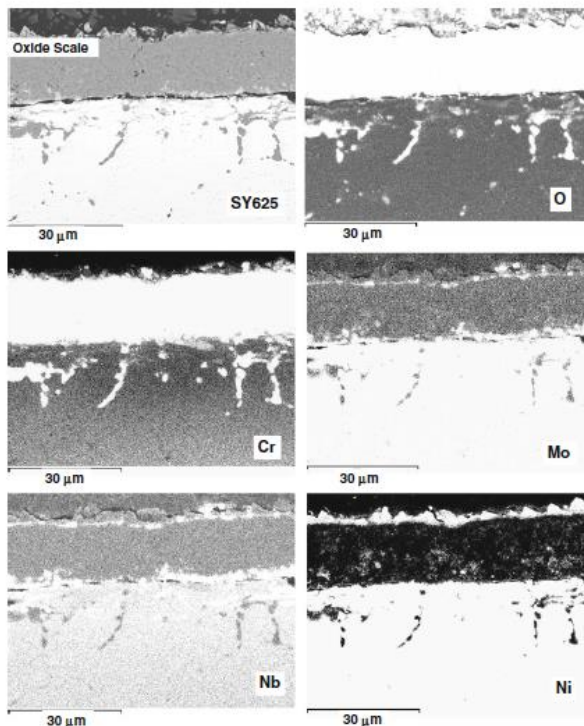


**Gambar 4. 17** Hasil citra SEM dari cross-section spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperatur 1100 °C di lingkungan *dry air*. (Buscail, 2011)

Disebutkan bahwa ketika spesimen dioksidasi pada temperatur 1100 °C dalam kondisi *dry air* atau *wet air* beberapa



skala oksida akan mengalami spallasi. Gambar 4.17 menunjukkan ketebalan dari skala oksida yang sebesar 8  $\mu\text{m}$  pada *dry air* dan pada saat *wet air* ketebalannya mencapai 16  $\mu\text{m}$ . Hal ini disebabkan karena saat melalui proses pendinginan, pembentukan dari skala oksida pada kondisi *dry air* terhenti sehingga terdapat *void* atau rongga yang terakumulasi di tengah skala kromia selama proses oksidasi *dry air*. Hasil *cross-section* hanya menunjukkan skala oksida yang tersisa yaitu  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  pada bagian eksternal dan subskala  $\text{CrNbO}_4$ .



**Gambar 4. 18** Hasil citra SEM dari cross-section spesimen yang telah dioksidasi 48 jam pada temperature 1100 °C di lingkungan *wet air*. (Buscail, 2011)

Gambar 4.18 menunjukkan hasil SEM *cross-section* pada spesimen Inconel 625 selama 48 jam pada temperatur 1100 °C pada kondisi *wet air*, dimana skala oksida yang terbentuk setebal 16 µm. Pada temperatur tertinggi dari proses oksidasi yang dilakukan menunjukkan bahwa morfologi dari skala kromia yang terbentuk mulai terpengaruh oleh uap air. Setelah 48 jam dioksidasi pada kondisi *dry air*, skala kromia yang terbentuk terlihat lebih padat. Sedangkan pada kondisi *wet air*, skala kromia yang terbentuk tampak menunjukkan pori-pori. Distribusi dari *void* dalam skala kromia juga dibahas pada literatur lain. Pada jurnal milik Norby pada tahun 1993 disebutkan bahwa proton yang berasal dari disosiasi uap air akan larut dalam skala oksida. Hal ini akan dapat meningkatkan perpindahan dari oksigen dalam difusi yang akan membentuk ion hidroksida. Perpindahan proton yang menggantikan electron yang keluar ini terjadi saat pertumbuhan skala.

Menurut jurnal Liu pada tahun 2016, dijelaskan bahwa evolusi pembentukan lapisan oksida pada Inconel 625 dimulai dari terserapnya molekul O<sub>2</sub> ke permukaan substrat dan terurai menjadi atom O, dimana atom O akan berdifusi ke dalam substrat dan beraksi dengan unsur yang memiliki aktivitas reaktif paling tinggi untuk membentuk oksida. Pada Inconel 625, Cr merupakan unsur yang paling reaktif. Dari penelitian-penelitian di atas, tahap ini terjadi pada temperatur awal oksidasi (700°C), Cr yang bereaksi dengan oksigen akan membentuk Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada interface *scale* dan paduan. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> akan mengalami nukleasi dan membentuk lapisan oksida padat dan tipis selama proses oksidasi berlangsung. Lapisan kromia akan semakin menebal seiring meningkatnya temperatur oksidasi. Lapisan oksida padat ini akan menghalangi penyerapan oksigen dan mengurangi laju oksidasi. Kemudian proses oksidasi akan berlanjut ke tahap selanjutnya. Oksidasi terjadi karena adanya difusi atom O ke dalam substrat serta difusi atom Cr dan Mn ke luar substrat lalu terbentuk MnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> pada interface udara-*scale* dan menebal sebagai hasil dari difusi ion Mn ke lapisan Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Tahap ini biasa terjadi pada temperatur di atas 800°C. Pada tahap ini,

kandungan Cr dan Mn pada substrat-*scale* berkurang dan terbentuk zona penipisan Cr dan Mn. Karena zona penipisan Cr dan Mn, laju oksidasi relatif lambat. Sementara itu, atom O masuk ke dalam matriks substrat, dan kemudian unsur Si teroksidasi. Sehingga menyebabkan terbentuknya  $\text{SiO}_2$ , tetapi difusi yang terjadi sangat lambat karena berkurangnya laju oksidasi. Pada temperatur yang lebih tinggi ( $1100^\circ\text{C}$ ) unsur niobium mulai bereaksi dengan lapisan kromia membentuk lapisan  $\text{CrNbO}_4$ .

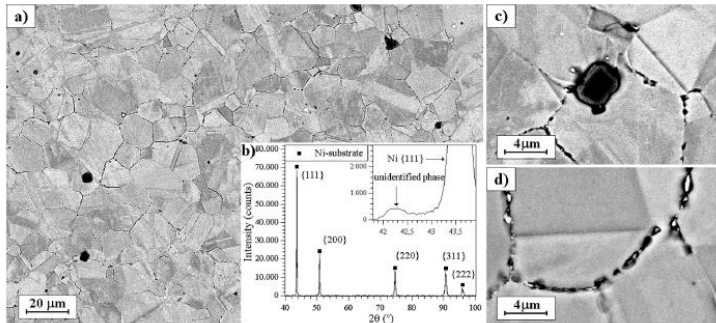
Dari semua pengujian yang dilakukan, setiap lapisan oksida yang terbentuk memiliki karakteristik masing-masing. Menurut Stott pada tahun 1989 lapisan oksida yang terbentuk berupa kromia ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) memiliki sifat yang keras dan *brittle*. Sedangkan oksida internal berupa  $\text{SiO}_2$  memiliki sifat yang juga melindungi substrat. Lapisan oksida lainnya berupa spinel dijelaskan dalam jurnal milik Yongjun pada tahun 2007 memiliki sifat magnetic dan elektrik yang baik. Lapisan oksida berupa kromia terbentuk dari seluruh temperatur oksidasi yang digunakan ( $700 - 1100^\circ\text{C}$ ). Pembentukan dari lapisan oksida berupa kromia dapat diprediksi menggunakan diagram Ellingham, dengan cara menarik garis pada sumbu x di temperature  $700 - 1100^\circ\text{C}$  ke atas. Berdasarkan diagram Ellingham juga dapat dilihat bahwa tidak menutup kemungkinan pada temperatur di bawah  $700 - 1100^\circ\text{C}$  kromia akan terbentuk. Hal ini dikarenakan krom merupakan unsur paling reaktif terhadap oksigen yang terdapat pada Inconel 625. Pembentukan lapisan oksida pada Inconel 625 selama proses oksidasi yang dibahas dari beberapa jurnal, dirangkum dalam Tabel 4.1.

**Tabel 4. 1** Rangkuman Lapisan Oksida dari Inconel 625

Referensi	Temperatur (°C)	Lapisan Oksida yang Terbentuk
(Fresnillo, et al. 2014)	700	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dan SiO <sub>2</sub> (oksida internal)
	750	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dan SiO <sub>2</sub> (oksida internal)
	800	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> dan SiO <sub>2</sub> (oksida internal)
(Malafaia, et al. 2020)	800	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dan MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	1000	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dan MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
(Chyrkin, et al. 2011)	900	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	1000	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	900	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
(Buscail, et al. 2011)	1000	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	1100	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dan CrNbO <sub>4</sub>

#### 4.2 Analisis Fasa dan Struktur Mikro

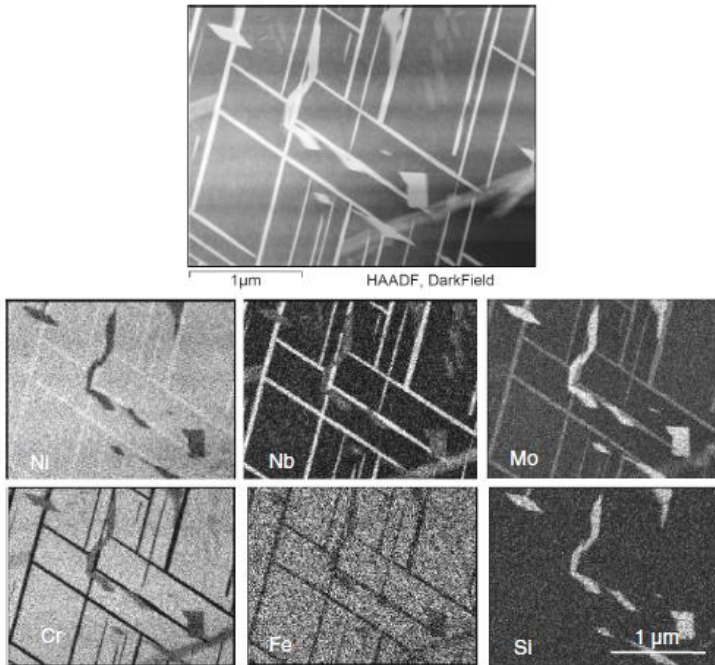
Proses oksidasi yang dilakukan pada Inconel 625 tentu tidak hanya menyebabkan terjadinya pembentukan lapisan oksida tipis pada permukaan spesimen, tetapi juga terjadi perubahan pada strukturmikro spesimen. Gambar 4.19 secara keseluruhan menunjukkan hasil karakterisasi pada Inconel 625 yang dilakukan oleh Malafaia, dkk (2020). Inconel 625 akan dioksidasi secara isothermal pada temperatur 800 dan 1000 °C selama 120 dan 240 jam di udara dengan menggunakan SEM/EDX, dan XRD. Pada Gambar 4.19 terlihat menunjukkan strukturmikro Inconel 625 yang belum diberi perlakuan khusus, dimana ukuran butirnya berukuran sekitar  $11,3 \pm 1,6 \mu\text{m}$ . Bagian (a) pada Gambar 4.19 menunjukkan *global view* yang dilakukan oleh *backscattered electron*, bagian (b) merupakan identifikasi fase menggunakan XRD, bagian (c) menunjukkan partikel gelap dan (d) merupakan fase putih yang terbentuk pada batas butir ketika diamati oleh *backscattered electron*.



**Gambar 4. 19** Hasil karakterisasi Inconel 625. (Malafaia, 2020)

Pada Gambar 4.19 bagian (b) menunjukkan difraksi sinar-X dari material Inconel 625 dimana puncak-puncak yang terdeteksi hanya merujuk pada matriks  $\gamma$ . Pada Gambar 4.19 bagian (c) menunjukkan adanya partikel-partikel gelap yang terdistribusi merata, memiliki diameter sebesar 1-5  $\mu\text{m}$ , ketika dianalisis menggunakan EDX disebutkan bahwa partikel gelap yang dimaksud menunjukkan fase yang kaya akan unsur Ti sebesar 57%, Nb 16% dan N 25%.

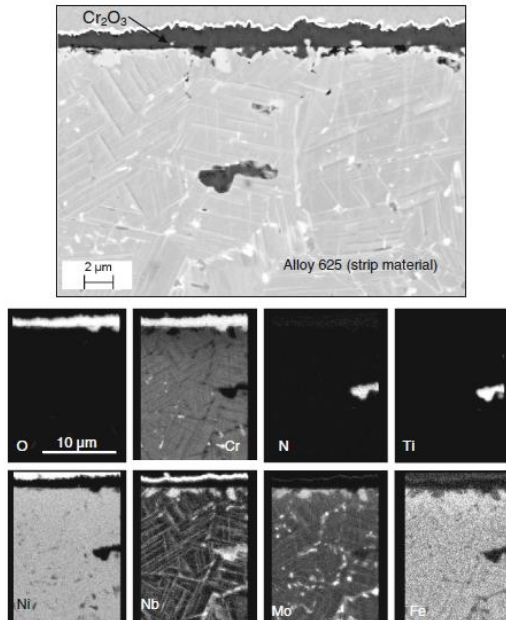
Pada penelitian yang dibahas oleh Fresnillo, dkk (2014) menjelaskan bahwa setelah spesimen dioksidasi dalam  $\text{Ar}-50\%\text{H}_2\text{O}$  terlihat endapan yang berbentuk seperti jarum yang ditemukan pada zona dibawah lapisan oksida. Namun pembentukan endapan dengan ukuran yang kecil menjadi alasan utama hal ini tidak dapat diidentifikasi menggunakan alat uji SEM, sehingga penelitian lebih lanjut terhadap endapan yang terbentuk dilakukan menggunakan TEM guna menentukan komposisi kimia dan sifat dari endapan tersebut secara tepat. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.20. Setelah dilakukan pengujian, disebutkan di dalam jurnal bahwa endapan yang berbentuk seperti jarum tersebut mengandung 71,9-75,5 %Ni, 13,4-15 %Nb, 7,7-8,6 %Mo dan 4-4,5 %Cr. Komposisi kimia tersebut sesuai dengan fase  $\delta$ - $[\text{Ni}_3(\text{Nb},\text{Mo})]$  yang disadur dari jurnal milik Tomihisa, Kaneno dan Takasugi pada tahun 2002.



**Gambar 4. 20** Hasil TEM pada paduan 625 setelah dioksidasi pada temperatur 700 °C selama 3000 jam dalam Ar-50% H<sub>2</sub>O. (Fresnillo, 2014)

Pada Gambar 4.20 menunjukkan analisis pengujain TEM yang membuktikan bahwa endapan tambahan juga dapat terjadi pada sebagian besar Inconel 625. Pada jurnal milik Fresnillo pada tahun 2014 tidak dibahas lebih lanjut mengenai hasil dari pengujian TEM, namun disebutkan bahwa pada spesimen yang digunakan mengandung endapan sebesar 38,7-38,8 %Ni, 28,8-29,8 %Mo, 14,2-15,6 %Cr, 12,2-12,8 %Si dan 3,7-3,8 %Nb. Endapan yang kaya akan Si, disebut sebagai  $\eta$  yang memiliki struktur  $M_6C$  yang sebelumnya juga ditemukan pada Inconel 625 setelah melalui proses *aging* pada temperatur 750 °C. Si- $\eta$   $M_6C$  memiliki struktur

berbentuk diamond-cubic dengan parameter kisi sebesar  $\pm 1,09$  nm.



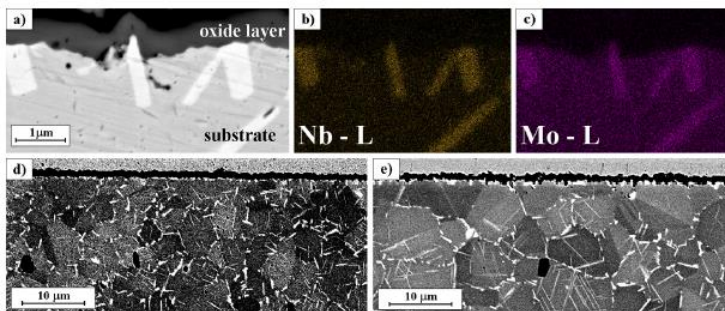
**Gambar 4. 21** Hasil citra SEM dan EDX pada wilayah dekat permukaan paduan 625 berdingkas tipis setelah dioksidasi pada temperatur 700 °C selama 10.000 jam dalam Ar-50% H<sub>2</sub>O. (Fresnillo, 2014)

Pada Gambar 4.21 menunjukkan fase- $\delta$  yang terbentuk pada permukaan paduan 625. Dari hasil EDX yang telah dilakukan menunjukkan bahwa endapan yang terbentuk memiliki komposisi kimia 68,9 – 70,4% Ni, 9,8 – 10,9% Nb, 12,7 – 13,6% Mo, 5,4 – 5,6% Cr, 0,7 – 0,9% Fe. Seperti hasil analisis TEM, disebutkan juga bahwa berbagai jenis endapan dapat terbentuk baik pada batas butir maupun di dalam butir. Apabila ditinjau dengan menggunakan diagram Ni-Cr-Mo untuk paduan 625, bagian isothermal tersebut menunjukkan fase  $\mu$ . Dimana menurut jurnal



Evans pada tahun 2008, pembentukan fase tersebut pada batas butir paduan 625 atau Inconel 625 ini akan bersifat menguntungkan karena bersifat lebih stabil secara termodinamik dan hanya membutuhkan sedikit unsur Nb saat proses pembentukan daripada jumlah yang dibutuhkan untuk membentuk karbida bertipe  $M_6C$ .

Penelitian yang dilakukan oleh Malafaia, dkk (2020) juga menjelaskan terkait pembentukan fase  $\delta$  yang dimuat pada Gambar 4.22. Bagian (a), (b) dan (c) merupakan data hasil pengujian SEM dan EDX dari permukaan Inconel 625 yang sudah dioksidasi pada temperatur 800 °C selama 120 jam. Terlihat pada Gambar 4.22 yang menunjukkan keberadaan Nb dan Mo, dimana partikel tersebut berbentuk jarum yang terdapat pada permukaan antara logam dengan lapisan oksida yang terbentuk. Biasanya pembentukan fase  $\delta$ - $[Ni_3(Nb,Mo)]$  terjadi setelah melalui proses *aging*. Hal serupa juga sudah disebutkan dalam jurnal Fresnillo, dkk (2014) mengenai pembentukan fase  $\delta$ - $[Ni_3(Nb,Mo)]$  yang berbentuk seperti jarum. Disebutkan bahwa pembentukan fase dengan morfologinya yang menyerupai jarum dapat dikatakan bahwa itu merupakan efek dari proses *aging*.



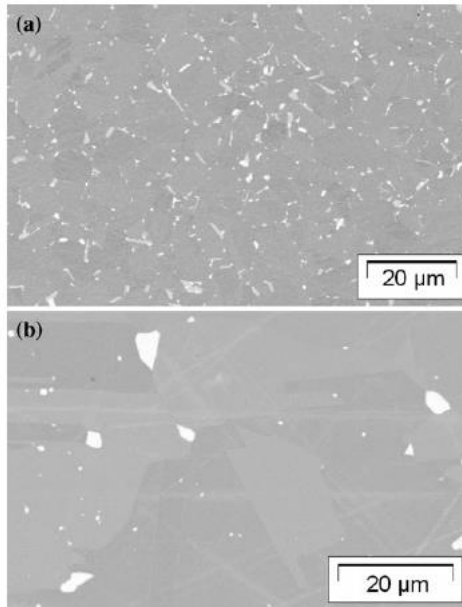
**Gambar 4. 22** Pembentukan fase kedua pada Inconel 625 setelah dioksidasi pada temperatur 800 °C (Malafia, 2020)

Disadur dari jurnal milik Sundararaman dan Sukumaran pada tahun 1988 dan 2017 yang sepakat menyebutkan bahwa fase  $\delta$  akan terbentuk pada temperatur 750 °C setelah mengalami proses



*aging* dalam waktu yang lama (misal, 100 jam), akan terjadi pengendapan secara intragranular lalu ketika temperatur meningkat menjadi 800 °C maka jumlah endapan yang terbentuk juga meningkat. Fase  $\delta$  yang terbentuk awalnya hanya terjadi pada sekitar batas butir dan tidak koheren, lalu semakin meningkat temperatur maka endapan yang terbentuk akan menjadi koheren. Sedangkan pada Gambar 4.22 bagian (d) dan (e) menunjukkan strukturmikro dari Inconel 625 setelah dioksidasi pada 800 °C selama 120 dan 240 jam. Ukuran butir tidak terlihat banyak mengalami perubahan meskipun sudah diberi perlakuan thermal. Setelah melewati proses pengecoran, ukuran butirnya sebesar  $11,3 \mu\text{m} \pm 1,6 \mu\text{m}$ , setelah dioksidasi ukuran butirnya menjadi  $10,3 \mu\text{m} \pm 1,7 \mu\text{m}$  untuk 120 jam dan  $11,2 \mu\text{m} \pm 1,2 \mu\text{m}$  untuk 240 jam.

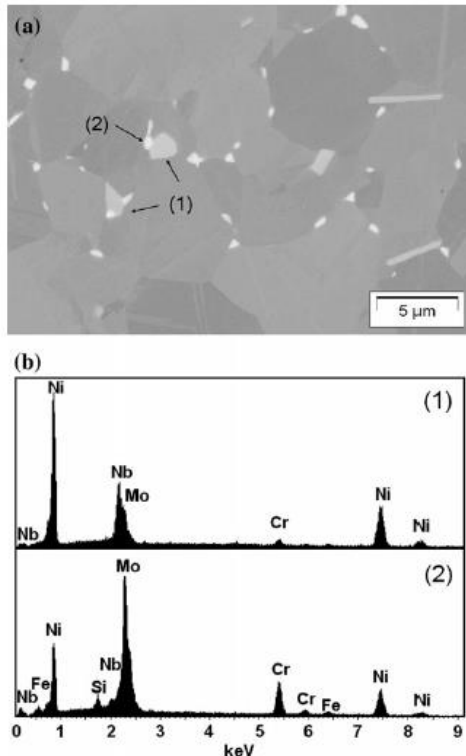
Berdasarkan *paper review* yang telah dilakukan oleh Chyrkin pada tahun 2011, pada temperatur 900 °C, dapat dilihat pada Gambar 4.23 yang menunjukkan strukturmikro Inconel 625 yang dianalisis dengan menggunakan EDX pada saat temperatur 900 dan 1000 °C selama 1000 jam. Dijelaskan pada temperatur 900 °C menunjukkan terbentuknya dua jenis endapan, sedangkan saat temperatur 1000 °C hanya terbentuk satu jenis endapan.



**Gambar 4. 23** Struktur mikro Inconel 625 saat dioksidasi pada temperature (a) 900 dan (b) 1000 °C selama 1000 jam. (Chyrkin, 2011)

Pada Gambar 4.24 menunjukkan strukturmikro pada spesimen saat dioksidasi pada temperatur 900 °C, dimana menunjukkan bahwa Inconel 625 tersebut akan membentuk dua jenis endapan yang kaya akan Ni dan Nb, sedangkan endapan satunya kaya akan Ni, Mo dan Si. Sedangkan untuk specimen yang dioksidasi pada temperatur 1000 °C hanya ada satu jenis endapan yang kaya akan Ni, Mo, dan Si. Selain menunjukkan struktur mikro, pada Gambar 4.24 juga menunjukkan analisis EDX yang akan menunjukkan bahwa Inconel 625 akan membentuk fase kedua yang kaya akan Ni dan Mo. Selain itu juga mengandung Cr, Nb, dan Si dalam jumlah yang kecil, dimana beberapa peneliti menyebutkan bahwa jenis endapan ini adalah  $\delta$ -Ni<sub>3</sub>Nb yang dapat terbentuk pada temperature 800 – 900 °C. Fase  $\delta$ -Ni<sub>3</sub>Nb rawan

terbentuk pada Inconel 625 memiliki morfologi berupa jarum-jarum dimana saat proses oksidasi berhenti dan membentuk fase  $\delta$ - $\text{Ni}_3\text{Nb}$  maka fase tersebut dapat mengurangi kekuatan dari paduan tetapi disisi lain dapat menstabilkan ukuran butir dan menguatkan ketahanan *rupture*. Pembentukan fasa dari Inconel 625 yang terbentuk selama proses oksidasi dirangkum dalam Tabel 4.2.



**Gambar 4. 24** Hasil citra SEM dari fase presipitasi pada Inconel 625 setelah dipapar 100 jam pada temperatur 900 °C dan analisis EDX pada titik yang ditandai pada bagian (a). (Chyrkin, 2011)

---

**Tabel 4. 2** Rangkuman Fasa dan Mikrostruktur yang terbentuk dari Inconel 625
 

---

Referensi	Temperatur (°C)	Fasa yang Terbentuk
(Fresnillo, et al. 2014)	700	$\delta$ -Ni <sub>3</sub> Nb, Si- $\eta$ M <sub>6</sub> C
	750	
	800	$\delta$ -Ni <sub>3</sub> Nb
(Malafaia, et al. 2020)	800	$\delta$ -Ni <sub>3</sub> Nb
	1000	
(Chyrkin, et al. 2011)	900	$\delta$ -Ni <sub>3</sub> Nb dan Ni <sub>3</sub> (Mo, Si)
	1000	$\delta$ -Ni <sub>3</sub> Nb

---

### 4.3 Kritisasi Jurnal

*Paper review* ini menggunakan sebanyak 3 jurnal dengan variasi temperatur dan waktu oksidasi. Dari ketiga jurnal yang dibahas disebutkan informasi berupa komposisi kimia dari material yang digunakan, prosedur penelitian juga hasil dari penelitian yang dilakukan. Tetapi dari ketiga jurnal tersebut tidak menjelaskan secara mendetail mengenai pembentukan dan pengaruh dari temperatur terhadap lapisan oksida, struktur mikro dan fasa yang terbentuk, sehingga dibutuhkan beberapa jurnal tambahan untuk melengkapi jurnal yang telah *direview*.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah melakukan review dari beberapa jurnal, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Oksidasi Inconel 625 yang dilakukan pada *range* temperatur 700 – 1100 °C akan membentuk lapisan oksida berupa  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  dari temperatur 700 – 1100 °C, juga oksida internal berupa  $\text{SiO}_2$  pada temperatur 700 – 800 °C. Lapisan oksida bertipe  $\text{MnCr}_2\text{O}_4$  yang mulai terbentuk pada temperatur 800 – 1000 °C, dan  $\text{CrNbO}_4$  yang terbentuk pada temperatur 1100 °C.
2. Oksidasi Inconel 625 yang dilakukan pada *range* temperatur 700-1100°C umumnya membentuk fasa berupa  $\delta\text{-}[\text{Ni}_3(\text{Nb},\text{Mo})]$ . Fasa lain yang mungkin terbentuk adalah  $\text{M}_6\text{C}$  yang kaya akan Si.

#### **5.2 Saran**

Adapun saran yang dapat diberikan dalam *paper review* ini adalah sebagai berikut:

1. Dalam *paper review* mengenai analisis pengaruh dari temperatur terhadap perubahan lapisan oksida, struktur mikro dan fasa yang terbentuk pada temperatur tinggi. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat menggunakan jenis lingkungan yang berbeda maupun temperatur operasional yang lebih tinggi.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- A., Thomas, El-Wahabi M., Cabrera J.M., dan Prado J.M. 2006. "High Temperature Deformation of Inconel 718." *Journal of Materials Processing Technology* 469-472.
- Agboola, Oluranti Sadiku, Emmanuel Rotimi Sadiku, dan Frank Biotidara Olusesan. 2012. "The Properties and the Effect of Operating Parameters on Nickel Plating." *International Journal of the Physical Science* 349-360.
- Behnamian, Yashar, Amir Mostafaei, Alireza Kohandehghan, Babak Shalchi Amirkhiz, Dominic Serate, Yifei Sun, Subiao Liu, et al. 2016. "C, A Comparative Study on Corrosion Behavior of Stainless Steel and Nickel-Based Superalloys in Ultra-High Temperature Supercritical Water at 800." 1-54.
- Buscail, H., R. Rolland, C. Issartel, F. Rabaste, F. Riffard, L. Aranda, dan M. Vilasi. 2011. "Effect of Water Vapour on The Oxidation of a Nickel-Base 625 Alloy Between 900 and 1100 °C." 5903-5915.
- Callister, William D., dan David G. Rethwisch. 2010. *Materials Science and Engineering An Introduction*. Utah: John Wiley & Sons, Inc.
- Callister, William D., dan David G. Rethwisch. 2009. "The Structure of Crystalline Solids." Dalam *Materials Science and Engineering*, 47-48.
- Chen, Yongjun, Zongwen Liu, Simon P. Ringer, Zhangfa Tong, Xuemin Cui, dan Ying Chen. 2007. "Selective Oxidation Synthesis of MnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Spinel Nanowires from Commercial Stainless Steel Foil." 2289-2281.
- Choudhury, L. A., dan El Baradie. 1998. "Machinability of nickel-base super alloys: a general review." *Journal of Materials Processing Technology* 278-284.
- Chyrkin, A., P. Huczowski, V. Shemet, L. Singheiser, dan W. J. Quadackers. 2011. "Sub-Scale Depletion and Enrichment Processes During High Temperature Oxidation of the

- 
- Nickel Base Alloy 625 in the Temperature Range 900-1000 C.” 143-166.
- Cicek, Volkan. 2013. *Cathodic Protection: Industrial Solutions for Protecting Against Corrosion*. Canada: Scrivener.
- Colas, Johann, Ludovic Charpentier, dan Marianne Balat Pichelin. 2020. “Oxidation in Air at 1400 K and Optical Properties of Inconel 625, FeCrAlloy and Kanthal Super ER.” 355-370.
- Donachie, Matthew J., dan Stephen J. Donachie. 2002. *Superalloys A Technical Guide*. United State of America: ASM International.
- Evans, N D, P J Maziasz, J P Shingledecker, dan Y Yamamoto. 2008. “Microstructure Evolution of Alloy 625 Foil and Sheet During Creep.” 412-420.
- Fontana, Mars Guy, dan Norbert D. Greene. 1977. *Corrosion Engineering*. New York.
- Fresnillo, L. Garcia, A. Chyrkin, C. Bohme, J. Barnikel, F. Schhmitz, dan W. J. Quadakkers. 2014. “Oxidation Behaviour and Microstructural Stability of Alloy 625 During Long-Term Exposure in Steam.” 6127-6142.
- Higginson, R. L., dan G. Green. 2011. “Whisker Growth Morphology of High Temperature Oxides Grown on 304 Stainless Steel.” 1690-1693.
- Irwanto, Deddy, Yusian Basir, dan Muhni Pamuji. 2013. “Studi Korosi Pada Pipa Menggunakan Metode Impressed Current di Petrochina International Jambi.Ltd.” *Jurnal Desiminasi Teknologi* 198-212.
- Jonsson, T., B. Pujilaksono, S. Hallstrom, J. Agren, J. E. Svensson, L. G. Johansson, dan M. Halvarsson. 2009. “An ESEM in situ Inverstigation of The Influence of H<sub>2</sub>O on Iron Oxidation at 500 C.” 1914-1924.
- Kubaschewski, O, dan B. E. Hopkins. 1962. *Oxidation of Metals and Alloys*. London: Butterworths.
-



- 
- Liu, Long Fei, Shu Sen Wu, Yang Chen, dan Shu Lin Lu. 2016. "Oxidation Behavior of RE-Modified Nickel-Based Superalloy Between 950 C and 1150 C in Air." 1163-1169.
- Malafaia, Arthur Mariano de Sousa, Rafaela Brino de Oliveira, Laurence Latu Romain, Yves Wouters, dan Renato Baldan. 2020. "Isothermal Oxidation of Inconel 625 Superalloy at 800 and 1000 C: Microstructure and Oxide Layer Characterization." *Materials Characterization* 1-9.
- Omatete, O. O., P. J. Maziasz, B. A. Pint, dan D. P. Stinton. 2000. *Assessment of Recuperator Materials for Microturbines*. Oak Ridge National Laboratory.
- Ping, D. H., Y. F. Gu, C. Y. Cui, dan H. Harada. 2007. "Grain Boundary Segregation in a Ni-Fe-based (Alloy 718) Superalloy." 99-102.
- Pint, Bruce A., Robert W. Swindeman, Karren L. More, dan Peter F. Tortorelli. 2001. "Materials Selection for High Temperature (750 - 1000 C) Metallic Recuperators for Improved Efficiency Microturbines." 1-7.
- Priambodo, Toni Agung, dan Bambang Widyanto. 2015. "Perubahan Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Akibat Pemanasan Diatas Temperatur Kerja Pada Material Sudu Turbin Nickel Based Superalloys SRR 99." 39-44.
- Rakowski, James M., Charles P. Stinner, Mark Lipschutz, dan J. Preston Montague. 2005. "The Use and Performance of Wrought 625 Alloy in Primary Surface Recuperators for Gas Turbine Engines." 271-286.
- Reed, Roger C. 2006. *The Superalloys Fundamentals and Applications*. New York: Cambrige University Press.
- Revie, R. Winston, dan Herbert H. Uhlig. 2008. *Corrosion and Corrosion Control. An Introduction to Corrosion Science and Engineering* . Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Revie, R. Winston, dan Herbert H. Uhlig. 1907. "Definition and Importance of Corrosion." Dalam *Corrosion and Corrosion Control*, oleh R. Winston Revie dan Herbert H.
-

- Uhlig, I. United States of America: A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Revie, R. Winston, dan Herbert Henry Uhlig. 2011. *Uhlig's Corrosion Handbook*. John Wiley & Sons, Inc.
- Schweitzer, Philip A. 2007. *Fundamental Metallic Corrosion*. New York: CRC Press.
- Shankar, Vani, K. Bhanu Sankara Rao, dan S.L. Mannan. 2001. "Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 625 Superalloy." *Journal of Nuclear Materials* 222-232.
- Stott, F. H. 1989. "Influence of Alloy Additions on Oxidation." *Materials Science and Technology* 734-740.
- Suave, Lorena Mataveli, Jonathan Cormier, dan Patrick Villechaise. 2014. "Microstructural Evolutions During Thermal Aging of Alloy 625: Impact of Temperature and Forming Process." *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International* 2963-2982.
- Sudradjat, Ardhi, dan A.P Bayuseno. 2014. "Analisis Korosi dan Kerak Pipa Nickel Alloy N06025 Pada Waste Heat Boiler." *Jurnal Teknik Mesin* 40-45.
- Sukumaran, Arjun, R. K. Gupta, dan V. Anil Kumar. 2017. "Effect of Heat Treatment Parameters on The Microstructure and Properties of Inconel-625 Superalloy." 3048-3057.
- Sundararaman, M., P. Mukhopadhyay, dan S. Banerjee. 1988. "Precipitation of The  $\delta$ -Ni<sub>3</sub>Nb Phase in Two Nickel Base Superalloy." 453-465.
- Tomihisa, K., Y. Kaneno, dan T. Takasugi. 2002. "Phase Relation and Microstructure in Ni<sub>3</sub>Al-Ni<sub>3</sub>Ti-Ni<sub>3</sub>Nb Pseudo-Ternary Alloy System." 247-254.
- Zhang, Baicheng, Mingzhen Xiu, Yong Teck Tan, Jun Wei, dan Pei Wang. 2019. "Pitting Corrosion of SLM Inconel 718 Sample Under Surface and Heat." 556-567.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah ikut berperan serta terhadap penulisan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua Orang tua penulis, Bapak Ardian Naftali dan Ibu Esti Rahmawati atas semangat dan nasehat yang sangat berguna dalam keberhasilan penulis.
2. Teman-teman Mahasiswa Angkatan 2016 (MT18) yang telah memberikan kenangan dan kehangatan selama empat tahun terakhir.
3. Diri sendiri, karena sudah berjuang dan selalu berhasil bangkit hingga sampai pada titik ini.
4. Muhamad Rafli Nurhadi yang telah menemani, membantu dan mengasihi penulis selama berkuliah di DTMM FTIRS-ITS.
5. Kedua rekan spesial saya Cinlyadevi Angelourenz dan Cut Irmafitri yang merupakan teman terbaik karena selalu memberikan semangat dan do'a untuk penulis tanpa henti.
6. Kepada sahabat-sahabat saya, Bang Namu, Kak Jin, Bang Ugi, Kak Hobi, Kak Jimin, Mas Tata, dan Jeka yang sudah menemani, memberikan inspirasi dalam berbagai hal dan memberi semangat tanpa henti untuk penulis.
7. Seluruh Dosen dan karyawan, serta Mahasiswa DTM yang tak pernah menyerah untuk DTMM FTIRS-ITS yang terbaik.
8. Seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi atas penulisan Tugas Akhir ini sehingga laporan ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan, namun dibalik itu terdapat niat tulis untuk belajar dan berbagi pengetahuan bagi

---

sesame. Penulis juga berharap bahwa laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, 16 Juli 2020

Penulis

## BIODATA PENULIS



Yanne Indriati lahir di Kota Surabaya pada tanggal 11 Agustus 1997. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Klampis Ngasem I, SMP Negeri 30 Surabaya, SMA Negeri 3 Surabaya. Penulis menempuh pendidikan lebih lanjut di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, tepatnya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi. Penulis pernah aktif dalam beberapa kegiatan organisasi yaitu menjadi staff Kaderisasi Ash-Haabul Kahf 17/18, Staff Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa BEM-FTI-ITS 17/18, Kabirol Pelatihan dan Kepemanduan BEM-FTI-ITS 18/19, dan Pemandu ITS angkatan 2017. Penulis memiliki pengalaman Kerja Praktik di PT. GMF AeroAsia Tbk pada bidang *Non-Destructive Inspection*. Penulis mengambil bidang studi Korosi dan Kegagalan Material untuk tugas akhir. Penulis dapat dikontak melalui surat elektronik [yanneindriati@gmail.com](mailto:yanneindriati@gmail.com), serta nomor telepon 087787146277.