



TUGAS AKHIR – TL184834

**REVIEW: KINETIKA OKSIDASI DARI INCONEL 625 PADA
OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI**

**MUHAMAD RAFLI NURHADI
NRP. 0251164000070**

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

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



TUGAS AKHIR – TL 184834

**REVIEW: KINETIKA OKSIDASI DARI INCONEL 625
PADA OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI**

MUHAMAD RAFLI NURHADI
NRP. 0251164000070

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: KINETIC OXIDATION OF INCONEL 625 AT
HIGH TEMPERATURE OXIDATION**

MUHAMAD RAFLI NURHADI
NRP. 0251164000070

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: KINETIKA OKSIDASI DARI INCONEL 625
PADA OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI**

TUGAS AKHIR

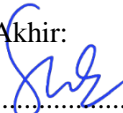

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUHAMAD RAFLI NURHADI

NRP 02511640000070

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: KINETIKA OKSIDASI DARI INCONEL 625 PADA OKSIDASI TEMPERATUR TINGGI

Nama : Muhamad Rafli Nurhadi
NRP : 02511640000070
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Dr. Ir Sulistijono, DEA.
Dosen Pembimbing 2 : Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.

Abstrak

Recuperator merupakan komponen dari turbin yang digunakan untuk memindahkan panas dari gas keluar ke udara masuk. Permasalahan yang terdapat pada recuperator adalah tingginya temperatur kerja pada komponen tersebut. Dewasa ini, material yang digunakan pada recuperator adalah paduan berbasis nikel berjenis Inconel 625. Pada review paper ini akan dipelajari tentang pengaruh temperatur terhadap kinetika oksidasi dan fasa yang terbentuk pada lapisan oksida saat oksidasi temperatur tinggi dari material Inconel 625. Temperatur oksidasi yang dipakai pada review paper ini minimal 600°C (873 K) dengan jangka waktu oksidasi yang bervariasi. Terdapat 2 jenis lingkungan oksidasi pada review paper ini yaitu udara dan steam (mengandung uap air). Dari paper review dapat diketahui bahwa Inconel 625 memiliki perilaku laju oksidasi parabolik yang menandakan ketahanan oksidasi temperatur tinggi pada material ini pada lingkungan tersebut sangat baik. Semakin tinggi temperatur, semakin tinggi laju oksidasi yang terjadi. Fasa pada lapisan oksida yang terbentuk dapat dibagi menjadi 2 bagian. Pada temperatur di bawah 1050°C (1323 K) fasa utama yang terbentuk Cr₂O₃. Fasa lain yang terbentuk adalah Ni₂O₃ dan NiO. Sedangkan pada oksidasi temperatur di atas 1373 K membentuk lapisan oksida yang mengandung TiO₂, Ti₂O₃, Nb₂O₅, NbO₂, Cr₂O₃, NiCr₂O₄, MoO₂ dan CrNbO₄.

Kata Kunci: *Inconel 625, oksidasi temperatur tinggi, kinetika oksidasi, lapisan oksida*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

REVIEW: KINETICS OXIDATION OF INCONEL 625 AT HIGH TEMPERATURE OXIDATION

Student Name : Muhamad Rafli Nurhadi
NRP : 02511640000070
Department : Teknik Material dan Metalurgi
Supervisor : Prof. Dr. Ir Sulistijono, DEA.
Co-Supervisor : Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T.

Abstract

Recuperator is a component of turbine that used to transfer heat from exhaust gas to inlet air. The problem from recuperator is this component work in high temperature. Nowadays, the material used for recuperators is nickel-based alloy (Inconel 625). This paper review will discuss about temperature effect for oxidation kinetics and phases formed at oxides during high temperature oxidation of Inconel 625. The minimum temperature used in this paper review is 600°C (873 K) with varying oxidation period. There are 2 types of environment in this paper review that are atmospheric air and steam. From this paper it can be seen that inconel 625 has a parabolic oxidtaion rate behavior which indicates this material has a good high temperature oxidation resistance in those environment. The higher temperature, the higher oxidation rate will be obtained. The phase in the oxide layer formed can be divided into 2 parts. At temperature below 1050°C (1323 K) the main phase formed Cr₂O₃. Other phase formed are Ni₂O₃ and NiO. Whereas at temperature above 1050°C (1323 K) the phases formed in the oxide layer are TiO₂, Ti₂O₃, Nb₂O₅, NbO₂, Cr₂O₃, NiCr₂O₄, MoO₂ and CrNbO₄.

Keywords: *Inconel 625, , high temperature oxidation, oxidation kinetics, oxides layer*

(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 Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T. selaku dosen wali dari penulis.

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, 26 Juli 2019
Penulis

Muhamad Rafli Nurhadi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
Abstrak	vii
Abstract	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Korosi.....	5
2.1.1 Definisi Korosi.....	5
2.1.2 Mekanisme Korosi.....	5
2.2 Korosi Kering.....	7
2.2.1 Korosi Oksidasi.....	8
2.2.2 Korosi akibat Gas Lain.....	9
2.2.3 Korosi Logam Cair.....	10
2.3 Oksidasi Temperatur Tinggi.....	10
2.3.1 Reaksi Oksidasi.....	10
2.3.2 Tinjauan dalam Termodinamika.....	12
2.3.3 Diagram Ellingham.....	13
2.3.4 Kinetika Oksidasi.....	14
2.3.5 Laju Reaksi – Teori Arrhenius.....	17
2.4 Material Tahan Temperatur Tinggi.....	18
2.4.1 <i>Ceramic Engineering</i>	19
2.4.2 <i>Superalloy</i>	19
2.5 <i>Superalloy</i>	20
2.5.1 <i>Co-base Alloy</i>	20

2.5.2	<i>Ni-Base Alloy</i>	21
2.6	Inconel 625.....	23
BAB III METODOLOGI REVIEW		
3.1	Diagram Alir	29
3.2	Material dan Komposisi Kimia	30
3.3	Prosedur Penelitian	30
3.3.1	Jurnal Rakowski, et al.	30
3.3.2	Jurnal Kumar, et al.	31
3.3.3	Jurnal Staszewska dan Scendo	31
3.3.4	Jurnal Buscail, et al.	32
3.4	Pengujian berdasarkan Jurnal.....	32
3.5	Mekanisme dan Standarisasi Pengujian	33
3.5.1	<i>Thermogravimetric Analyzer (TGA)</i>	33
3.5.2	Scanning Electron Microscopy (SEM).....	34
3.5.3	<i>X-ray Diffraction (XRD)</i>	35
3.5.4	<i>X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)</i>	36
3.5.5	<i>Atomic Emission Spectroscopy (AES)</i>	36
3.5.6	<i>Optical Microscope (OM)</i>	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Kinetika Oksidasi	39
4.2	Lapisan Oksida.....	52
4.3	Kritisasi Jurnal	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	63
5.2	Saran	63
DAFTAR PUSTAKA		65
UCAPAN TERIMA KASIH.....		69
BIODATA PENULIS		71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Sel korosi sederhana (Trethewey & Chamberlain, 1991).....	7
Gambar 2. 2	Pembentukan lapisan oksida logam pada temperatur tinggi (Jones, 1996).....	11
Gambar 2. 3	Diagram Ellingham (Revie, 2011).....	14
Gambar 2. 4	Kurva tipe-tipe kinetika oksidasi (Jones, 1996).....	17
Gambar 2. 5	Temperatur kerja dan kekuatan dari sebuah material. (Bandanadjaja, 2009).....	18
Gambar 3. 1	Diagram alir paper review.....	29
Gambar 4. 1	Perubahan berat karena oksidasi sebagai fungsi waktu pada lembaran paduan 625 di lingkungan udara (Rakowski et al, 2005).....	39
Gambar 4. 2	Grafik plot Arrhenius konstanta laju parabola pada lembaran paduan 625 di lingkungan udara (Rakowski et al, 2005).....	41
Gambar 4. 3	Perubahan massa karena oksidasi terhadap fungsi waktu pada lembaran paduan 625 pada lingkungan yang mengandung 10% uap air (Rakowski et al, 2005).....	41
Gambar 4. 4	Pertambahan berat per area vs waktu dari inconel 625 yang dioksidasi pada temperatur 1323 samapi 1523 K selama 150 menit ($P_{O_2} = 0.12$ kPa) (Kumar et al, 1994).....	42
Gambar 4. 5	Kuadrat penambahan berat vs waktu dari Inconel 625 yang dioksidasi pada temperatur 1323 K hingga 1523 K selama 150 menit ($P_{O_2} = 0.12$ kPa) (Kumar et al, 1994).....	43
Gambar 4. 6	Kurva kinetika oksidasi dari Inconel : (a) 617 dan (b) 625 pada oksidasi di temperatur 373 K sampai 1473 K selama 96 jam (Staszewska & Scendo, 2016).....	45

Gambar 4. 7 Arrhenius plot untuk oksidasi dari inconel (a) 617 dan (b) 625 (Staszewska & Scendo, 2016)	46
Gambar 4. 8 Kurva kinetika oksidasi inconel 625 pada temperatur 900, 1000, dan 1100°C di lingkungan kering dan udara basah (Buscail et al, 2011)	47
Gambar 4. 9 Spektrum XPS pada (a) paduan <i>virgin</i> , dan sampel yang telah dioksidasi pada (b) 873 K selama 15 menit, (c) 1073 K selama 150 menit, (d) 1323 K selama 140 menit, (e) 1423 K selama 150 menit, dan (f) 1523 K selama 120 menit (Kumar et al, 1994)	53
Gambar 4. 10 Spektrum AES pada (a) paduan <i>virgin</i> , dan sampel yang telah dioksidasi pada (b) 873 K selama 15 menit, (c) 1073 K selama 150 menit, (d) 1323 K selama 140 menit, (e) 1423 K selama 150 menit, dan (f) 1523 K selama 120 menit (Kumar et al, 1994)	54
Gambar 4. 11 EDS pada Inconel 625 : (a) paduan <i>virgin</i> ; dan yang telah dioksidasi pada (b) 873 K selama 15 menit, (c) 1323 K selaman 140 menit dan (d) 1523 K selama 120 menit (Kumar et al, 1994)	55
Gambar 4. 12 Spektrum XPS beresolusi tinggi (a) Cr 2 <i>p</i> (873 K selama 15 menit), (b) Ni 2 <i>p</i> (873 K selama 15 menit), (c) Ti 2 <i>p</i> (1323 K selama 140 menit), (d) Nb 3 <i>d</i> (1523 K selama 140 menit) (Kumar et al, 1994)	56
Gambar 4. 13 Hasil pengujian XRD pada oksidasi temperatur 1173, 1273 dan 1373 K pada lingkungan kering dan udara basah (Buscail et al, 2011)	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Paduan cobalt beserta fungsi dan komposisi unsur (Revie & Uhlig, 2008).....	21
Tabel 2. 2 Jenis-jenis Paduan Nikel (Revie, 2011).....	23
Tabel 2. 3 Komposisi Inconel 625 (%) (Floreen, Fuchs, Yang, 1994).....	24
Tabel 3. 1 Material dan Komposisi Kimia Material tiap Jurnal	30
Tabel 3. 2 Pengujian yang dilakukan berdasarkan jurnal	32
Tabel 4. 1 Konstanta laju parabolic untuk oksidasi lembaran paduan 625 pada lingkungan udara (Rakowski et al, 2005).....	40
Tabel 4. 2 Konstanta laju oksidasi dari lembaran paduan 625 di udara dengan dan tanpa penambahan uap air (Rakowski et al, 2005)	42
Tabel 4. 3 Konstanta laju parabolik, k_p , untuk oksidasi inconel 625 pada $P_{O_2} = 0.12$ kPa (Kumar et al, 1994).....	44
Tabel 4. 4 Konstanta laju parabola pada sampel yang telah dioksidasi (Staszewska & Scendo, 2016).....	46
Tabel 4. 5 Nilai k_p pada oksidasi Inconel 625 temperatur 900, 1000, dan 1100°C di lingkungan kering dan udara basah (Buscail et al, 2011).....	48
Tabel 4. 6 Rangkuman Kinetika Oksidasi dari Inconel 625	51
Tabel 4. 7 Komposisi Lapisan Oksida yang dianalisis menggunakan XPS, AES dan EDS dan Rasio O/M dari Lapisan Oksida (Kumar et al, 1994)	57
Tabel 4. 8 Senyawa pada Lapisan Oksida dari Inconel 625 setelah Oksidasi Temperatur Tinggi.....	60

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di zaman sekarang, membuat kebutuhan akan material dengan sifat tertentu semakin meningkat. Salah satu sifat yang sedang dibutuhkan oleh banyak industri adalah tahan temperatur tinggi. Banyak industri yang beroperasi pada temperatur tinggi seperti pembangkit listrik, otomotif, proses kimia, turbin gas, dll. Pemilihan material merupakan hal yang harus diperhatikan dalam aplikasi temperatur tinggi. Sebagai contoh, turbin gas pada industri penerbangan. Turbin beroperasi pada temperatur yang tinggi karena gaya sentrifugal yang tinggi serta panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Prinsip kerja dari turbin adalah mengubah energi kinetik berupa angin menjadi energi mekanik sehingga mampu menggerakkan mesin. (Carter, 2004). Turbin pesawat lebih banyak menggunakan logam paduan berbasis nikel (*Ni-based alloy*) karena paduan berbasis nikel mampu menahan paparan oksidasi lingkungan sekitar yang berbahaya dan temperatur tinggi untuk jangka waktu yang lama (Callister & Rethwisch, 2010). Selain turbin pesawat, *recuperator* merupakan komponen yang menggunakan logam paduan berbasis nikel. *Recuperator* biasa ditemukan pada turbin gas mikro. Alat ini berfungsi untuk meningkatkan efisiensi dari turbin gas mikro dengan cara memindahkan panas pada gas buang yang menuju *exhaust* ke udara masuk. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya oksidasi temperatur tinggi. (Shoemaker 2005).

Umumnya, oksidasi merupakan reaksi elektrokimia yang melibatkan elektron, tetapi istilah oksidasi juga dapat berlaku pada reaksi antara logam dengan udara atau oksigen tanpa adanya larutan elektrolit. Fenomena ini disebut korosi kering (*dry corrosion*). Hasil dari oksidasi logam dengan udara sekitarnya berupa lapisan oksida. Lapisan oksida yang terbentuk dapat menguntungkan dan merugikan. Lapisan oksida dapat dikatakan menguntungkan jika lapisan tersebut berfungsi sebagai lapisan

pelindung yang dapat meningkatkan ketahanan korosi pada kondisi stabil, sedangkan lapisan oksida dapat dikatakan merugikan jika terbentuk pada kondisi yang tidak stabil yang berakibat menurunkan kualitas suatu material dan menjadi produk korosi yang berbahaya. (Fontana, 1987). Oksidasi dapat terjadi saat proses pembakaran menggunakan bahan bakar yang “bersih” tanpa adanya bahan baku atau bahan kimia tambahan yang mengandung sulfur, karbon, atau halogen. Oksidasi merupakan jenis korosi temperatur tinggi yang sering terjadi. (Lai, et al., 1983)

Inconel 625 merupakan salah satu dari logam paduan berbasis nikel. Inconel 625 memiliki ketahanan korosi yang baik (Rajani, et al., 2013). Inconel 625 merupakan paduan berbasis nikel yang diperkuat dengan menambahkan karbon, *chromium*, *molybdenum*, dan *niobium*. (Shankar, et al., 2000). *Chromium* dengan jumlah yang tinggi pada Inconel 625 (20-23%) membuat paduan ini memiliki ketahanan terhadap oksidasi temperatur tinggi dan korosi seragam (*uniform corrosion*) (Wang & Shu, 2003). Inconel 625 memiliki struktur kristal berbentuk FCC (*Face Centered Cubic*) yang stabil hingga mendekati titik leburnya. Hal ini menyebabkan Inconel 625 mampu bekerja pada temperatur yang tinggi. Paduan ini juga mempunyai keuletan dan ketangguhan yang tinggi dikarenakan tidak adanya ekspansi dan kontraksi dari transformasi fasa (Dieter, 1986). Mengetahui kinetika oksidasi (laju oksidasi / k) dan energi aktivasi merupakan salah satu cara untuk menentukan layak atau tidaknya material digunakan pada kondisi (lingkungan) tertentu. K_p merupakan laju oksidasi dari sebuah material dimana semakin tinggi nilai k_p maka akan semakin cepat material tersebut akan mengalami oksidasi. Sedangkan E_a merupakan energi minimal yang diperlukan dari sebuah material untuk bereaksi (oksidasi). Semakin rendah nilai E_a , maka semakin mudah material tersebut untuk mengalami reaksi (oksidasi). Berdasarkan permasalahan di atas, *review paper* ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh temperatur terhadap kinetika oksidasi dan energi aktivasi dari inconel 625 serta mengidentifikasi

lapisan oksida yang terbentuk pada inconel 625 pada temperatur tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada *review paper* ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh temperatur terhadap kinetika oksidasi dan energi aktivasi inconel 625?
2. Bagaimana pengaruh temperatur pada lapisan oksida yang terbentuk di inconel 625 saat oksidasi temperatur tinggi?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada *review paper* ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh tekanan diabaikan
2. *Pre-treatment* dan *post-treatment* diabaikan
3. Lingkungan oksidasi yang digunakan yaitu *dry air* dan *wet air*

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya *review paper* ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh temperatur terhadap kinetika oksidasi dan energi aktivasi dari inconel 625
2. Menganalisis pengaruh temperatur pada lapisan oksida yang terbentuk pada inconel 625 pada oksidasi temperatur tinggi.

1.5 Manfaat Penelitian

Pada *review paper* ini diharapkan dapat memberikan manfaat yaitu memberikan informasi terkait kinetika oksidasi serta lapisan oksida yang terbentuk dari Inconel 625 saat oksidasi temperatur tinggi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi

2.1.1 Definisi Korosi

Korosi adalah sebuah degradasi kualitas dari sebuah material (umumnya logam) yang diakibatkan oleh reaksi dengan unsur lain di sekitar lingkungannya. (Sidiq, 2013). Korosi juga dapat diartikan sebagai serangan yang merusak pada logam karena reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya (Revie & Uhlig, 2008). Ahmad (2006) mengartikan korosi sebagai peristiwa kerusakan yang natural seperti gempa bumi, banjir, tornado dan erupsi vulkanik yang membedakan adalah korosi dapat dikontrol. Reaksi kimia yang menyebabkan korosi pada logam dapat berupa logam dan gas pada temperatur tinggi atau logam pada lingkungan air atau udara basah (Supardi, 1997).

Korosi kering merupakan proses korosi karena adanya reaksi kimia yang terjadi secara langsung tanpa melibatkan elektrolit atau air dengan segala bentuknya. Korosi kering umumnya terjadi pada temperatur tinggi atau dalam kondisi kering yang melibatkan reaksi antara logam (M) dan oksigen, nitrogen, sulfida. Oksidasi, karburasi, nitridasi, sulfidasi, penyerapan senyawa halogen, logam cair dll merupakan contoh dari penyebab korosi temperatur tinggi. Sedangkan korosi basah (elektrokimia) terjadi karena adanya reaksi pada suatu elektrolit serta terjadi perpindahan elektron antara bahan-bahan yang bersangkutan. (Avner, 1974)

2.1.2 Mekanisme Korosi

Proses korosi pada material logam biasanya terjadi reaksi elektrokimia. Reaksi kimia yang terjadi adalah transfer elektron dari suatu senyawa ke senyawa lainnya. Atom logam memiliki karakteristik melepas atau memberikan elektron biasa disebut reaksi oksidasi. Reaksi oksidasi dapat ditulis dengan rumus :



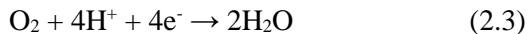
M menjadi bermuatan positif (n^+) yang kehilangan elektron valensi (n); e^- menjadi symbol dari elektron. Tempat dimana oksidasi berlangsung disebut sebagai anoda; terkadang oksidasi disebut juga sebagai reaksi anodik.

Elektron yang telah mengalami oksidasi dari suatu logam harus dipindahkan dan menjadi bagian dari senyawa lainnya yang biasa disebut reduksi. Sebagai contoh, beberapa logam mengalami korosi pada larutan asam, dimana mengandung ion hidrogen (H^+) dengan konsentrasi yang tinggi; ion H^+ akan tereduksi sebagai berikut :

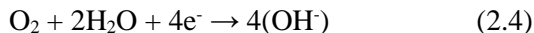


Dan gas hydrogen (H_2) terbentuk.

Reaksi reduksi lain yang mungkin terjadi, bergantung pada larutan dimana logam terpapar. Pada larutan asam yang memiliki oksigen terlarut, reduksi yang terjadi :



Atau, untuk larutan netral atau basa dimana oksigen juga larut reduksi yang terjadi :



Ion logam lain yang berada dalam larutan bisa juga terkena reduksi; untuk ion yang memiliki lebih dari satu ion valensi, reduksi yang mungkin terjadi adalah

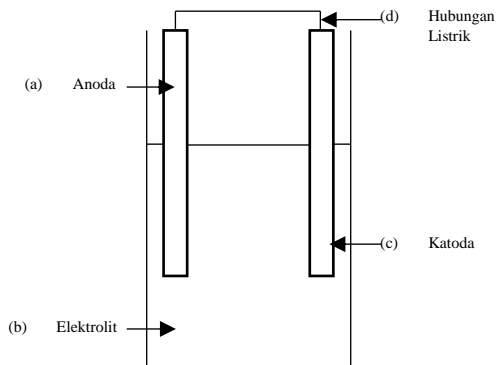


Kondisi tersebut membuat ion logam mengurangi ion valensi tersebut dengan menerima elektron. Logam juga dapat direduksi total dari ion menjadi logam netral sesuai dengan



Tempat terjadinya reduksi dapat disebut katoda.

Secara umum reaksi elektrokimia harus memiliki setidaknya satu reaksi oksidasi dan satu reaksi reduksi, dan juga bisa keduanya; biasanya reaksi oksidasi dan reaksi reduksi individu disebut setengah reaksi. (Callister & Rethwisch, 2010). Ilustrasi sel korosi sederhana dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Sel korosi sederhana
(Trethewey and Chamberlain 1991)

2.2 Korosi Kering

Korosi kering secara umum merupakan reaksi antara logam dan udara atau logam dengan uap yang mengandung non-logam seperti oksigen, halogen, hydrogen sulfida, gas sulfur, dll. Karakteristik dari reaksi tersebut adanya oksidasi pada logam, reduksi pada non-logam dan pembentukan senyawa terjadi pada *interface* antara logam dan non-logam. Jika senyawa tersebut mudah menguap (*volatile*) atau diskontinu, interaksi lebih lanjut mungkin terjadi pada *interface* (melalui lapisan tipis dengan ketebalan konstan) dan dalam banyak kasus laju reaksi akan cenderung konstan terhadap waktu (hukum linear). Jika lapisan ini

kontinu maka akan membentuk penghalang terhadap reaktan dan untuk interaksi lebih lanjut, reaktan melalui lapisan dengan cara (a) difusi non-logam atau (b) difusi dan migrasi ion reaktan. (Shreir et al, 1963). Menurut Fontana dan Greene pada tahun 1997, terdapat 3 jenis korosi kering yang biasa dijumpai :

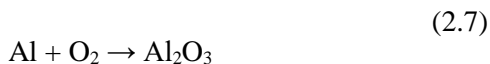
- Korosi oksidasi,
- Korosi akibat gas lain,
- Korosi logam cair.

2.2.1 Korosi Oksidasi

Pada jenis korosi ini, logam yang teroksidasi menjadi oksidanya, dapat dibagi menjadi 4 jenis yaitu:

i. Oksida Stabil

Pada kasus aluminium (Al), tembaga (Cu), dll, oksida yang terbentuk pada permukaan logam memiliki karakteristik yang stabil. Oksida muncul sebagai lapisan dengan kelekatan tinggi untuk melindungi logam di bawahnya. Oksida yang terbentuk sesuai dengan reaksi berikut:



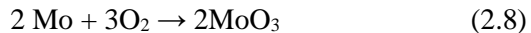
Alumina (Al_2O_3) dan oksida tembaga (CuO) bertindak sebagai lapisan pelindung.

ii. Oksida tak Stabil

Pada beberapa kasus oksida logam yang terbentuk pada permukaan logam terurai kembali menjadi logam dan oksigen. Oksida perak (Ag), emas (Au), dan platinum (Pt) memiliki karakteristik tak stabil dan karena logam tersebut tidak dapat mengalami korosi oksidasi. Dengan demikian, perak, emas, dan platinum merupakan logam yang sangat stabil dan tidak rentan terhadap korosi oksidasi.

iii. Oksida mudah menguap

Beberapa oksida logam memiliki karakteristik mudah menguap dan karenanya oksidasi terus berlangsung sampai seluruh logam dikonversi menjadi oksida logamnya. Salah satu contohnya adalah oksida molybdenum (Mo).



iv. Oksida berporos

Lapisan oksida berpori memungkinkan aerasi terus-menerus melalui pori-pori dan dengan demikian korosi berlanjut sampai semua logam habis. Dengan kata lain, lapisan oksida cukup tertekan atau tegang, yang mengarah pada pembentukan retakan dan pori-pori seperti dalam kasus Li, Na, K, dll.

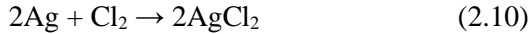


Logam-logam tersebut sangat rentan terhadap korosi. M berukuran kecil dan memiliki kecenderungan untuk berdifusi ke permukaan dengan cepat. O^{2-} memiliki ukuran yang besar dan karenanya difusi ke dalam O_2 melalui lapisan oksida yang lambat. Ada beberapa kemungkinan terjadinya difusi ion:

- a. Ion logam mungkin berpindah ke luar,
- b. Ion oksida mungkin berpindah ke dalam,
- c. Molekul oksigen berpenetrasi menuju *interface* antara logam/oksida,
- d. Kedua proses a dan b terjadi secara serentak.

2.2.2 Korosi akibat Gas Lain

Korosi juga dapat terjadi akibat gas seperti klorin (Cl_2), hydrogen sulfida (H_2S), F_2 , dll. Misalnya, perak (Ag) dapat mengalami korosi akibat adanya Cl_2 yang sesuai dengan reaksi berikut:



2.2.3 Korosi Logam Cair

Saat logam cair mengalir melewati permukaan logam padat dengan perbedaan temperatur, terdapat kemungkinan bahwa logam padat akan larut dalam logam cair pada temperatur yang lebih tinggi kemudian mengendap kembali pada temperatur rendah. Sebagai contoh, logam natrium menyebabkan korosi kadmium dalam reaktor nuklir.

2.3 Oksidasi Temperatur Tinggi

2.3.1 Reaksi Oksidasi

Sebuah logam (M) bereaksi dengan oksigen atau unsur gas lain pada temperatur tinggi diawali dengan adsorpsi oksigen, reaksi kimia membentuk lapisan oksida, nukleasi oksida dan pertumbuhan lapisan yang kontinu, yang dapat melindungi logam dasarnya. Gambar 2.2 merupakan ilustrasi pembentukan serta pertumbuhan lapisan oksida.

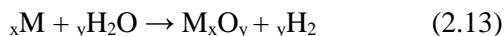
Lapisan tersebut dapat menebal menjadi lapisan yang tidak melindungi yang dapat menyebabkan berbagai kerusakan seperti kavitasi, *microcracks* dan porositas. Oksidasi yang terjadi di udara karena oksigen berlangsung menurut reaksi,



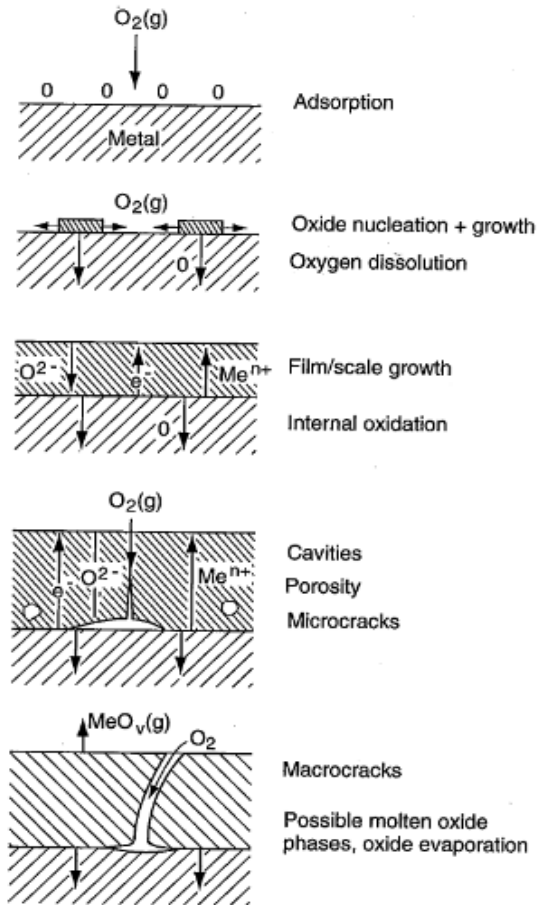
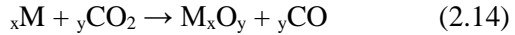
lebih umumnya,



Pada logam (M) juga dapat dioksidasi dengan uap air atau karbon dioksida sesuai dengan,



dan



Gambar 2. 2 Pembentukan lapisan oksida logam pada temperatur tinggi (Jones, 1996)

Komposisi kimia dan sifat fisik dari sebuah lapisan merupakan hal yang penting dalam menentukan laju oksidasi dan

usia pakai jika terekspos pada lingkungan oksidasi temperatur tinggi. (Jones, 1996)

2.3.2 Tinjauan dalam Termodinamika

Salah satu tinjauan penting dalam menganalisis oksidasi adalah menggunakan kesetimbangan termodinamika. Kerumitan dari fenomena oksidasi biasanya ditentukan dari analisis termodinamika ditunjukkan dalam bentuk grafik. Beberapa jenis diagram pada termodinamika yang biasa digunakan pada penelitian oksidasi adalah :

1. Diagram hubungan antara energi bebas Gibbs dengan komposisi dan aktivasi dengan komposisi, digunakan untuk menjelaskan termodinamika dari larutan
2. Diagram hubungan antara energi bebas dengan temperatur yang menyediakan data secara termodinamika untuk kelompok senyawa, oksida, sulfide, karbida dan lain-lain
3. Diagram jenis gas/uap, yang menyediakan tekanan uap dari senyawa ditunjukkan sebagai variabel yang sesuai seperti tekanan parsial dari komponen gas
4. Diagram stabilitas *isothermal* dua dimensi, yang memetakan fasa stabil pada suatu system satu komponen logam dan dua komponen non-logam yang reaktif
5. Diagram stabilitas *isothermal* dua dimensi, yang memetakan fasa stabil pada suatu system dari dua komponen logam dengan satu komponen non-logam yang reaktif
6. Diagram stabilitas *isothermal* dua dimensi, yang memetakan fasa stabil pada suatu system dua komponen logam dengan dua komponen non-logam yang reaktif.

Penentuan dari kondisi lingkungan yang dapat membentuk produk korosi perlu dilakukan seperti pemilihan oksidasi dari paduan. Untuk menentukan hal ini, diagram Ellingham yang memetakan energi bebas standar pembentukan (ΔG°) dengan temperatur dari beberapa jenis senyawa seperti oksida, sulfide, karbida sangat berguna untuk membandingkan stabilitas dari senyawa.

2.3.3 Diagram Ellingham

Diagram Ellingham (gbr 2.3) menyajikan hubungan energi bebas standar oksidasi dari logam murni dengan temperatur. Representasi yang paling umum digunakan untuk menyajikan 1 mol dari oksidasi sebuah logam mengacu pada reaksi :



Sehingga pada temperatur T, energi bebas standar ΔG°_T dari reaksi tersebut adalah

$$\Delta G^\circ_T = \Delta H^\circ_T - T \Delta S^\circ_T \quad (2.16)$$

Dimana ΔH°_T dan ΔS°_T adalah *enthalpy* dan *entropy* standar dari reaksi. Pada keadaan setimbang, dapat dirumuskan sebagai

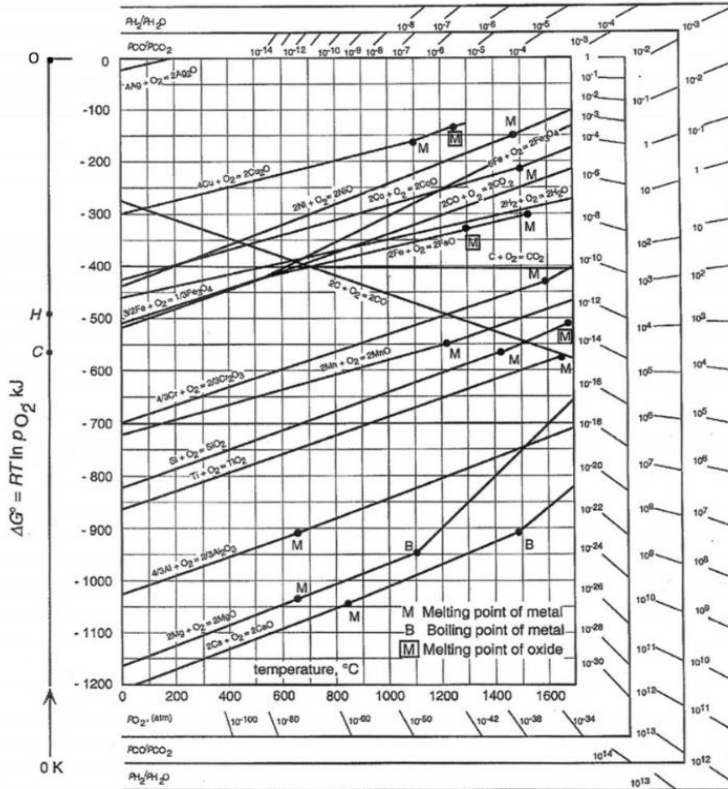
$$\Delta G^\circ_T = -RT \ln K = -RT \ln \left(\frac{a_{MO_2}}{a_M \cdot P_{O_2}} \right) \quad (2.17)$$

Diasumsikan jika aktivitas M dan MO_2 adalah sebagai satu kesatuan, maka

$$\Delta G^\circ_T = RT \ln P_{O_2} \quad (2.18)$$

Nilai dari ΔG°_T ditunjukkan dalam satuan *kilojoules* per mol dari O_2 , jadi stabilitas dari berbagai oksida dapat dibandingkan secara langsung; semakin rendah posisi garis pada diagram, semakin stabil oksida tersebut. Nilai dari P_{O_2} dapat didapatkan secara langsung dari diagram dengan cara menarik garis lurus dari titik 'O' ke titik pada garis energi bebas yang berpotongan dengan temperatur diinginkan, lalu diteruskan hingga mencapai garis skala di sisi kanan berlabel P_{O_2} . Nilai dari tekanan rasio H_2/H_2O dapat didapatkan dengan cara yang sama namun diawali dari titik "H" lalu diakhiri di skala berlabel H_2/H_2O . Nilai rasio CO/CO_2 juga dapat didapatkan dengan cara menarik garis dari titik "C" ke garis

skala CO/CO₂. Nilai-nilai tersebut digunakan untuk menentukan oksida yang terbentuk secara termodinamika. (Revie, 2011)



Gambar 2. 3 Diagram Ellingham (Revie, 2011)

2.3.4 Kinetika Oksidasi

Laju reaksi merupakan parameter yang penting dalam oksidasi logam. Produk dari reaksi oksidasi umumnya terjadi pada permukaan logam, maka lajur oksidasi dapat diukur dari pertambahan berat per luas. (Fontana, 1987)

Kinetika reaksi merupakan tinjauan tentang kecepatan terjadinya sebuah reaksi kimia. Interaksi antara material dan lingkungan dapat menjadi faktor utama terjadinya sebuah reaksi. Adapun faktor lingkungan yang mempengaruhi diantaranya :

1. Temperatur
2. Waktu atau siklus termal
3. Jenis media korosi serta konsentrasi
4. Tegangan statis dan regangan

Sedangkan faktor material yang mempengaruhi diantaranya :

1. Kondisi lapisan permukaan
2. Energi bebas pembentukan oksida dari paduan
3. Komposisi kimia dan struktur paduan
4. Koefisien interdifusi dari sebuah material dengan lapisan
5. Perbedaan koefisien muai dari material
6. Bentuk dan ukuran specimen
7. Kelarutan dari unsur gas pada material
8. Pembentukan oksida selama proses aplikasi dengan kondisi yang berbeda

Sebuah material dapat mengalami perubahan kinetika reaksinya dikarenakan perubahan mekanisme korosi. Contohnya, sebuah paduan mengalami korosi diawali dengan kinetika parabolic saat proses pembentukan lapisan, lalu memasuki tahapan kinetika reaksi linier pada proses pertumbuhan lapisan dan berakhir pada kondisi korosi katastrofik pada saat pembentukan lapisan selesai serta laju korosi berubah secara parabol.(Baboian, 2005). Secara umum, kinetika oksidasi dapat dihitung melalui persamaan (2.19):

$$x^n = k \cdot t \quad (2.19)$$

Dimana: x = ketebalan lapisan oksida per luasan area $[\frac{\Delta m}{s} (\frac{mg}{cm^2})]$; k = konstanta laju oksidasi; t = waktu.

Tiga jenis kinetika dasar telah digunakan untuk menentukan laju oksidasi dari logam murni yaitu parabolic, logaritmik, dan linear. Perbedaan kurva kinetika oksidasi dapat dilihat gambar 2.4.

1) Reaksi kinetika parabolic (*Parabolic reaction kinetics*)

Reaksi kinetika parabolic menunjukkan oksidasi temperatur tinggi dimana pada laju tersebut terdapat difusi. Hal ini menjadi karakter terbentuknya lapisan pelindung dan terdapat penetrasi oleh unsur-unsur korosi seperti oksigen, karbon atau sulfur pada material tertentu.

Persamaan laju reaksi kinetika parabolic ditunjukkan pada persamaan (2.20)

$$x^2 = k_p t \quad (2.20)$$

Dimana: k_p = konstanta laju oksidasi parabolik.

2) Reaksi kinetika logaritmik (*Logaritmik reaction kinetics*)

Reaksi kinetika logaritmik biasa digunakan pada lapisan oksida tipis yang terbentuk pada temperatur yang relatif rendah dan jarang dipakai pada oksidasi temperatur tinggi.

Persamaan laju reaksi kinetika logaritmik ditunjukkan pada persamaan (2.21)

$$x = k_c \log(ct + b) \quad (2.21)$$

Dimana k_c = konstanta laju oksidasi logaritmik ; c dan b = konstan

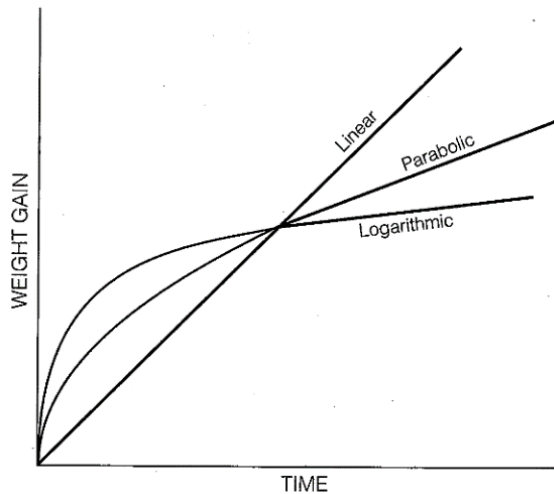
3) Reaksi kinetika linear (*Linear reaction kinetics*)

Reaksi kinetika linear sering dikaitkan dengan material yang membentuk lapisan oksida non-protetif dimana lapisan oksida ini memiliki tingkat porositas, retak yang tinggi atau daya lekat yang kurang.

Persamaan laju reaksi kinetika liner ditunjukkan pada persamaan (2.22)

$$x = k_L t \quad (2.22)$$

Dimana k_L adalah konstanta laju oksidasi linear. Logam dengan kinetika oksidasi linear pada temperatur tertentu mengalami kecenderungan untuk mengalami oksidasi katastrofik pada temperatur yang lebih tinggi. (Roberge, 2000)



Gambar 2. 4 Kurva tipe-tipe kinetika oksidasi (Jones, 1996)

2.3.5 Laju Reaksi – Teori Arrhenius

Kenaikan temperatur dapat menambah kecepatan reaksi kimia. Hal ini disebabkan karena dengan meningkatnya temperatur akan membuat vibrasi antar molekul juga meningkat. Peningkatan vibrasi meningkatkan frekuensi tumbukan, inilah yang menyebabkan peningkatan laju reaksi. Teori Arrhenius merupakan persamaan yang menghubungkan antara laju reaksi dengan energi aktivasi.

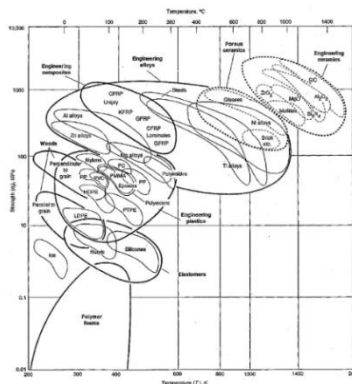
Persamaan laju reaksi pada teori Arrhenius dapat dilihat pada persamaan (2.23)

$$k_p = A \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (2.23)$$

Dimana k_p adalah konstanta laju reaksi, A adalah konstanta Arrhenius, E_a adalah energi aktivasi, R adalah konstanta gas dan T adalah temperatur. Energi aktivasi lebih mudah didapatkan dengan membuat kurva $\ln k_p$ terhadap $1/T$. (Staszewska dan Scendo, 2016)

2.4 Material Tahan Temperatur Tinggi

Ketahanan korosi dan kekuatan mekanik adalah dua hal utama yang dijadikan pertimbangan dalam pemilihan material untuk aplikasi temperatur tinggi dan lingkungan yang mengoksidasi. Beberapa sifat mekanik yang umum dijadikan pertimbangan adalah kekuatan tarik, kekuatan mulur, keuletan, ketangguhan serta *creep*.. Material yang mempunyai daya tahan terhadap temperatur tinggi adalah keramik. Selain keramik, logam memiliki ketahanan temperatur tinggi, namun kemampuan logam dalam menahan temperatur tinggi masih di bawah keramik. Polimer merupakan material yang paling lemah dalam hal ketahanan temperatur tinggi. Tetapi, polimer memiliki sifat paling mudah untuk dibentuk diikuti dengan logam lalu material yang paling sulit untuk dibentuk adalah keramik.



Gambar 2. 5 Temperatur kerja dan kekuatan dari sebuah material. (Bandanadjaja, 2009)

Urutan material jika dikaitkan dengan temperatur kerja dan kekuatannya ditunjukkan pada Gambar 2.5. (Bandanadjaja, 2009)

2.4.1 Ceramic Engineering

Pada awal tahun 1960, material untuk temperatur tinggi terfokus pada SiC dan Si₃N₄. Banyak industri pada tahun tersebut sedang mengembangkan produksi dari *ball bearings*, *armor*, *fibers* dan juga sudu turbin. Tetapi, pada dekade selanjutnya, studi tentang material yang digunakan untuk kendaraan dengan kecepatan *hypersonic*. Pada kecepatan tersebut dibutuhkan material yang tahan pada temperatur yang sangat tinggi untuk komponen-komponennya. Temperatur tersebut bisa mencapai 3000°C. Terdapat lebih dari 300 material yang mempunyai temperatur leleh lebih dari 2000°C seperti SiC, logam refraktori (Hf, Nb, Ir, Re, Ta, W), oksida (HfO₂, ZrO₂, UO₂, ThO₂), berbagai karbida, nitride dan borida dari logam transisi serta senyawa lainnya. Temperatur leleh merupakan salah satu dari sekian banyak sifat yang digunakan pada proses pemilihan material. Hampir semua mesin dan teknologi *hypersonic* mengalami fenomena oksidasi yang disebabkan oleh bahan bakar. Perilaku oksidasi dari material menjadi sifat kedua yang diperhatikan pada pemilihan material. Kekuatan (pada temperatur kamar dan temperatur aplikatif), konduktifitas *thermal*, *thermal expansion*, *density*, mudah dibentuk, dan juga biaya merupakan faktor yang penting untuk menentukan material yang optimal pada aplikasi tertentu. Keramik yang sering digunakan pada aplikasi temperatur tinggi adalah borida, karbida dan nitrida dari unsur golongan IV dan V. (Wuchina, et al., 2007)

2.4.2 Superalloy

Ketahanan korosi dan kekuatan mekanik adalah dua hal utama yang dijadikan pertimbangan dalam pemilihan material untuk aplikasi temperatur tinggi dan lingkungan yang mengoksidasi. Beberapa sifat mekanik yang umum dijadikan pertimbangan adalah kekuatan tarik, kekuatan mulur, keuletan,

ketangguhan serta *creep*. Logam paduan yang biasa digunakan pada temperatur tinggi adalah *superalloy*. *Superalloy* merupakan logam yang memiliki kombinasi sifat-sifat terbaik. Kebanyakan dari *superalloy* digunakan pada komponen turbin pesawat terbang karena harus tahan saat terekspos oleh lingkungan yang berbahaya (oksidasi dan temperatur tinggi). Kekuatan dan ketahanan deformasi juga sangat dibutuhkan, karena adanya tegangan sentrifugal saat berputar memungkinkan terjadinya deformasi plastis. Paduan jenis ini dapat diklasifikasikan menurut logam dasarnya, yang dapat dibagi menjadi 3 kelompok yaitu, *iron-nickel base alloy*, *nickel base alloy*, dan *cobalt base alloy*. (Callister & Rethwisch, 2010)

Secara umum, perilaku korosif dari paduan bergantung pada interaksi:

- Komposisi kimia dan struktur dari logam paduan;
- Lapisan pada permukaan logam paduan;
- Lingkungan. (Revie & Uhlig, 2008)

2.5 *Superalloy*

2.5.1 *Co-base Alloy*

Paduan berbasis cobalt (Co) merupakan paduan yang diperkuat dengan kombinasi karbida dan *solid solution hardeners*. Karena hal tersebut, kekuatan yang tinggi didapatkan pada rentang temperatur yang luas dan mempunyai ketahanan pada banyak lingkungan, paduan Co-Cr digunakan sebagai material tahan aus khususnya pada lingkungan yang berbahaya dan sebagai material struktural pada aplikasi temperatur tinggi. Paduan yang digunakan sebagai keperluan struktural biasanya mengandung sedikit konsentrasi karbon (C), tetapi mengandung lebih banyak nikel (Ni), dan biasanya tersedia dalam bentuk produk tempa. Karbida pada paduan tahan aus meningkatkan ketahanan abrasi tetapi mengurangi keuletan dari material. (Roberge, 2000)

Walaupun cobalt (Co) jumlahnya lebih sedikit dan lebih mahal dibandingkan nikel, paduan cobalt biasanya lebih unggul jika digunakan pada beberapa aplikasi yang digunakan pada

paduan nikel atau paduan besi. Paduan cobalt memiliki ketahanan korosi aus, erosi karena cairan dengan kecepatan tinggi dan kerusakan akibat kavitasi yang lebih baik. Paduan *chromium-beraing cobalt* dapat dibagi menjadi tiga kelompok :

1. Paduan untuk ketahanan aus
2. Paduan untuk penggunaan temperatur tinggi
3. Paduan untuk ketahanan korosi basah dan korosi aus

Paduan cobalt pertama dikembangkan pada awal tahun 1900-an oleh Elwod Haynes yang digunakan untuk tahan lingkungan korosif dan kekuatan serta kekerasan pada temperatur tinggi. Paduan ini biasa digunakan untuk *cutting tools* yang dioperasikan pada media kimia yang agresif, katup uap, pengukur tekanan, busi, *nozzles*, dan implan pada tubuh manusia. (Revie & Uhlig, 2008)

Beberapa contoh paduan cobalt yang banyak dikomersilkan tercantum pada tabel 2.1

Tabel 2. 1 Paduan cobalt beserta fungsi dan komposisi unsur
(Revie & Uhlig, 2008)

Fungsi	Nama	UNS No	C	M	W	N	F	C	M	Si	C
			r	o		i	e		n		o
Tahan Aus	6B	R300 16	3 0	1. 5 ^a	4	2. 5	3 a	1	1. 4	0. 7	b al
Temperatur Tinggi	25	R306 05	2 0		1 5	1 0	3 a	0.1	1. 5	0. 4 ^a	b al
Korosi Basah + Tahan Aus	Ultimet	R312 33	2 6	5	2	9	3	0.0 6	0/ 8	0. 3	b al

Note: ^a = maksimum

2.5.2 Ni-Base Alloy

Nikel dan paduannya memiliki kelebihan dalam hal ketahanan korosi pada berbagai kondisi lingkungan korosif yang

biasa dijumpai pada proses industri. Nikel sendiri merupakan logam yang sangat berguna karena merupakan logam tahan korosi. Nikel juga dapat dipadukan dengan berbagai jenis logam lainnya. Hal tersebut membuat paduan nikel mempunyai keunikan masing-masing seperti ketahanan korosi serta ketahanan temperatur tinggi yang berbeda. Beberapa paduan mungkin tidak bisa digunakan pada lingkungan korosif basah namun tahan terhadap lingkungan korosi kering dan sebaliknya. Karena memiliki sifat yang berbeda-beda dari setiap paduan, *ni-base alloy* memiliki aplikasi yang sangat luas di berbagai bidang seperti proses kimia, petrokimia, kelautan, *pulp and paper*, minyak bumi dan gas alam, perlakuan panas, konversi energi dan berbagai macam industri lainnya. Komposisi kimia, struktur mikro yang ada pada paduan, berbagai reaksi yang terjadi pada *interface* paduan/lingkungan, serta lingkungan sekitar merupakan faktor-faktor yang menyebabkan korosi. (Revie 2011)

Pada urutan elektrokimia, nikel lebih mulia dibandingkan besi tetapi lebih reaktif dibandingkan tembaga. Pada lingkungan reduksi, seperti asam sulfat cair, nikel lebih tahan korosi dibandingkan besi tetapi tidak setara dengan tembaga atau paduan nikel-tembaga. Walaupun nikel dapat membentuk lapisan pasif pada beberapa lingkungan, lapisan tersebut tidak sepenuhnya stabil; secara umum nikel tidak dapat digunakan pada lingkungan oksidasi seperti asam nitrat. Jika dipadukan dengan krom, lapisan pasif yang terbentuk menjadi lebih stabil, yang dapat meningkatkan ketahanan korosi pada berbagai lingkungan oksidasi. Selain ketahanan korosi yang baik, paduan nikel banyak digunakan di berbagai industri karena memiliki ketahanan korosi lokal yang sangat baik seperti korosi sumuran (*pitting corrosion*), *crevice corrosion*, dan *stress corrosion cracking*. (Schweitzer, 2007)

Paduan nikel dapat diklasifikasikan berdasarkan paduannya, setiap paduan memiliki karakteristik korosi dan sifat mekanik yang berbeda. Klasifikasi pada paduan nikel dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Jenis-jenis Paduan Nikel (Revie, 2011)

Jenis Paduan	Tahan Terhadap Lingkungan/Kegunaan	Contoh Paduan
Ni	<i>Caustic</i>	Ni-200/201
Ni-Cu	Halida non-oksidasi, <i>caustic</i>	. Alloy 400, K-500
Ni-Mo	Non-oksidasi	Alloy B-2, B-3, B-4, etc
Ni-Si (beberapa dengan Cr)	Oksidasi tinggi, non-halida	Alloy D, Lewmet, D-205
Ni-Fe	<i>Controlled expansion</i> , non-oksidasi	Invar, Penifer, etc
Ni-Cr-Fe	Oksidasi, non-halida	Alloy 600, 800, 690, etc
Ni-Cr-Fe-Mo	Oksidasi, lingkungan korosi lokal menengah	Alloy 825, G-3, G-30, alloy 33, etc
Ni-Cr-Mo	Oksidasi, lingkungan korosi lokal tinggi	Alloy 625, alloy 276, alloy 22, C-2000
Ni-Cr-Fe-Mo (Al,Ti,Nb)	Pengerasan presipitasi, lingkungan seperti paduan tanpa (Al,Ti,Nb)	X-750, Alloy 718, Alloy 945, etc
Ni-Cr-Mo-Fe-Co-C-Al-Ti-Nb-logam tanah jarang	Korosi temperatur tinggi, ketahanan aus	X, alloy 214, Nimonic, HR 160, 230, MP-
Ni-Ti	<i>Shape memory alloys</i>	Nitinol

2.6 Inconel 625

Inconel 625 merupakan sebuah paduan nikel-krom yang mengalami *solution strengthened* karena mengandung *molybdenum* dan niobium. (Shoemaker, 2005)

Perkembangan Inconel 625 (UNS N06625) dimulai pada tahun 1950-an dimana permintaan material pipa uap dengan kekuatan tinggi sangat besar. Pipa uap tersebut digunakan pada pembangkit listrik yang biasa digunakan pada temperatur 649°C (1200°F) dan tekanan 13.8 MPa (2000 psi) (Eiselstein & Tillack, 1958). Komposisi dari Inconel 625 tercantum pada Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Komposisi Inconel 625 (%) (Floreen, Fuchs, Yang, 1994)

Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	C	Si	Al	Ti	Mn
58 (min)	20.0- 23.0	8.0- 10.0	3.15- 4.15	5.0 (max)	0.10 (max)	0.50 (max)	0.40 (max)	0.40 (max)	0.50 (max)

Pengaruh dari unsur-unsur yang terdapat pada Inconel 625 adalah sebagai berikut :

1. Nikel (Ni)

Nikel berfungsi sebagai matriks untuk melarutkan unsur lainnya, meningkatkan stabilitas *thermal*. Meningkatkan ketahanan korosi pada lingkungan non-oksidasi, tahan terhadap alkali serta meningkatkan ketahanan *stress cracking corrosion* walaupun terdapat klorin dengan konsentrasi yang tinggi. Nikel juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap karburasi, nitridasi dan sulfidasi pada temperatur tinggi. Meningkatkan kekuatan *solid-solution*. Nikel pun dapat meningkatkan sifat mekanik pada temperatur tinggi.

2. Aluminium (Al)

Secara umum aluminium berfungsi sebagai *deoxidizer*. Pada temperatur tinggi, aluminium bersama krom dapat meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi tetapi mengurangi ketahanan nitridasi. Selain itu, aluminium meningkatkan ketahanan sulfidasi dan meningkatkan efek dari *age-hardening*.

3. Mangan (Mn)

Biasanya mangan ditambahkan sebagai *deoxidizer* saat peleburan (*melting*) tetapi pada beberapa paduan nikel tidak memiliki efek pada korosi. Kadar mangan yang tinggi juga

dapat menyebabkan ketidakstabilan struktur logam karena presipitasi fasa intermetalik. Pada temperatur tinggi, mangan dapat meningkatkan sedikit kekuatan dan *creep* tetapi menurunkan ketahanan oksidasi dan meningkatkan kelarutan nitrogen.

4. Silikon (Si)

Meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan dengan tingkat oksidasi yang tinggi, lingkungan *non*-halida seperti asam nitrat dan asam sulfat. Terkadang penambahan Si dapat menyebabkan pengerasan presipitasi dengan membentuk Ni_3Si . Si dapat meningkatkan reaktivitas karbon yang berakibat pembentukan karbida. Pada temperatur tinggi, penambahan Si dapat meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi, nitridasi, sulfidasi dan karburasi tetapi menurunkan ketahanan klorinasi. Bekerjasama dengan krom untuk meningkatkan degradasi pada temperatur tinggi.

5. Kromium (Cr)

Meningkatkan ketahanan pada lingkungan yang mengoksidasi. Meningkatkan kelarutan dari nitrogen dan karbon. Jika berkombinasi dengan Mo, W dan N dapat meningkatkan ketahanan korosi lokal. Pada temperatur tinggi, Cr dapat meningkatkan ketahanan oksidasi, sulfidasi, karburasi serta *metal dusting*. Tetapi menurunkan ketahanan nitridasi dan *fluorination*.

6. Molybdenum (Mo)

Meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan *non*-oksidasi seperti HCl, H_2SO_4 . Jika dikombinasikan bersama krom (Cr) akan meningkatkan ketahanan oksidasi pada lingkungan halide. Menyebabkan terjadinya pengerasan *solid-solution*. Pada temperatur tinggi, unsur Mo dapat meningkatkan kekuatan material serta kekuatan *creep* tetapi menurunkan ketahanan oksidasi pada temperatur yang lebih tinggi lagi.

7. Besi (Fe)

Secara umum, besi ditambahkan pada paduan nikel untuk mengurangi biaya produksi dan meningkatkan pemanfaatan

sraps. Besi juga dapat meningkatkan kecenderungan untuk membentuk fasa intermetalik yang merugikan seperti sigma. Pada komposisi yang terdapat Cr, Mo dan W, maka besi yang ditambahkan konsentrasinya harus sedikit untuk menjaga stabilitas metalurginya.

8. Niobium (Nb)

Biasanya ditambahkan untuk mencegah pembentukan krom karbida atau untuk memberikan *precipitation hardening*. Meningkatkan kekuatan *creep* jangka pendek, meningkatkan ketahanan karburasi tetapi menurunkan ketahanan nitridasi.

9. Titanium (Ti)

Biasanya ditambahkan untuk mencegah terbentuknya krom karbida serta memberikan *precipitation hardening*. Menurunkan ketahanan terhadap nitridasi

10. Karbon (C)

Meningkatkan kekuatan, ketahanan terhadap nitridasi serta ketahanan terhadap oksidasi pada temperatur tinggi. Meningkatkan pembentukan karbida pada batas butir yang merugikan. (Revie, 2011)

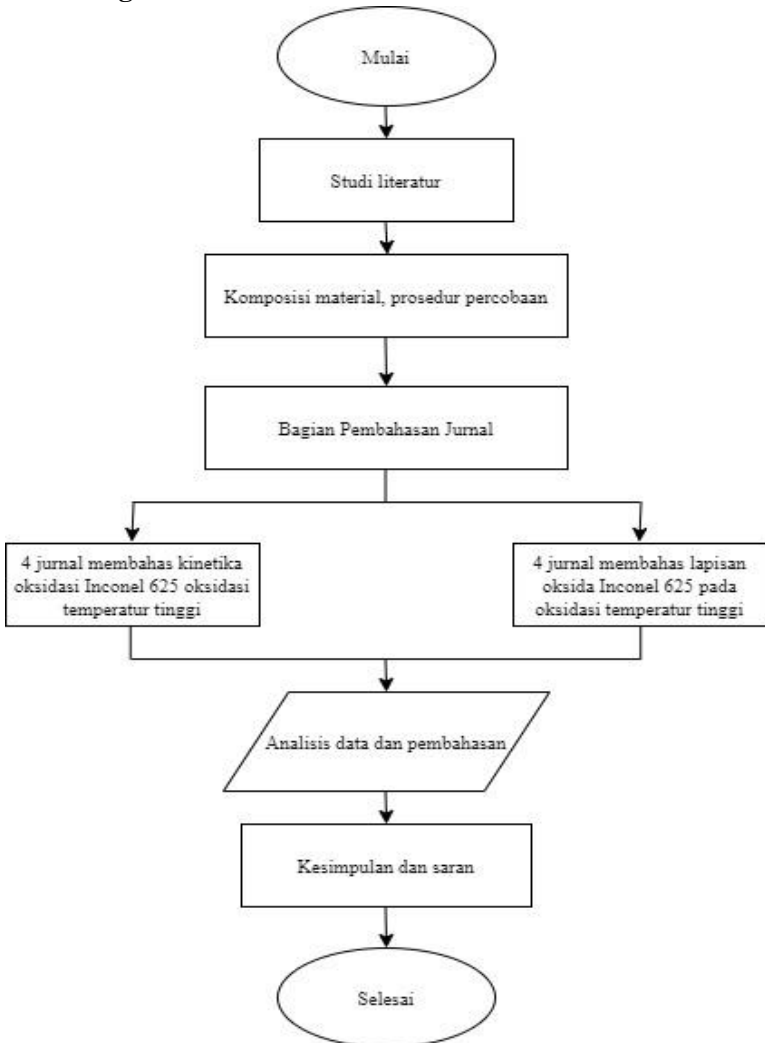
Inconel 625 memiliki sifat mekanik yang baik seperti kekuatan tarik, elastisitas, dan ketangguhan terhadap *impact* pada temperatur *cryogenic*. Inconel 625 juga memiliki kemampuan las yang sangat baik dan tahan terhadap *hot cracking*. Kelebihan dari Inconel 625 dapat dilihat dari kegunaannya pada dua area yaitu pada lingkungan basah serta lingkungan temperatur tinggi. Pada kondisi basah, Inconel 625 memiliki ketahanan korosi basah yang baik hingga temperatur yang sedikit lebih tinggi. Pada lingkungan dengan temperatur tinggi, Inconel 625 memiliki kekuatan yang tinggi serta ketahanan *creep*, *rupture*, serta korosi temperatur tinggi. (Shoemaker, 2005). Paduan ini memiliki ketahanan korosi pada lingkungan air laut serta ketahanan terhadap *wet chlorine*, *hypochlorite*, dan *oxidizing chlorides* pada temperatur atmosfer. Paduan ini memiliki kekuatan yang baik dan tahan pada temperatur tinggi hingga 980°C dan banyak digunakan pada aplikasi temperatur tinggi dan *aerospace*. (Revie, 2011)

Paduan ini banyak digunakan pada berbagai macam bidang industri dengan lingkungan yang ekstrem. Seperti sudu turbin gas, *seals*, ruang pembakaran, pengolahan kimia dan bejana bertekanan (*pressure vessel*), pipa *heat exchanger*, generator uap, proses pengolahan gas alam dengan lingkungan yang mengandung gas H₂S dan CO₂. Salah satu *heat exchanger* yang menggunakan Inconel 625 adalah recuperator, khususnya pada turbin gas AGT 1500 yang digunakan oleh tank US M1 Abrams. (Shoemaker, 2011). Recuperator merupakan sebuah alat yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi. Recuperator adalah tempat pertukaran panas dari gas buang ke udara masuk. Pertukaran panas ini terjadi secara konveksi dari gas buang menuju pipa/plat recuperator, lalu panas tersebut dialirkan secara konduksi pada pipa, terakhir panas tersebut berkonveksi ke udara yang masuk. (Seong, Hwang, Kim, 2000)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI *REVIEW*

3.1 Diagram Alir



Gambar 3. 1 Diagram alir paper review

3.2 Material dan Komposisi Kimia

Adapun material serta komposisi kimia spesimen dari setiap jurnal yang dibahas adalah sebagai berikut

Tabel 3. 1 Material dan Komposisi Kimia Material tiap Jurnal

Unsur	Material dan Komposisi (%wt)				
	Rakowski et al	Kumar et al	Staszewska dan Scendo		Buscail et al
	Inconel 625	Inconel 625	Inconel 625	Inconel 617	Inconel 625
Ni	Bal	61.9	60	53	Bal
Cr	20.8	21.2	21	20	22.4
Mo	8.3	9.0	9	8.285	9.1
Fe	4.4	3.5	5	3	0.23
Nb	3.8	3.7	3.56	-	3.7
Al	0.21	0.2	-	-	0.12
Si	0.13	0.2	0.5	1	0.14
Ti	0.17	0.2	0.4	0.6	0.22
Co	-	0.1	-	12,5	0.033
Mn	0.03	-	0.5	1	0.005
S	-	-	0.015	0.015	0.005
P	-	-	0.015	-	-
C	-	-	0.01	0.1	0.008
Cu	-	-	-	0.5	-

3.3 Prosedur Penelitian

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

3.3.1 Jurnal Rakowski, et al.

Prosedur penelitian yang telah dilakukan oleh Rakowski, et al (2005) sebagai berikut :

1. Meng-anil spesimen dengan tebal 0.1 mm dengan hydrogen,

2. Mengoksidasi spesimen menggunakan *box furnace* pada 2 lingkungan yaitu udara dan udara dengan penambahan uap air (10% uap air),
3. Mengoksidasi spesimen pada temperatur 977 K, 1033 K, dan 1088 K selama 15000 jam,
4. Mendinginkan spesimen pada temperatur ruang (setiap sekitar 160 jam) untuk ditimbang dan pengujian visual pada kedua lingkungan,
5. Mengkarakterisasi spesimen yang telah dioksidasi menggunakan SEM-EDS.

3.3.2 Jurnal Kumar, et al.

Prosedur penelitian yang telah dilakukan oleh Kumar, et al (1996) sebagai berikut :

1. Memotong spesimen hingga berukuran 10 x 10 x 1 mm,
2. Memoles material menggunakan *electropolishing* dengan 20% *perchloric acid* dan 80% *ethanol* elektrolit pada temperatur 230K,
3. Menaruh spesimen di TGA untuk melakukan oksidasi temperatur tinggi,
4. Mengoksidasi spesimen pada temperatur 1323 K hingga 1523 K dengan tekanan 0.12 kPa selama 150 menit,
5. Menganalisis lapisan oksida yang terbentuk menggunakan XPS, AES dan EDS.

3.3.3 Jurnal Staszewska dan Scendo

Prosedur penelitian yang telah dilakukan oleh Staszewska dan Scendo (2016) sebagai berikut:

1. Memotong spesimen hingga berukuran 6 x 6 x 6 mm dengan luas permukaan sebesar 2.16 cm²,
2. Memoles spesimen dengan kertas gosok dengan grit 2500,
3. Membilas spesimen dengan dua air sulingan, lalu diberi ethanol,
4. Menaruh spesimen pada *crucible* Al₂O₃,
5. Menaruh spesimen yang sudah ditaruh di *crucible* Al₂O₃ pada *thermogravimetric measurements* (TGA),

6. Mengoksidasi spesimen dari temperatur 373 K hingga 1473 K selama 96 jam,
7. Menganalisis lapisan oksida yang terbentuk menggunakan XRD, *optical microscope*, dan SEM.

3.3.4 Jurnal Buscail, et al.

Prosedur penelitian yang telah dilakukan oleh Buscail, et al. (2011) sebagai berikut :

1. Mempoles spesimen yang berukuran tebal 1.6 mm dan luas permukaan 5 cm² menggunakan kertas SiC hingga grit 800,
2. Membersihkan spesimen menggunakan ethanol,
3. Mengoksidasi spesimen menggunakan TGA pada temperatur 1173, 1273 dan 1373 K di dua lingkungan yaitu udara (0.3 vol% H₂O) dan udara basah (7.5 vol% H₂O) selama 48 jam,
4. Mendinginkan spesimen hingga temperatur ruangan,
5. Mengkarakterisasi lapisan oksida yang terbentuk menggunakan XRD, SEM-EDS.

3.4 Pengujian berdasarkan Jurnal

Adapun pengujian yang dilakukan dari setiap jurnal yang dibahas sebagai berikut :

Tabel 3. 2 Pengujian yang dilakukan berdasarkan jurnal

Referensi	Pengujian					
	TGA	SEM-EDS	XRD	OM	XPS	AES
Rakowski, et al.	-	✓	-	-	-	-
Kumar, et al.	✓	✓	-	-	✓	✓
Staszewska dan Scendo	✓	✓	✓	✓	-	-
Buscail, et al.	✓	✓	✓	-	-	-

3.5 Mekanisme dan Standarisasi Pengujian

3.5.1 *Thermogravimetric Analyzer (TGA)*

Thermogravimetric analyzer (TGA) merupakan salah satu teknik analisis dimana sebuah material dikondisikan pada lingkungan panas atau dingin dengan laju yang terkontrol menghasilkan data berupa grafik fungsi temperatur. Hasil kurva massa versus temperatur memberikan informasi mengenai stabilitas thermal dan komposisi dari sampel. TGA memiliki sifat kuantitatif, oleh karena itu TGA merupakan teknik pengukuran secara thermal yang sangat tepat, namun memberikan informasi kimia secara tidak langsung. Untuk mendapatkan data dalam bentuk informasi grafis TGA biasanya digabungkan pada beberapa detector dan spektrofotometer seperti MS dan FTIR. TGA memiliki 4 komponen utama yaitu timbangan, *furnace*, pengukur dan pengontrol temperatur, dan *recorder*. Timbangan digunakan untuk mengetahui adanya perubahan (penambahan atau pengurangan) berat dari spesimen yang diuji. Tahapan menggunakan alat ini adalah sebagai berikut, pertama material yang berupa serbuk atau potongan kecil dari material dimasukkan kedalam cawan kecil dari bahan platina, alumina atau teflon. Pemilihan bahan dari cawan ini perlu disesuaikan dengan bahan uji. Pastikan bahan uji tidak bereaksi dengan bahan cawan serta tidak lengket ketika dipanaskan. Analisa memerlukan juga bahan standar sebagai referensi dan penyeimbang dari timbangan mikro. Biasanya dipakai alumina sebagai standar yang juga perlu dimasukkan dalam cawan. Setelah sampel dimasukkan kemudian memprogram urutan pemanasannya. Timbangan dalam keadaan nol dan spesimen dipanaskan menurut siklus panas yang telah ditentukan. Timbangan mengirimkan sinyal berat pada komputer sebagai penyimpanan, berupa temperatur sampel dan waktu. Kurva plot dari sinyal TGA dikonversi ke perubahan berat pada sumbu Y terhadap waktu pemanasan specimen pada sumbu X. Standarisasi yang digunakan pada pengujian ini adalah ASTM E1641-18.

3.5.2 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. Standarisasi yang digunakan pada pengujian ini adalah ASTM E2142.

3.5.3 *X-ray Diffraction (XRD)*

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*. Standarisasi yang digunakan pada pengujian ini adalah ASTM E963-95.

3.5.4 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

Xps digunakan untuk mengetahui mekanisme reaksi adsorpsi gas pada permukaan padat. Alat XPS beroperasi dalam keadaan vakum, dan dilengkapi dengan berbagai fotoelektron gas mulia (atau ion gas mulia) yang berguna untuk membersihkan permukaan sampel (bila sampel diberi perlakuan dalam alat) sebelum diberi perlakuan tertentu, misalnya permukaan sampel dibersihkan menggunakan ion Argon. Teknik spektroskopi fotoelektron mengukur besarnya energi pengionan molekul ketika elektron dikeluarkan dari orbital yang berbeda-beda sehingga informasi yang didapatkan adalah energi orbital tempat elektron berasal. Menggunakan informasi ini dapat menduga spesi yang berkaitan dengan energi orbital tersebut. Teknik ini didasari oleh adanya pemisahan beresolusi tinggi dari energi ikatan elektron pada tingkat inti yang diemisikan oleh efek fotoelektrik yang berasal dari iradiasi sinar X. Sumber photon yang berasal dari iradiasi sinar X, dilewatkan pada sampel. Elektron yang berada pada tingkat dekat inti atau kulit bagian dalam akan diemisikan keluar, yang ditangkap oleh penganalisa dan dideteksi dalam bentuk energi ikatan elektron pada tingkat inti. Energi ikatan elektron tingkat lebih dalam / dekat inti oleh interface/software akan ditampilkan dalam bentuk spektrum energi ikatan terhadap intensitas, yang akhirnya dapat diinterpretasikan sebagai kehadiran molekul atau atom tertentu. Standarisasi yang digunakan pada alat ini adalah ASTM E1523-15.

3.5.5 Atomic Emission Spectroscopy (AES)

Spektroskopi emisi atom (AES) adalah metode analisis kimia yang menggunakan intensitas cahaya yang dipancarkan dari api, plasma, busur, atau percikan pada panjang gelombang tertentu untuk menentukan jumlah suatu unsur dalam sampel. Panjang

gelombang dari garis spektral atom memberikan identitas elemen sedangkan intensitas cahaya yang dipancarkan sebanding dengan jumlah atom unsur. Prinsip dasar dari analisa Atomic Emission Spectrometer (AES) ini yaitu : Apabila atom suatu unsur ditempatkan dalam suatu sumber energi kalor (sumber peneksitasi), maka elektron di orbital paling luar atom tersebut yang tadinya dalam keadaan dasar atau *ground state* akan tereksitasi ke tingkat-tingkat energi elektron yang lebih tinggi. Karena keadaan tereksitasi itu merupakan keadaan yang sangat tidak setabil maka elektron yang tereksitasi itu secepatnya akan kembali ke tingkat energi semula yaitu kekeadaan dasarnya (*ground state*). Pada waktu atom yang tereksitasi itu kembali ketingkat energi lebih rendah yang semula, maka kelebihan energi yang dimilikinya sewaktu masih dalam keadaan tereksitasi akan dibuang keluar berupa emisi sinar dengan panjang gelombang yang karakteristik bagi unsur yang bersangkutan khas. Intensitas Emisi tersebut juga sangat dipengaruhi oleh konsentrasi logam. Dari sini dapat dilakukan analisis kuantitatif. Standar yang digunakan pada pengujian ini adalah ASTM E3047-16.

3.5.6 Optical Microscope (OM)

Mikroskop merupakan alat yang dapat menghasilkan bayangan dari benda yang di mikroskop menjadi lebih besar. Pembesaran ini tergantung pada berbagai faktor, diantaranya titik fokus kedua lensa(objektif f_1 dan okuler f_2 , panjang tubulus atau jarak(t) lensa objektif terhadap lensaokuler dan yang ketiga adalah jarak pandang mata normal (sn). Mikroskop merupakan alat yang dapat menghasilkan bayangan dari benda yang di mikroskop menjadi lebih besar. Pembesaran ini tergantung pada berbagai faktor, diantaranya titik fokus kedua lensa(objektif f_1 dan okuler f_2 , panjang tubulus atau jarak(t) lensa objektif terhadap lensaokuler dan yang ketiga adalah jarak pandang mata normal(sn). Bayangan benda (obyek) yang kita lihat dibentuk dan diperbesar oleh lensa obyektif, didalam tubus mikroskop membentuk bayangan nyata terbalik dari obyek. Bayangan nyata tersebut selanjutnya dibalik

dan diperbesar lagi oleh lensa okuler. Lensa okuler merupakan lensa yang berfungsi untuk membuat bayangan terakhir, sehingga bayangan tersebut dapat dilihat langsung oleh mata pengamat. Lensa yang baik diperoleh dengan memperhatikan pembesaran dan daya pisahnya. Semakin pendek jarak titik api lensa akan semakin kuat pembesarannya, sehingga semakin besar kemampuan suatu lensa akan semakin kecil jarak dua titik api yang berdekatan yang dapat dilihat secara terpisah menggunakan mikroskop. Beberapa lensa obyektif biasanya dipasang pada roda berputar yang disebut revolver. Setiap lensa obyektif dapat diputar ke tempat yang sesuai dengan pembesaran yang diinginkan. Lensa obyektif dibuat dalam beberapa pembesaran yang berbeda, yaitu : 4x, 10x, 40x, dan 100x, demikian juga lensa okuler tersedia beberapa pembesaran, yakni : 4x, 10x, 16x, dan 20x. Lensa okuler dipasang pada ujung dalam tabung dan biasanya yang dipasang adalah yang pembesaran 10x. Dengan demikian jika kita mengamati obyek menggunakan lensa okuler pembesaran 10x dan lensa obyektif 40x, maka pembesaran obyek yang dapat dilihat menjadi 400x dibanding besarnya obyek yang sebenarnya. Kondensor berfungsi sebagai pengatur intensitas cahaya yang masuk ke dalam mikroskop. Kondensor mempunyai dua bagian penting, yaitu : 1. Susunan lensa untuk mengumpulkan sinar sebelum masuk ke dalam obyek dan lensa obyektif. 2. Diafragma berfungsi untuk mengatur sinar tepi yang masuk ke dalam lensa obyektif dan okuler. Pada mikroskop optik, cahaya tampak diteruskan melalui spesimen dan kemudian melalui lensa kaca. Lensa ini merefraksi (membengkokkan) cahaya sedemikian rupa sehingga citra spesimen diperbesar ketika diproyeksikan ke mata, ke film fotografi atau sensor digital, atau ke layar video. Mikroskop cahaya dapat memperbesar secara efektif sekitar 1000 kali dari ukuran asli spesimen. Standar pengujian yang digunakan pada pengujian ini adalah ASTM E3-11.

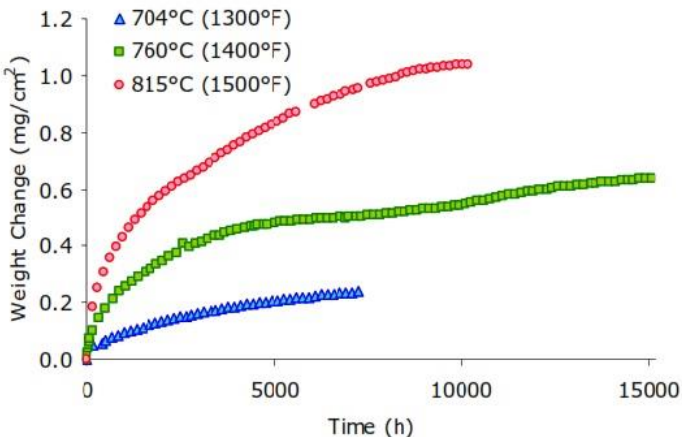
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada *review paper* yang telah dilakukan, didapatkan data yang akan dianalisis dan dibahas berdasarkan kinetika oksidasi dan lapisan oksida yang terbentuk.

4.1 Kinetika Oksidasi

Pada tahun 2005, Rakowski et al melakukan penelitian tentang analisis dari oksidasi temperatur tinggi yang dilakukan pada material Inconel 625 berbentuk lembaran dengan tebal 0.1 mm. Sampel diuji pada dua jenis lingkungan yaitu udara dan uap air. Temperatur oksidasi yang digunakan pada penelitian ini adalah 977 K, 1033 K, dan 1088 K selama 15.000 jam. Pada gambar 4.1 dapat dilihat grafik perubahan massa terhadap waktu pada sampel yang diuji pada lingkungan udara.

Grafik yang membentuk laju oksidasi parabola. Nilai k_p pada oksidasi ini dapat menggupakan persamaan (2.20), yaitu persamaan perubahan berat pada laju reaksi oksidasi parabolik.



Gambar 4. 1 Perubahan berat karena oksidasi sebagai fungsi waktu pada lembaran paduan 625 di lingkungan udara (Rakowski et al, 2005)

Data uji jangka panjang, bersama dengan yang diperoleh dari tes jangka pendek, dievaluasi untuk menentukan konstanta laju parabola untuk pertumbuhan skala oksida yang terdapat pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Konstanta laju parabolic untuk oksidasi lembaran paduan 625 pada lingkungan udara (Rakowski et al, 2005)

Temperature (K)	k_p (g ² /cm ⁴ s)
908	3.1×10^{-13}
923	2.2×10^{-13}
977	8.1×10^{-12}
998	6.5×10^{-12}
1033	3.8×10^{-11}
1088	1.4×10^{-10}

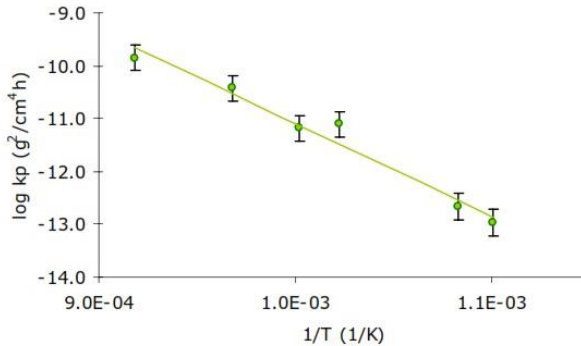
Konstanta laju parabolik mengikuti persamaan Arrhenius. Gambar 4.2 menunjukkan energi aktivasi adalah konstan di seluruh rentang temperatur dan waktu. Di dapat energi aktivasi pada pengujian pada lingkungan *dry air* sebesar 252 kJ/mol.

Dari data pada gambar 4.2 dapat menghasilkan persamaan konstanta laju parabolic terhadap fungsi temperatur (Persamaan 4.1) yang berlaku pada rentang temperatur 908-1088 K.

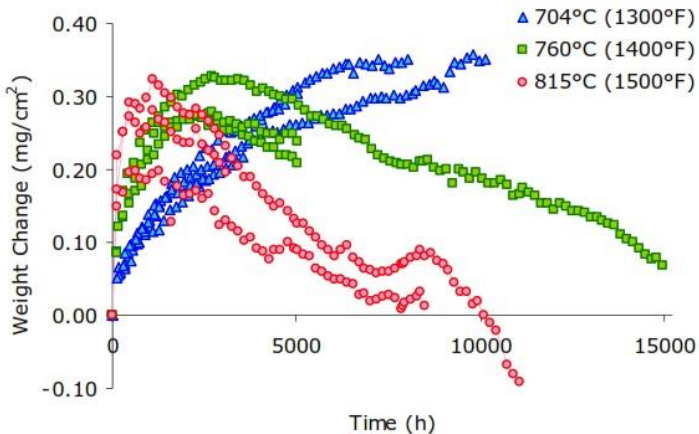
$$\log k_p = -17479 \left(\frac{1}{T} \right) + 6.4 \quad (4.1)$$

Sedangkan pada oksidasi pada lingkungan dengan penambahan uap air, grafik perubahan massa dapat dilihat pada gambar 4.3. Terlihat pada grafik, perubahan berat yang terjadi pada sampel ini terbagi menjadi dua tahap. Pertama terjadi penambahan berat pada temperatur yang lebih rendah serta waktu yang singkat. Kedua, terjadi penurunan berat pada temperatur yang lebih tinggi serta waktu yang lebih lama. Penambahan berat pada kurva dikendalikan oleh kinetika pertumbuhan secara difusi sedangkan

penurunan berat pada kurva didominasi oleh kinetika penguapan linear.



Gambar 4. 2 Grafik plot Arrhenius konstanta laju parabola pada lembaran paduan 625 di lingkungan udara (Rakowski et al, 2005)



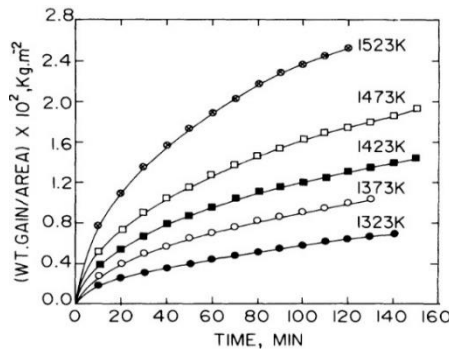
Gambar 4. 3 Perubahan massa karena oksidasi terhadap fungsi waktu pada lembaran paduan 625 pada lingkungan yang mengandung 10% uap air (Rakowski et al, 2005)

Kemiringan kurva pada grafik di atas dapat diukur dan digunakan untuk menghitung konstanta laju parabola untuk penambahan berat dan konstanta laju linier untuk penurunan berat (Tabel 4.2). Energi aktivasi yang didapat pada pengujian di lingkungan *wet air* sebesar 241 kJ/mol

Tabel 4. 2 Konstanta laju oksidasi dari lembaran paduan 625 di udara dengan dan tanpa penambahan uap air (Rakowski et al, 2005)

Temperatur (K)	<i>Dry air</i>		<i>Wet air (10%/vol H₂O)</i>	
	k_p (g ² /cm ⁴ s)	k_p (g ² /cm ⁴ s)	k_p (g ² /cm ⁴ s)	k_l (g/cm ² s)
977	8.1×10^{-12}	1.2×10^{-11}	-	-
1033	3.8×10^{-11}	2×10^{-11}	1.9×10^{-8}	1.9×10^{-8}
1088	1.4×10^{-10}	1.6×10^{-10}	6.3×10^{-8}	6.3×10^{-8}

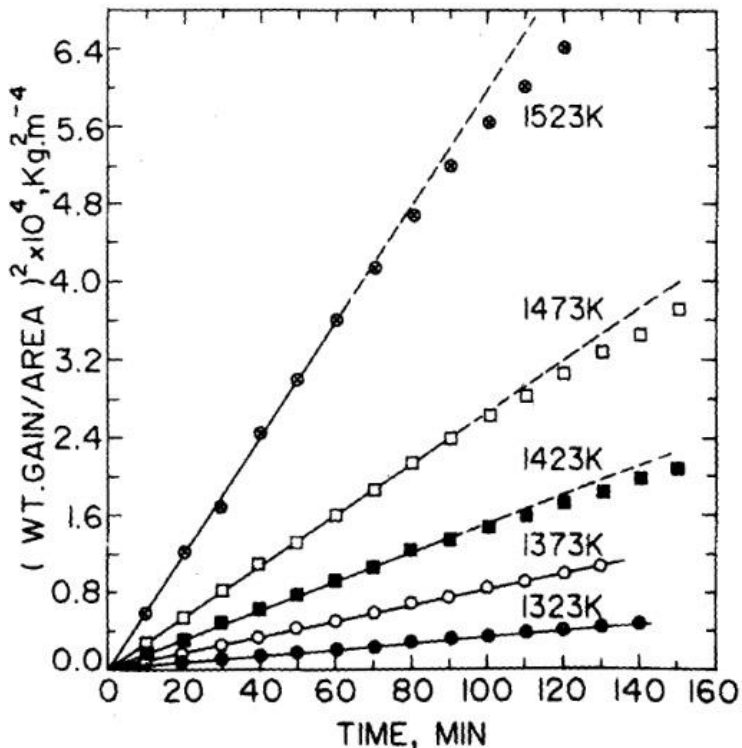
Kumar, et al melakukan penelitian tentang perilaku oksidasi dari inconel 625 pada tahap awal (<150 menit) dari oksidasi pada tekanan oksigen (P_{O_2}) sebesar 0.12 kPa pada rentang temperatur 1323 K sampai 1523 K dengan menggunakan *thermogravimetric analysis* (TGA). Hasil dari TGA dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Pertambahan berat per area vs waktu dari inconel 625 yang dioksidasi pada temperatur 1323 samapi 1523 K selama 150 menit ($P_{O_2} = 0.12$ kPa) (Kumar et al, 1994)

Kuadrat dari penambahan berat per unit area dari sampel, $(W/A)^2$, pada berbagai temperatur dan P_{O_2} pada 0.12 kPa, dipetakan terhadap fungsi waktu (t) pada gambar 4.5.

Dapat dilihat bahwa penyimpangan dari perilaku parabola terjadi setelah 90 menit oksidasi pada 1423 K dan temperatur yang lebih tinggi. Nilai konstanta laju parabola, k_p , yang sesuai dengan oksidasi selama 90 menit dalam rentang temperatur 1323 K hingga 1473 K ditunjukkan pada tabel 4.3.



Gambar 4. 5 Kuadrat penambahan berat vs waktu dari Inconel 625 yang dioksidasi pada temperatur 1323 K hingga 1523 K selama 150 menit ($P_{O_2} = 0.12$ kPa) (Kumar et al, 1994)

Tabel 4. 3 Konstanta laju parabolik, k_p , untuk oksidasi inconel 625 pada $P_{O_2} = 0.12$ kPa (Kumar et al, 1994)

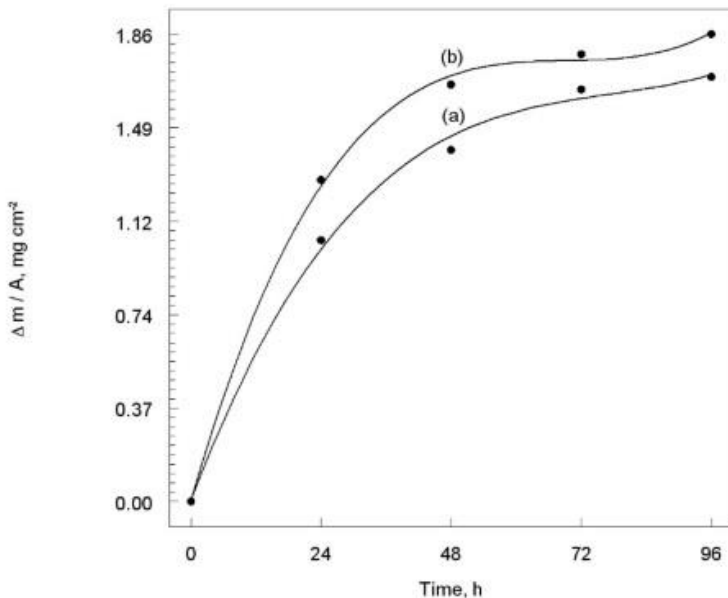
Temperature (K)	K_p ($kg^2m^{-4}sec^{-1}$)
1323	5.58×10^{-9}
1373	1.38×10^{-8}
1423	2.50×10^{-8}
1473	4.43×10^{-8}

Gambar 4.6 menunjukkan *plotting* dari $\log k_p$ terhadap $1/T$. dari garis linear yang diamati pada $\log k_p$ pada $1/T$, persamaan Arrhenius diperoleh sebagai berikut :

$$K_p = (8.3 \pm 2.7) \exp \left[\frac{-232 \pm 11 \text{ kJ mol}^{-1}}{RT} \right] \text{ kg}^2\text{m}^{-4}\text{s}^{-1} \quad (4.2)$$

Hal ini berarti energi aktivasi sebesar 232 ± 11 kJ.mol⁻¹ terjadi pada oksidasi inconel 625 dari temperatur 1323 K sampai 1523 K pada P_{O_2} sebesar 0.12 kPa selama 90 menit.

Staszewska dan Scendo melakukan penelitian yang bertujuan menyelidiki kinetika dan mekanisme dari oksidasi inconel 617 dan inconel 625. Pada penelitian kinetika oksidasi, sampel dimasukkan ke dalam *thermogravimetric measurements* pada lingkungan atmosfer. Sebelumnya sampe dipotong hingga memiliki dimensi 6 x 6 x 6 mm. Sampel dipanaskan dari temperatur 373 K sampai 1473 K selama 96 jam. Kurva kinetika oksidasi dari inconel 617 dan inconel 625 pada pengujian ini dapat dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Kurva kinetika oksidasi dari Inconel : (a) 617 dan (b) 625 pada oksidasi di temperatur 373 K sampai 1473 K selama 96 jam (Staszewska & Scendo, 2016)

Laju oksidasi dari inconel 617 dan 625 dapat menjadi perbandingan dengan melihat konstanta laju oksidasinya, yang bisa didapat dari analisis penambahan berat selama oksidasi yang ditunjukkan pada tabel 4.4.

Konstanta laju parabola pada rentang temperatur dari 1273 K hingga 1473 K dari inconel 617 dan 625, secara berurutan, dapat ditulis sebagai:

$$k_p = 1.93 \times 10^{-9} \cdot T + 5.94 \times 10^{-6} \quad (4.3)$$

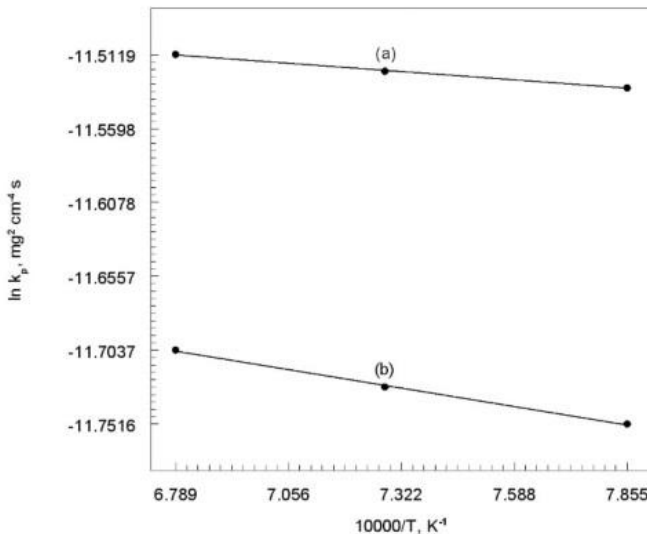
dan:

$$k_p = 1.07 \times 10^{-9} \cdot T + 8.73 \times 10^{-6} \quad (4.4)$$

Tabel 4. 4 Konstanta laju parabola pada sampel yang telah dioksidasi (Staszewska & Scendo, 2016)

Inconel	Temperature (K)	k_p ($\text{mg}^2/\text{cm}^4\text{s}$)
617	1273	7.88×10^{-6}
	1373	8.07×10^{-6}
	1473	8.26×10^{-6}
625	1273	9.79×10^{-6}
	1373	9.90×10^{-6}
	1473	1.00×10^{-5}

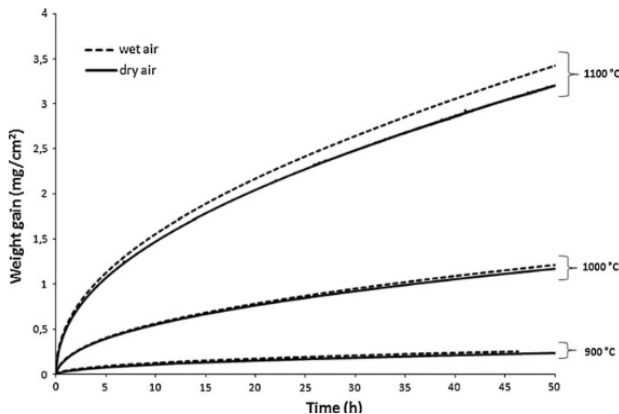
Arrhenius plot ($\ln k_p$ terhadap $1/T$) dapat digunakan untuk mencari energi aktivasi. Arrhenius plot pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4.7. Energi aktivasi pada oksidasi inconel 617 sebesar 374 kJ/mol dan untuk oksidasi inconel 625



Gambar 4. 7 Arrhenius plot untuk oksidasi dari inconel (a) 617 dan (b) 625 (Staszewska & Scendo, 2016)

sebesar 168 kJ/mol, keduanya memiliki laju oksidasi parabola pada mekanisme oksidasinya.

Pada tahun 2011, Buscail et al. melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui mekanisme oksidasi pada lingkungan basah. Penelitian ini menggunakan spesimen Inconel 625 berdimensi 1.6 mm untuk tebal serta luas permukaan sekitar 5 cm². Oksidasi temperatur tinggi dilakukan menggunakan TGA pada temperatur 900, 1000, dan 1100°C selama 48 jam. Terdapat 2 jenis lingkungan pada penelitian ini, yaitu lingkungan kering (0.3 vol.% H₂O) dan lingkungan dengan udara yang basah (7.5 vol.% H₂O). Gambar 4.8 menunjukkan grafik perubahan berat terhadap waktu dari penelitian ini.



Gambar 4. 8 Kurva kinetika oksidasi inconel 625 pada temperatur 900, 1000, dan 1100°C di lingkungan kering dan udara basah (Buscail et al, 2011)

Pada penelitian ini didapatkan kurva kinetika oksidasi yang parabolic. Laju oksidasi pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 4.5. Energi yang didapat pada penelitian ini sebesar 316 ± 10 kJ/mol untuk oksidasi pada lingkungan kering serta 308 ± 10 kJ/mol untuk oksidasi pada lingkungan dengan udara basah.

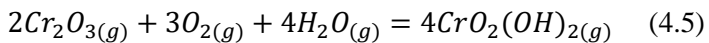
Tabel 4. 5 Nilai k_p pada oksidasi Inconel 625 temperatur 900, 1000, dan 1100°C di lingkungan kering dan udara basah (Buscail et al, 2011)

Temperatur (K)	<i>Dry air</i>	<i>Wet air</i>
	k_p (g ² /cm ⁴ s)	k_p (g ² /cm ⁴ s)
1173	3.2×10^{-13}	3.8×10^{-13}
1273	7.4×10^{-12}	7.96×10^{-12}
1373	5.25×10^{-11}	6.23×10^{-11}

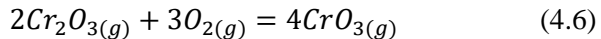
Pada penelitian-penelitian yang telah dilakukan menunjukkan paduan berbasis nikel, Inconel 625, memiliki perilaku laju oksidasi parabolik khususnya pada lingkungan udara. Perilaku oksidasi temperatur tinggi pada Inconel 625 terbagi menjadi 2 bagian: (i) tahapan pertama ditandai dengan oksidasi linear, umumnya terjadi pada oksidasi pada waktu yang singkat; (ii) tahap terakhir ditandai saat terjadinya transisi dari oksidasi linear menjadi parabola. Perilaku laju oksidasi ini menunjukkan bahwa material Inconel 625 memiliki ketahanan oksidasi jangka waktu lama yang baik. Pavithra, et al pada tahun 2012 mengungkapkan pada tahap pertama oksidasi, lapisan oksida mencapai ketebalan tertentu setelah proses oksidasi akibat adanya difusi *solid state* dari elemen yang teroksidasi menjadi lapisan kerak. Kerak oksida yang terbentuk sangat tipis dan diskontinu pada beberapa tempat sehingga atom oksigen berdifusi dengan mudah melalui celah dan reaksi oksidasi berlangsung dengan cepat. Namun, pada tahap kedua, laju oksidasi menunjukkan sedikit penurunan dan perilaku laju oksidasi berubah menjadi parabolik. Kelekatan dari kerak oksida mencegah difusi dari lingkungan secara efektif dan paduan inconel 625 menunjukkan ketahanan oksidasi temperatur tinggi yang baik.

Namun, pada penelitian yang dilakukan oleh Rakowski et al pada tahun 2005 ditemukan adanya kehilangan berat yang terjadi saat oksidasi temperatur tinggi pada kondisi udara dengan penambahan *water vapor* (10 %wt). Awalnya oksidasi terjadi secara cepat dengan adanya penambahan berat saat oksidasi

temperatur rendah dengan jangka waktu yang singkat, tetapi pada temperatur yang lebih tinggi dengan jangka waktu yang lama terjadi pengurangan berat. Hal ini disebabkan karena adanya penguapan dari kerak oksida pada temperatur yang lebih tinggi yang dibuktikan dengan tidak adanya *spallation* oksida selama pengamatan visual. Pengaruh *water vapor* pada oksidasi temperatur tinggi selain *breakaway* oksidasi adalah penguapan kerak oksida. Penelitian yang dilakukan oleh Ebbinghaus (1993), Asteman, et al (2002) menunjukkan *water vapor* meningkatkan *flux* penguapan dari elemen yang mengandung kromium pada temperatur rendah. Hal ini karena adanya pembentukan oksihidroksida dari kromium seperti pada persamaan 4.5.



Pada temperatur yang lebih tinggi (di atas 1000°C), penguapan oksida kromium dapat terjadi tanpa adanya uap air pada oksida kromium dengan konsentrasi yang lebih tinggi (Meier dan Birks, 1983). Penguapan oksida kromium dapat dilihat pada persamaan 4.6.



Kurva perubahan berat (gambar 4.1, 4.4, dan 4.8) yang didapat pada penelitian-penelitian di atas, menunjukkan temperatur mempengaruhi laju oksidasi dari Inconel 625. Laju oksidasi pada oksidasi temperatur tinggi dari material Inconel 625 meningkat seiring meningkatnya temperatur oksidasi. Hal ini berhubungan dengan konstanta laju oksidasi (k_p), dimana semakin tinggi temperatur oksidasi berbanding lurus dengan konstanta laju oksidasi. Tabel 4.1, 4.3, 4.4, 4.5 membuktikan semakin tinggi temperatur, meningkatkan konstanta laju oksidasi. Selain temperatur, terdapat faktor-faktor lain yang mengakibatkan meningkatnya laju oksidasi. Jangka waktu oksidasi juga mempengaruhi laju oksidasi dari Inconel 625. Semakin lama jangka waktu oksidasi yang terjadi, semakin tinggi juga laju

oksidasinya. Tetapi, di saat lapisan oksida sudah mencapai ketebalan tertentu (sampai jenuh), laju oksidasi mengalami penurunan. Hal ini terjadi karena lapisan oksida yang terbentuk memiliki karakter yang bersifat melindungi. Selain jangka waktu oksidasi, lingkungan oksidasi juga dapat mempengaruhi laju oksidasi pada Inconel 625 di temperatur tinggi. Penelitian yang dilakukan oleh Rakowski, et al pada tahun 2005 dan Buscail, et al pada tahun 2011 menunjukkan adanya perbedaan konstanta laju oksidasi pada oksidasi di lingkungan udara dan lingkungan udara yang mengandung *water vapor*. Adanya *water vapor* pada saat oksidasi temperatur tinggi dapat meningkatkan laju oksidasi pada Inconel 625. Konstanta laju oksidasi (k_p) pada oksidasi di lingkungan dengan penambahan *water vapor* lebih tinggi dibandingkan oksidasi di lingkungan udara. Tabel 4.2 dan tabel 4.5 menunjukkan peningkatan nilai konstanta laju oksidasi (k_p) pada lingkungan dengan penambahan uap air dibandingkan lingkungan udara.

Energi aktivasi (E_a) dapat didefinisikan sebagai energi minimum yang dibutuhkan untuk memulai reaksi kimia. Energi aktivasi didapatkan dari perhitungan persamaan Arrhenius (persamaan 2.18). Tetapi, energi aktivasi didapatkan dari kemiringan garis lurus pada sistem koordinat $\ln k_p$ vs $1/T$. Energi aktivasi yang didapatkan pada penelitian-penelitian di atas memiliki nilai yang berbeda-beda. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan komposisi unsur paduan pada materialnya. Pada penelitian yang dilakukan oleh Rakowski, et al didapat energi aktivasi pada oksidasi di dua lingkungan oksidasi (*dry air* dan *wet air*) sebesar 252 kJ/mol dan 241 kJ/mol. Penelitian yang dilakukan Kumar, et al pada oksidasi temperatur 1323-1473 K dan tekanan 0.12 kPa dari Inconel 625 didapat energi aktivasi sebesar 232 ± 11 kJ.mol⁻¹. Pada penelitian yang dilakukan Staszewska dan Scendo pada tahun 2016 energi aktivasi yang didapatkan sebesar 374 kJ/mol pada inconel 617 dan 168 kJ/mol pada inconel 625. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan Buscail et al pada tahun 2011 terdapat perbedaan energi aktivasi pada oksidasi temperatur

tinggi dari inconel 625 di lingkungan udara dan lingkungan udara dengan penambahan *water vapor*. Energi aktivasi pada lingkungan udara bernilai 316 ± 10 kJ/mol, lebih tinggi dibandingkan dengan lingkungan udara mengandung *water vapor* yang bernilai $308 \pm$ kJ/mol. Hal ini disebabkan karena *water vapor* dapat meningkatkan laju oksidasi (Kofstad, 1998). Nilai energi aktivasi (E_a) lebih dipengaruhi oleh nilai konstanta oksidasi (k) dibandingkan temperatur (T). Dapat dilihat pada tabel 4.6, hubungan antara nilai konstanta laju oksidasi (k_p) dengan energi aktivasi (E_a) adalah berbanding terbalik. Semakin tinggi nilai konstanta laju oksidasi maka semakin rendah energi aktivasi yang didapat.

Tabel 4. 6 Rangkuman Kinetika Oksidasi dari Inconel 625

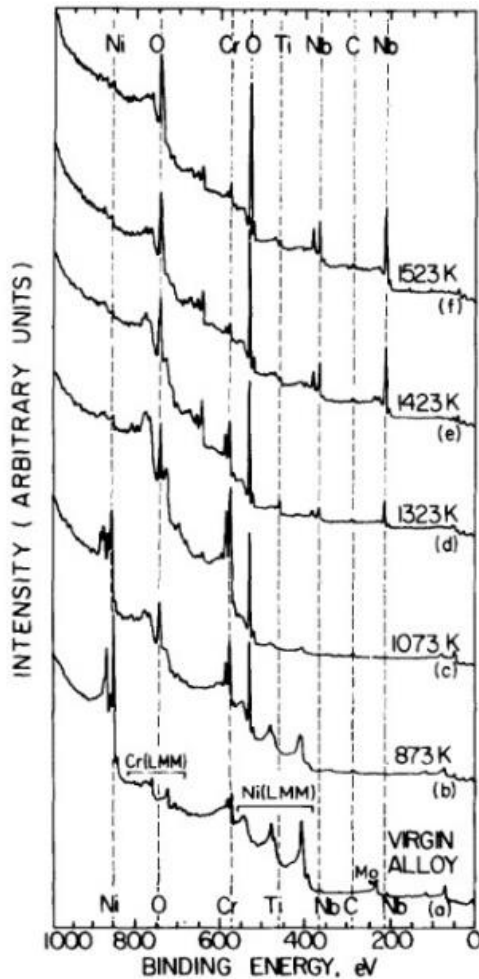
Jurnal	T (K)	Lingkungan	k_p (g^2/cm^4s)	Energi Aktivasi (kJ/mol)
Staszewsk a dan	1273	<i>Dry air</i>	9.79×10^{-6}	168
	1373		9.9×10^{-6}	
Scendo	1473	<i>Dry air</i>	1×10^{-5}	232 \pm 11
	1323		5.58×10^{-9}	
Kumar et al	1373	<i>Dry air</i>	1.38×10^{-8}	232 \pm 11
	1423		2.5×10^{-8}	
	1473		4.43×10^{-8}	
Rakowski et al	977	<i>Wet air</i>	1.2×10^{-11}	241
	1033		2×10^{-11}	
	1088	<i>Dry air</i>	1.6×10^{-10}	
	977		8.1×10^{-12}	
	1033		3.8×10^{-11}	
Buscail, et al	1088	<i>Wet air</i>	1.4×10^{-10}	308 \pm 10
	1173		3.8×10^{-13}	
	1273	<i>Dry air</i>	7.96×10^{-12}	
	1373		6.23×10^{-11}	
	1173		3.2×10^{-13}	
	1273	7.4×10^{-12}	316 \pm 10	
	1373	5.25×10^{-11}		

4.2 Lapisan Oksida

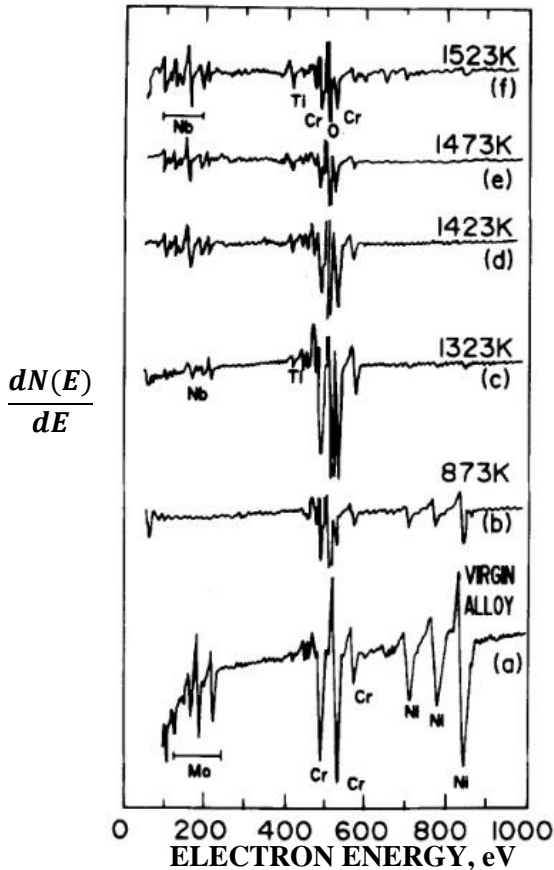
Penelitian yang dilakukan oleh Rakowski et al, menunjukkan bahwa pada oksidasi inconel 625 dengan rentang temperatur 977 K sampai 1088 K pada kedua lingkungan membentuk lapisan oksida kromium oksida (sebanyak 99% Cr_2O_3) dengan menggunakan pengujian SEM.

Pada penelitian oleh Kumar et al lapisan oksida dianalisis menggunakan XPS, AES dan EDS. Spektrum XPS, AES dan EDS didapat dari paduan *virgin* dan paduan yang dioksidasi pada temperatur berbeda ditunjukkan pada gambar 4.9-4.11

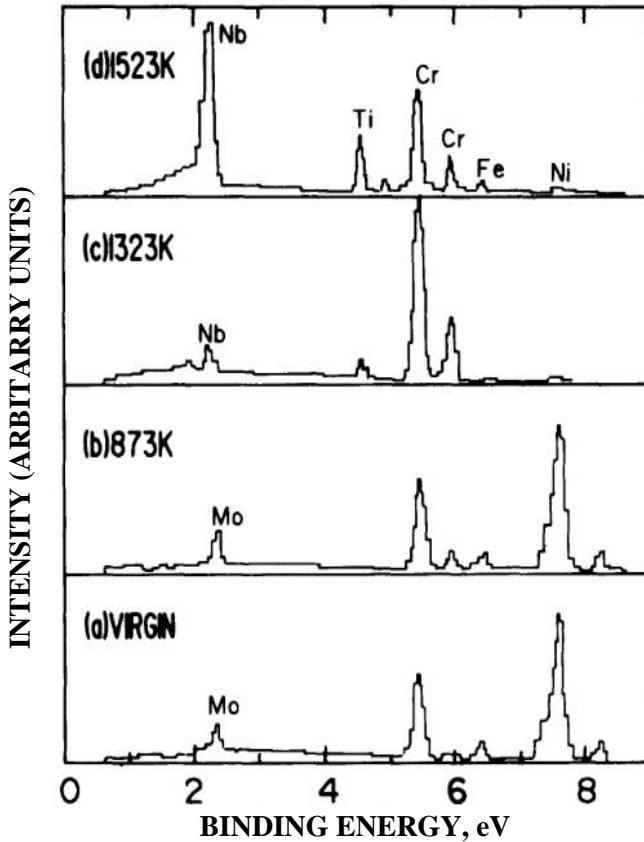
Spektrum XPS dari semua sampel dan spektrum AES dari paduan *virgin* dan sampel yang dioksidasi pada 873 K, diambil setelah *sputtering* pada permukaan selama 2 menit untuk menghilangkan hidrokarbon yang terserap di permukaan. Spektrum AES dari sampel yang dioksidasi pada 1323 K dan temperatur yang lebih tinggi diambil setelah 40 menit *sputtering* karena adanya *charging* yang besar yang telah diamati pada permukaan yang telah dioksidasi yang dapat mengubah posisi puncak Auger. Pada temperatur 873 K, lapisan oksida yang terbentuk berupa Cr_2O_3 dan Ni_2O_3 . Hal ini dapat dilihat dari energi ikatan Cr $2p_{3/2}$ dan Ni $2p_{3/2}$ sebesar 2.5 eV dan 3.3 eV pada spektrum XPS (gambar 4.12). Kehadiran Ni_2O_3 juga dikonfirmasi dari nilai rasio *oxygen-to-metal* (O/M) yang didapat dari XPS dan AES, sebesar 1.65 dan 1.37 (tabel 4.7). XPS beresolusi tinggi dari Ti $2p$ (oksidasi 1373 K selama 140 menit) dan Nb $3d$ (oksidasi 1523 K selama 120 menit) yang mengindikasikan adanya TiO_2 dan Nb_2O_5 pada lapisan oksida yang terdapat pada *interface* gas-oksida. Hal ini dapat dibuktikan juga melalui nilai rasio O/M dari data XPS. Rasio O/M yang didapat pada AES pada oksidasi temperatur 1323 K dan 1523 K (1.3 dan 1.5) lebih rendah dibandingkan nilai O/M XPS (2.1 dan 2.4). Analisis AES merepresentasikan komposisi lapisan oksida sekitar 0.4 micron di bawah *interface* gas-oksida. NbO dan Ti_2O_3 merupakan fasa terbentuk pada lapisan ini.



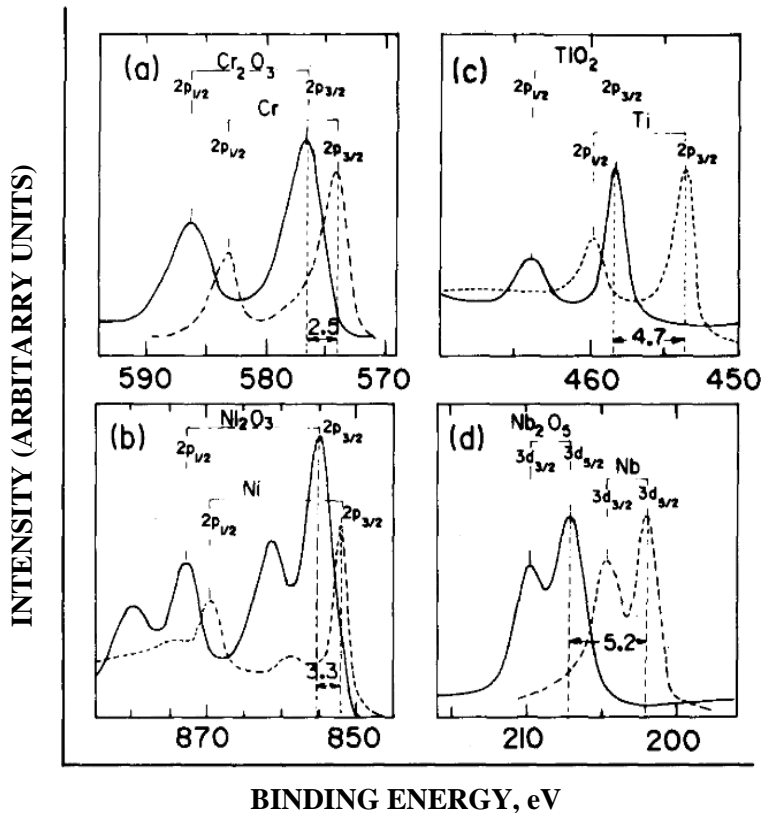
Gambar 4. 9 Spektrum XPS pada (a) paduan *virgin*, dan sampel yang telah dioksidasi pada (b) 873 K selama 15 menit, (c) 1073 K selama 150 menit, (d) 1323 K selama 140 menit, (e) 1423 K selama 150 menit, dan (f) 1523 K selama 120 menit (Kumar et al, 1994)



Gambar 4. 10 Spektrum AES pada (a) paduan *virgin*, dan sampel yang telah dioksidasi pada (b) 873 K selama 15 menit, (c) 1073 K selama 150 menit, (d) 1323 K selama 140 menit, (e) 1423 K selama 150 menit, dan (f) 1523 K selama 120 menit (Kumar et al, 1994)



Gambar 4. 11 EDS pada Inconel 625 : (a) paduan *virgin*; dan yang telah dioksidasi pada (b) 873 K selama 15 menit, (c) 1323 K selaman 140 menit dan (d) 1523 K selama 120 menit (Kumar et al, 1994)



Gambar 4. 12 Spektrum XPS beresolusi tinggi (a) Cr 2p (873 K selama 15 menit), (b) Ni 2p (873 K selama 15 menit), (c) Ti 2p (1323 K selama 140 menit), (d) Nb 3d (1523 K selama 140 menit) (Kumar et al, 1994)

Tabel 4. 7 Komposisi Lapisan Oksida yang dianalisis menggunakan XPS, AES dan EDS dan Rasio O/M dari Lapisan Oksida (Kumar et al, 1994)

Oxidation		Composition (at.%) ^b							O/M Ratio	
Temp. (K)	Time (min)	Techn.	Ni	Cr	Nb	Ti	Mo	Fe	Meas.	Cal.
Virgin alloy		XPS	59.5	24.5	2.4	* ^a	9.4	4.2	—	—
		AES	63.3	21.8	£ ^c	0.5	10.8 ^d	3.6	—	—
		EDS	61.9	26.3	£	*	8.0 ^d	3.8	—	—
873	15	XPS	42.2	56.9	*	*	0.9	*	1.65	1.50 ^e
		AES	41.7	58.3	*	*	*	*	1.37	1.50 ^e
		EDS	59.6	27.2	£	*	9.3 ^d	3.9	—	—
1073	150	XPS	5.6	94.4	*	*	*	*	1.64	1.47 ^f
1323	140	XPS	3.7	51.7	27.9	16.7	*	*	2.15	1.84 ^f
		AES ^h	*	88.2	5.9	5.9	*	*	1.46	1.47 ^g
		EDS	2.1	85.3	8.5	4.1	*	*	—	—
1423	150	XPS	4.9	16.0	69.4	9.7	*	*	2.35	2.22 ^f
		AES ^h	2.8	57.2	31.9	8.1	*	*	1.27	1.33 ^g
1473	150	AES ^h	*	46.4	44.5	9.1	*	*	1.34	1.28 ^g
1523	120	XPS	4.3	17.8	69.5	8.4	*	*	2.21	2.22 ^f
		AES ^h	4.9	41.9	45.8	7.4	*	*	1.25	1.25 ^g
		EDS	0.7	27.7	53.5	14.8	*	3.3	—	—

^atidak bisa dideteksi

^bkandungan oksigen dalam at% = 100 (O/M) / (O/M + 1)

^cPeak Nb overlap peak Mo

^dKandungan Mo + Nb

^eNi dan Cr diambil dari Ni₂O₃ dan Cr₂O₃, untuk perhitungan rasio O/M

^fNi, Cr, Nb, dan Ti diambil dari NiO, Cr₂O₃, Nb₂O₅, dan TiO₂, untuk perhitungan rasio O/M

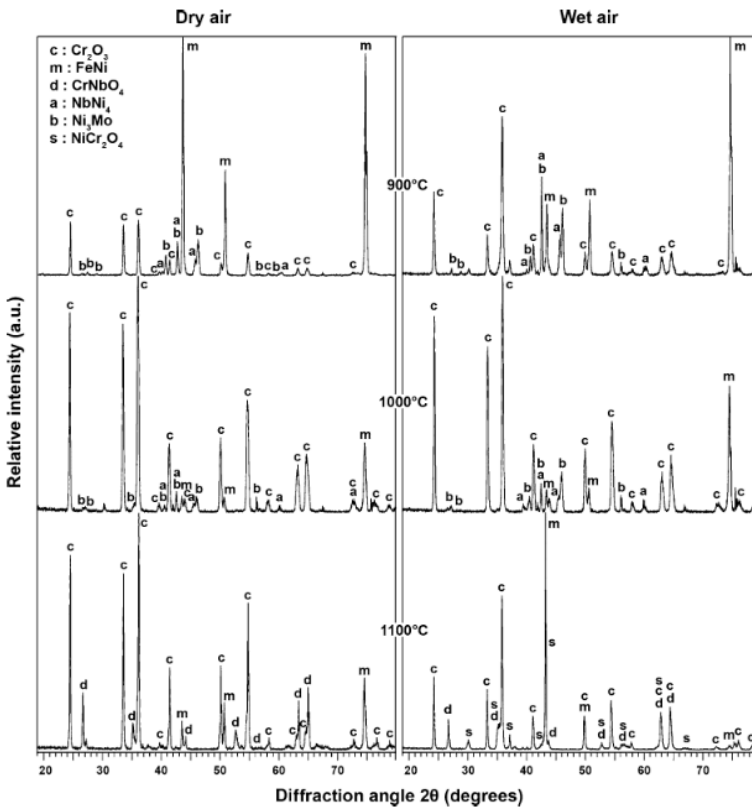
^gNi, Cr, Nb, dan Ti diambil dari NiO, Cr₂O₃, NbO, dan Ti₂O₃, untuk perhitungan rasio O/M

^hAES diambil setelah *sputtering* ion Argon (2 keV) selama 40 menit

Penelitian yang dilakukan Staszewska dan Scendo menunjukkan lapisan oksida yang terbentuk setelah dilakukan oksidasi temperatur tinggi pada temperatur 373 sampai 1473 K yaitu pada lapisan luar oksida mengandung Nb₂O₅ (pada Inconel 625) serta Cr₂O₃ sedangkan pada lapisan dalam oksida mengandung NiCr₂O₄ spinel, MoO₂, CoO (pada Inconel 617) atau oksida NiO.

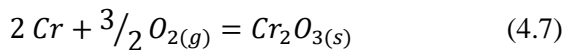
Pada penelitian yang dilakukan oleh Buscail, et al. lapisan oksida yang terbentuk pada oksidasi lingkungan kering dan

lingkungan dengan udara basah tidak memiliki perbedaan pada komposisi fasanya. Lapisan oksida yang terbentuk pada oksidasi temperatur 1173 dan 1273 K pada kedua lingkungan mengandung Cr_2O_3 . Sedangkan pada oksidasi temperatur 1373 K, lapisan oksida yang terbentuk pada kedua lingkungan mengandung Cr_2O_3 dan CrNbO_4 . Hal ini bisa dilihat dari hasil pengujian XRD yang dilakukan pada penelitian ini (gambar 4.13).



Gambar 4. 13 Hasil pengujian XRD pada oksidasi temperatur 1173, 1273 dan 1373 K pada lingkungan kering dan udara basah (Buscail et al, 2011)

Lapisan oksida yang terbentuk pada penelitian-penelitian di atas dapat dibagi menjadi 2 bagian tergantung pada temperaturnya (di bawah 1323 K dan di atas 1323 K). Penelitian yang dilakukan Rakowski et al. pada oksidasi pada temperatur 977 K – 1088 K pada lingkungan udara dan udara yang mengandung *water vapor* membentuk lapisan oksida berfasa kromium oksida (sebanyak 99% Cr₂O₃) menggunakan pengujian SEM. Sedangkan pada penelitian Kumar et al. pada oksidasi temperatur 873 K selama 15 menit, membentuk lapisan oksida berfasa Ni₂O₃ dan Cr₂O₃. Kandungan Cr₂O₃ meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur oksidasi hingga 1300 K. Saat oksidasi mendekati temperatur 1300K, Cr₂O₃ menjadi unsur utama pada lapisan oksida. Pada penelitian Staszewska dan Scendo ditemukan senyawa Cr₂O₃ pada lapisan oksidasi luar (eksternal) dan NiO pada lapisan oksidasi dalam (internal) saat oksidasi temperatur tinggi pada temperatur 373 – 1273 K. Penelitian yang dilakukan Buscail et al, oksidasi Inconel 625 pada temperatur 1173 dan 1273K di lingkungan udara dan udara *water vapor* membentuk lapisan oksida yang mengandung Cr₂O₃, NbNi₄ dan Ni₃Mo. Pada temperatur di bawah 1323 K, lapisan oksida umumnya mengandung Cr₂O₃. Lapisan oksida kromium yang terbentuk seperti pada persamaan 4.7



Oksidasi pada temperatur di atas 1373 K, menunjukkan adanya aktivasi unsur Ti dan Nb pada lapisan oksida. Hal ini terdapat pada penelitian yang dilakukan Kumar et al. saat oksidasi pada temperatur 1323 K dan 1523 K membentuk lapisan oksida yang mengandung TiO₂ dan Nb₂O₅ pada *interface* gas-oksida yang dianalisis menggunakan XPS. Sedangkan analisis menggunakan AES menunjukkan lapisan oksida sekitar 0.4 micron di bawah *interface* gas-oksida menunjukkan fasa Ti₂O₃ dan NbO. Adanya perbedaan fasa dari analisis XPS dan AES bisa terjadi karena (i) potensial oksigen yang lebih rendah dan (ii) reduksi oksida karena *sputtering* ion argon. Penelitian yang dilakukan oleh Staszewska

dan Scendo pada oksidasi temperatur di atas 1273 K, lapisan oksida eksternal mengandung Nb_2O_5 dan lapisan oksida internal mengandung spinel NiCr_2O_4 dan MoO_2 yang merupakan produk oksidasi tahap kedua. Pada penelitian yang dilakukan oleh Buscail et al. saat oksidasi inconel 625 temperatur 1473 K membentuk lapisan oksida yang terbentuk Cr_2O_3 dan CrNbO_4 . Oksida-oksida dari unsur Nb dan Ti baru muncul saat temperatur di atas 1323 K karena secara termodinamika relatif lebih stabil daripada oksida Cr dan Ni.

Pembentukan lapisan oksida berupa kromia pada oksidasi temperatur 873 – 1373 K (636 – 1100°C) dapat diprediksi menggunakan Diagram Ellingham. Jika ditarik garis pada sumbu x di temperature 873 – 1373 K (636 – 1100°C) ke atas, maka lapisan oksida yang pertama terbentuk adalah kromia. Hal ini karena krom merupakan unsur paling reaktif terhadap oksigen yang terdapat pada Inconel 625.

Tabel 4. 8 Senyawa pada Lapisan Oksida dari Inconel 625 setelah Oksidasi Temperatur Tinggi

Jurnal	Temperatur (K)	Senyawa pada Lapisan Oksida
Rakowski, et al	977 – 1088 873 – 1300	Cr_2O_3 Cr_2O_3 , Ni_2O_3 TiO_2 dan Nb_2O_5 (<i>interface</i> gas-oksida)
Kumar, et al	> 1300	Ti_2O_3 dan NbO (0.4 μm di bawah <i>interface</i> gas-oksida)
Staszewska dan Scendo	373 – 1473	Cr_2O_3 dan Nb_2O_5 (lapisan eksternal) NiCr_2O_4 , MoO_2 , NiO (lapisan internal)
Buscail, et al	1173 dan 1273 1373	Cr_2O_3 Cr_2O_3 dan CrNbO_4

4.3 Kritisasi Jurnal

Paper review ini menggunakan sebanyak 4 jurnal dengan variasi temperatur dan waktu oksidasi. Dari keempat jurnal tersebut berisi informasi mengenai hasil pengujian oksidasi temperatur tinggi dari material inconel 625 yang berupa kinetika oksidasi dan lapisan oksida yang terbentuk. Tetapi dalam beberapa jurnal yang digunakan, data yang diberikan tidak diberikan secara rinci oleh peneliti. Maka dari itu, dibutuhkan data tambahan dari jurnal lainnya, sehingga kelebihan dan kekurangan dari masing-masing data pengujian dapat saling melengkapi. Selain itu, jurnal pendukung juga digunakan untuk menjelaskan hasil pengujian yang tidak dijelaskan secara rinci pada jurnal tersebut. Beberapa jurnal yang di-*review* hanya menulis hasil penelitian tanpa menampilkan data terkait pengujian yang dilakukan seperti hasil pengujian SEM dan XRD.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil pada *review* jurnal ini adalah sebagai berikut:

1. Oksidasi inconel 625 pada temperatur tinggi memiliki perilaku laju oksidasi parabolik, umumnya pada oksidasi lingkungan udara. Pada lingkungan udara yang mengandung *water vapour*, terjadi pengurangan berat secara linear pada oksidasi temperatur tinggi pada jangka waktu yang lama. Laju oksidasi meningkat dengan meningkatnya temperatur. Korelasi antara nilai konstanta laju oksidasi (k_p) dengan energi aktivasi (E_a) adalah berbanding terbalik.
2. Lapisan oksida yang terbentuk pada oksidasi Inconel 625 pada temperatur tinggi dapat dibagi terhadap temperatur menjadi 2 bagian (di bawah 1323 K dan di atas 1323 K). Pada oksidasi temperatur di bawah 1323 K mengandung fasa Cr_2O_3 sebagai fasa utama. Fasa-fasa lain yang terbentuk pada rentang temperatur tersebut adalah Ni_2O_3 dan NiO . Sedangkan pada oksidasi temperatur di atas 1373 K membentuk lapisan oksida yang mengandung TiO_2 , Ti_2O_3 , Nb_2O_5 , NbO_2 , Cr_2O_3 , $NiCr_2O_4$, MoO_2 dan $CrNbO_4$.

5.2 Saran

Paper review ini memuat kinetika oksidasi dari Inconel 625 saat oksidasi temperatur tinggi pada 2 macam lingkungan yaitu, udara kering dan udara basah (mengandung uap air). Saran yang dapat diberikan yaitu penelitian selanjutnya dapat menggunakan lingkungan oksidasi yang berbeda untuk mendapat informasi lebih lanjut terkait kinetika oksidasi inconel 625.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Zaki. 2006. "Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control." *Elsevier Science & Technology Books*.
- Asteman, H et al. 2002. "Oxid. Met." 193-216.
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction to Physical Engineering*. New York: McGraw-Hill International Book Company.
- Baboian, R. 2005. *Corrosion Tests and Standards Application and Interpretation 2nd Edition*. Baltimore: ASM International.
- Bandanadjaja, Beny. 2009. "Karakteristik Material Tahan Temperatur Tinggi dan Aplikasinya." *Material and Process Design* 1-14.
- Buscail, et al. 2011. "Effect of Water Vapour on the Oxidation of a Nickel-base 625 Alloy between 900 dan 1100 C." *J. Mater Sci* 5903-5915.
- Callister, William D, dan David G Rethwisch. 2010. *Materials Science and Engineering an Introduction*. Utah: John Wiley & Sons, Inc.
- Carter, Tim J. 2004. "Common Failure in Gas Turbine Blades." *Engineering Failure Analysis* 237-247.
- Dieter, G.E. 1986. *Mechanical Metallurgy (Third Edition)*. Philadelphia: McGaw-Hill Education.
- Ebbinghaus, B. B. 1993. "Combustion and Flame." 119-137.
- Eiselstein, H. L., dan D. J. Tillack. 1958. "The Invention and Definition of Alloy 625." *Superalloys 718, 625 and Various Derivatives* 1-14.
- Flooren, Stephen, Gerhard E. Fuchs, dan Walter J. Yang. 1994. "The Metallurgy of Alloy 625." *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives* 13-37.
- Fontana, M. 1977. *Corrosion Engineering*. New York: Mc-Graw Hill.
- Granata, Giuseppe, Rafael da Gama, dan Demetri Petrides. 2020. "Production of Lithium Ion Battery Cathode Material (NMC 811) from Primary and Secondary Raw Materials -

- Techno - Economic Assessment with SuperPro Designer.” *Simulation, Design, and Scheduling Tools for the Process Manufacturing Industries* 1-27.
- Jones, Denny A. 1996. *Principles and Prevention of Corrosion*. Reno: Simon & Schuster.
- Kofstad, P. 1998. *High Temperature Corrosion*. London: Elsevier.
- Kumar, Lalit, et al. 1996. “Studies on the Oxidation Behavior of Inconel 625 between 873 dan 1523 K.” *Oxidation of Metals* 221-244.
- Lai, G. Y., M. F. Rothman, S. Baranow, dan R. B. Herchenroeder. 1984. “Recuperator Alloy for High-Temperature Waste Heat Recovery.” *Journal of Metals* 24-29.
- Pavithra, M.K., T. V. Venkatesha, Kumar M.K Punith, dan H. C. Tondan. 2012. “Inhibition of Mild Steel Corrosion by Raberprazole Sulfide.” *Corros. Sci.* 104-111.
- Rajani, H R, Zareie, Mousavi, Akbari S. A. A, dan F Sani. 2013. “Comparison of Corrosion Behaviour between Fusion Cladded and Xplosive Cladded.” *Elsevier*.
- Rakowski, et al. 2005. “The Use and Performance of Wrought 625 Alloy in Primary Surface Recuperators for Gas Turbine Engines.” *Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives* 271-286.
- Revie, R. Winston. 2011. *Uhlig's Corrosion Handbook*. Ontario: John Wiley & Sons, Inc.
- Revie, R. Winston, dan Herbert H. Uhlig. 2008. *Corrosion and Corrosion Control : An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Roberge, Pierre R. 2000. *Handbook of Corrosion Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Schweitzer, Philip A. 2007. *Corrosion Engineering Handbook : Fundamentals of Metallic Corrosion*. New York: CRC Press.
- Seong, Byeong Geun, Soon Young Hwang, dan Kyoo Young Kim. 2000. “High-temperature Corrosion of Recuperatos used

- in Steel Mills.” *Surface and Coatings Technology* 256-265.
- Shankar, Vani, K Bhanu Sankara, dan S. L. Mannan. 2000. “Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 625 Superalloy.” *Journal of Nuclear Materials* 222-232.
- Shoemaker, Lewis E. 2005. “Alloy 625 and 725 : Trends in Properties and Applications.” *Superalloy 718, 625, 706 and Derivatives* 409-418.
- Shreir, L L, R A Jarman, dan G T Burstein. 1963. *Corrosion : Metal/Environment Reactions*. London: Butterworth-Heinemann.
- Sidiq, M. Fajar. 2013. “Analisa Korosi dan Pengendaliannya.” *Jurnal Foundry* 25-30.
- Staszewska, Katarzyna, dan Mieczyslaw Scendo. 2016. “Mechanism and Kinetics Oxidation of Inconel 617 and 625 Alloys.” *Technical Issues* 82-89.
- Supardi, R. 1997. *Korosi*. Bandung: Penerbit Tarsito.
- Tedmon, C.S, dan D A Vermilya. 1971. “Carbide Sensitization and Intergranular Corrosion of Nickel Base Alloy.” *Elsevier*.
- Trethewey, K. R., dan J. Chamberlain. 1991. *Korosi untuk Mahasiswa Sains dan Rekayasa*. Jakarta: PT.Gramedia Pustaka Utama.
- Wang, F, dan Y Shu. 2003. “Influence of Cr Content on the Corrosion of Fe-Cr Alloys : The Synergistic Effect of NaCl and Water Vapour.” *Elsevier*.
- Wang, Yan, dan al. Et. 2017. “Oxidation Behavior and Mechanism of Porous Nickel-based Alloy between 850 and 1000°C.” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 1558-1568.
- Wuchina, E., dan al. et. 2007. “UHTCs : Ultra-High Temperature Ceramic Materials for Extreme Environment Applications.” *The Electrochemical Society* 30-36.

Format penulisan daftar pustaka, lihat di file panduan ya

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin memberikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam memberikan dukungan serta motivasi sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rezeki berupa kesehatan jasmani serta rohani kepada penulis dalam pembuatan tugas akhir.
2. Kedua Orang tua penulis, Bapak Agus Hermawan dan Ibu Nurmah atas semangat dan nasehat yang sangat berguna dalam keberhasilan penulis.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA. dan Ibu Vania Mitha Pratiwi S.T., M.T. selaku dosen pembimbing saya.
4. Teman-teman Mahasiswa Angkatan 2016 (MT18) yang telah memberikan kenangan dan kehangatan selama empat tahun terakhir.
5. Yanne Indriati yang telah menemani, membantu dan mengasihi penulis selama berkuliah di DTM FTIRS-ITS.
6. Rekan-rekan kontrakan mbambet, Vito, Anyun, Arfan, Omyog, Iki, Handis, Putra, Wor, Henokh, Iqbal, Omsat, Erick, Daniel, Edwin, Arif Rahman, Nabil, Fadhel Myf, Cici, dan Mirfa yang telah meramaikan hari-hari saya di kontrakan.
7. Seluruh Dosen dan karyawan, serta Mahasiswa DTM yang tak pernah menyerah untuk DTM 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 untu 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



Muhamad Rafli Nurhadi lahir di Tanjung Balai Karimun (Kepulauan Riau) pada tanggal 19 Mei 1998. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN 1 Kota Tangerang, SMPN 1 Kota Tangerang, SMAN 1 Kota Tangerang. Penulis melanjutkan Pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember tepatnya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi. Penulis pernah aktif di beberapa kegiatan organisasi yaitu Staff Departemen Dalam Negeri HMMT 17/18, Staff Kesekretariatan PM3I 18/19, Ketua Departemen Perekonomian PM3I 19/20. Penulis memiliki pengalaman *internship* di PT.GMF AEROASIA Tbk pada bidang *Non-Destructive Inspection*. Penulis mengambil bidang studi Korosi dan Kegagalan Material untuk tugas akhir. Penulis dapat di kontak melalui surat elektronik mraflinurhadi@gmail.com.