



TUGAS AKHIR - MM091381

**PERILAKU OKSIDASI BAJA API 5L GRADE X52
DAN *WELD OVERLAY* INCONEL 625 PADA
TEMPERATUR TINGGI DI LINGKUNGAN ALIRAN
GAS OKSIGEN**

RIZKIYAN ARDI NUGROHO
NRP 2710 100 078

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



TUGAS AKHIR - MM 091381

**PERILAKU OKSIDASI BAJA API 5L GRADE X52 DAN
WELD OVERLAY INCONEL 625 PADA
TEMPERATUR TINGGI DI LINGKUNGAN ALIRAN
GAS O₂**

RIZKIYAN ARDI NUGROHO
NRP. 2710 100 078

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - MM 091381

**OXIDATION BEHAVIOUR OF API 5L GRADE
X52 AND WELD OVERLAY INCONEL 625 IN
HIGH TEMPERATURE AND OXYGEN GAS
FLOW CONDITION**

RIZKIYAN ARDI NUGROHO
NRP. 2710 100 078

Advisor
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

Department of Material and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014

Ucapan Terimakasih

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberi dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan.

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Orang tua penulis, Bapak Tjipto Utomo dan Ibu Karsi Lumantar Ningsih yang selalu mendukung, menyemangati serta mendoakan penulis dengan tulus dan penuh kasih sayang.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA selaku Dosen Pembimbing tugas akhir penulis di Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
4. Ibu Yuli Setiyorini, ST., M.Phil. selaku Koordinator Tugas Akhir Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS
5. Teman seperjuangan Tugas Akhir, Johan Wiyoko, yang selalu berbagi dalam berjuang menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Saudara M. Miftahul Aziz, I Wayan Yuda Semaradipta, Jarot D. Tatama, Akbar Rakanda, Luthfi Ardiansyah, M. Nurus Shobah, dan Galang Wisnu Wardhana yang selalu telah menemani penulis selama berada di Jakarta dan senantiasa memberikan support baik moril maupun materiil.
7. Bapak Fahmi Hidayat, Teguh Sasmito, Bambang Soekarno, Andri Arifin, Tomy Bustomy dan Ibu Adelia serta seluruh karyawan di PT Rekayasa Industri yang telah membimbing berjalannya Tugas Akhir serta memberikan pelajaran hidup dan dunia kerja yang berharga selama proses magang.
8. Bapak Arifyandi Putra dan Andry Wijaya yang telah membantu pengadaan dan support pengerjaan *overlay* untuk pengerjaan Tugas Akhir ini.

9. Bapak Didik Prasetyoko serta seluruh jajaran staff LPPM ITS yang telah memberikan ijin penggunaan Laboratorium serta membantu penyelesaian pengujian Tugas Akhir
10. Mbak Iis selaku operator pengujian XRD, SEM-EDAX, pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS yang telah banyak membantu penulis dalam kelancaran melakukan pengujian penelitian.
11. Bapak Khoirul Anam selaku Dosen dan operator mesin SEM di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang rela menyempatkan waktunya untuk melakukan pengujian di detik-detik akhir.
12. Teman-teman kontrakan Muhammad Rizki Ilhami, Fathan Nadhir, Ade Okta Y, Sinai Parsih, Frasta Eka P yang ikhlas memberikan tempat di kontrakan sebagai basecamp pengerjaan Tugas Akhir ini
13. Keluarga besar MT12 yang selalu memberikan semangat serta menjadi saudara yang luar biasa selama kuliah di jurusan ini. Banyak kenangan indah yang terukir bersama kalian.
14. Seluruh Pengurus HMMT FTI ITS periode 2012-2013 terima kasih atas kerja samanya yang baik dalam memperjuangkan nama HMMT lebih baik
15. Seluruh keluarga besar HMMT FTI ITS, sebuah keluarga yang telah banyak memberikan pengalaman, cerita dan tempat belajar bagi penulis.
16. Pihak-pihak lain yang belum penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu kelancaran tugas akhir penulis. Terima kasih banyak atas segala dukungannya. Semoga Allah SWT membalas dengan sesuatu yang terbaik. Amin.

**PERILAKU OKSIDASI BAJA API 5L GRADE X52 DAN
WELD OVERLAY INCONEL 625 PADA TEMPERATUR
TINGGI DI LINGKUNGAN ALIRAN GAS OKSIGEN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Korosi dan Analisa Kegagalan
Program Studi-S1 Jurusan Teknik Material Dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RIZKIYAN ARDI NUGROHO

NRP. 2710 100 078

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA  (Pembimbing)



PERILAKU OKSIDASI BAJA API 5L GRADE X52 DAN WELD OVERLAY INCONEL 625 PADA TEMPERATUR TINGGI DI LINGKUNGAN ALIRAN GAS O₂

Nama : Rizkiyan Ardi Nugroho
NRP : 2710 100 078
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi, ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sulistijono DEA.

Abstrak

Dalam dunia perindustrian beberapa proses manufaktur di dalamnya harus dilakukan pada lingkungan dengan temperatur tinggi dan melibatkan campuran gas-gas yang memiliki sifat pengoksidasi seperti O₂, CH₄, H₂S, CO₂, dan lain-lain akan menyebabkan terjadinya proses oksidasi pada instrument atau material yang mengalami kontak dengan lingkungan kerja. Penelitian dilakukan untuk mempelajari perilaku oksidasi baja API 5L grade X52 dan lapisan *weld overlay* inconel 625 di lingkungan aliran gas O₂ pada temperatur tinggi. Pengujian analisa termal pada temperatur 500, 700, dan 900 °C dalam aliran gas oksigen menunjukkan bahwa karakteristik kinetika oksidasi dari baja API 5L grade X52 berbeda dengan lapisan *weld overlay* inconel 625. Pada baja API 5L grade X52 pada temperatur 500, 700, dan 900 °C didapatkan konstanta laju oksidasi sebesar $1,27 \times 10^{-5}$, 2×10^{-5} , dan $2,65 \times 10^{-5}$ mg.mm⁻².s⁻¹, sedangkan pada *weld overlay* inconel 625 pada temperatur 500 dan 700, didapatkan konstanta laju oksidasi sebesar $1,94 \times 10^{-18}$, dan $4,8 \times 10^{-11}$ mg.mm⁻².s⁻¹. Sedangkan pada temperatur 900 °C terdapat dua konstanta laju oksidasi yaitu sebesar $3,22 \times 10^{-7}$ dan $2,51 \times 10^{-9}$ mg.mm⁻².s⁻¹. Nilai energi aktivasi untuk material baja API 5L grade X52 adalah sebesar 13,869 kJ/mol K, sedangkan untuk *weld overlay* inconel 625 didapatkan nilai energi aktivasi sebesar 474,013 kJ/mol K. Pengujian SEM-EDX dan XRD menunjukkan pada baja API 5L grade X52 akan terbentuk lapisan oksida besi kromium-Fe₂CrO₄ pada temperatur 500 dan 700 °C dan oksida

besi- Fe_2O_3 pada temperatur 900 °C yang bersifat tidak protektif sedangkan pada *weld overlay* inconel 625 akan terbentuk lapisan oksida nikel-NiO dan oksida nikel kromium- NiCr_2O_4 yang stabil dan protektif. Penelitian ini juga membuktikan bahwa filler metal inconel 625 dapat digunakan sebagai material pelapis pada baja API 5L grade X52 melalui metode *weld overlay cladding* karena memiliki ketahanan oksidasi yang lebih tinggi daripada baja API 5L grade X52.

Kata kunci : oksidasi temperatur tinggi, API 5L grade X52, *weld overlay* Inconel 625, TGA, SEM, XRD

**OXIDATION BEHAVIOUR OF API 5L GRADE X52 AND
WELD OVERLAY INCONEL 625 IN HIGH TEMPERATURE
AND OXYGEN GAS FLOW CONDITION**

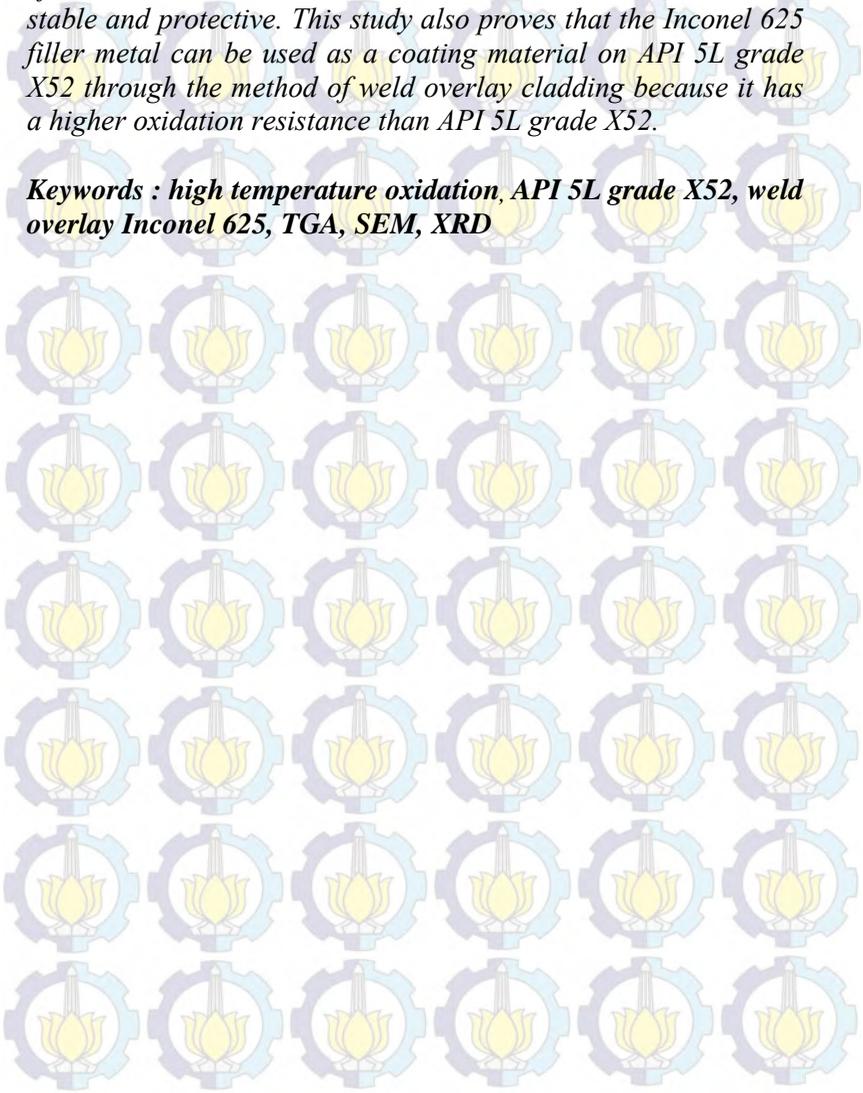
Name : Rizkiyan Ardi Nugroho
Student Number : 2710 100 078
Subject : *Material and Metallurgicals Engineering*
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Sulistijono DEA.

Abstract

In the world of industrial, some manufacturing processes should be done in an environment with high temperature and involves a mixture of gases that categorized as oxidizing agent such as O₂, CH₄, H₂S, CO₂, etc. will cause the oxidation processes in the instrument or material that is in contact with environment. The study was conducted to study the oxidation behavior of API 5L grade X52 steel and a layer of weld overlay Inconel 625 in the O₂ gas flow at high temperatures. Thermal analysis testing at temperatures of 500, 700, and 900 °C in oxygen gas flow characteristics indicate that the kinetics of oxidation of API 5L grade X52 different from the weld overlay Inconel 625. At temperatures of 500, 700, and 900 °C, API 5L grade X52 obtained oxidation rate constant of 1.27×10^{-5} , 2×10^{-5} , and $2.65 \times 10^{-5} \text{ mg.mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, whereas the Inconel 625 weld overlay at temperatures of 500 and 700 °C, obtained by the oxidation rate constant of 1.94×10^{-18} and $4.8 \times 10^{-11} \text{ mg.mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. While at temperatures of 900 °C, obtained two oxidation rate constant that is 3.22×10^{-7} and $2.51 \times 10^{-9} \text{ mg.mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The value of activation energy for the material API 5L grade X52 is at 13,869 kJ / mol K, whereas for Inconel 625 weld overlay activation energy values obtained for 474.013 kJ / mol K. SEM-EDX and XRD testing showed API 5L grade X52 will be formed iron chromium oxide layer-Fe₂CrO₄ at temperatures of 500 and 700 °C and iron oxide-Fe₂O₃ at temperatures of 900 °C which is not

protective whereas the Inconel 625 weld overlay will form a layer of nickel oxide-NiO and nickel chromium oxide-NiCr₂O₄ that is stable and protective. This study also proves that the Inconel 625 filler metal can be used as a coating material on API 5L grade X52 through the method of weld overlay cladding because it has a higher oxidation resistance than API 5L grade X52.

Keywords : high temperature oxidation, API 5L grade X52, weld overlay Inconel 625, TGA, SEM, XRD



KATA PENGANTAR

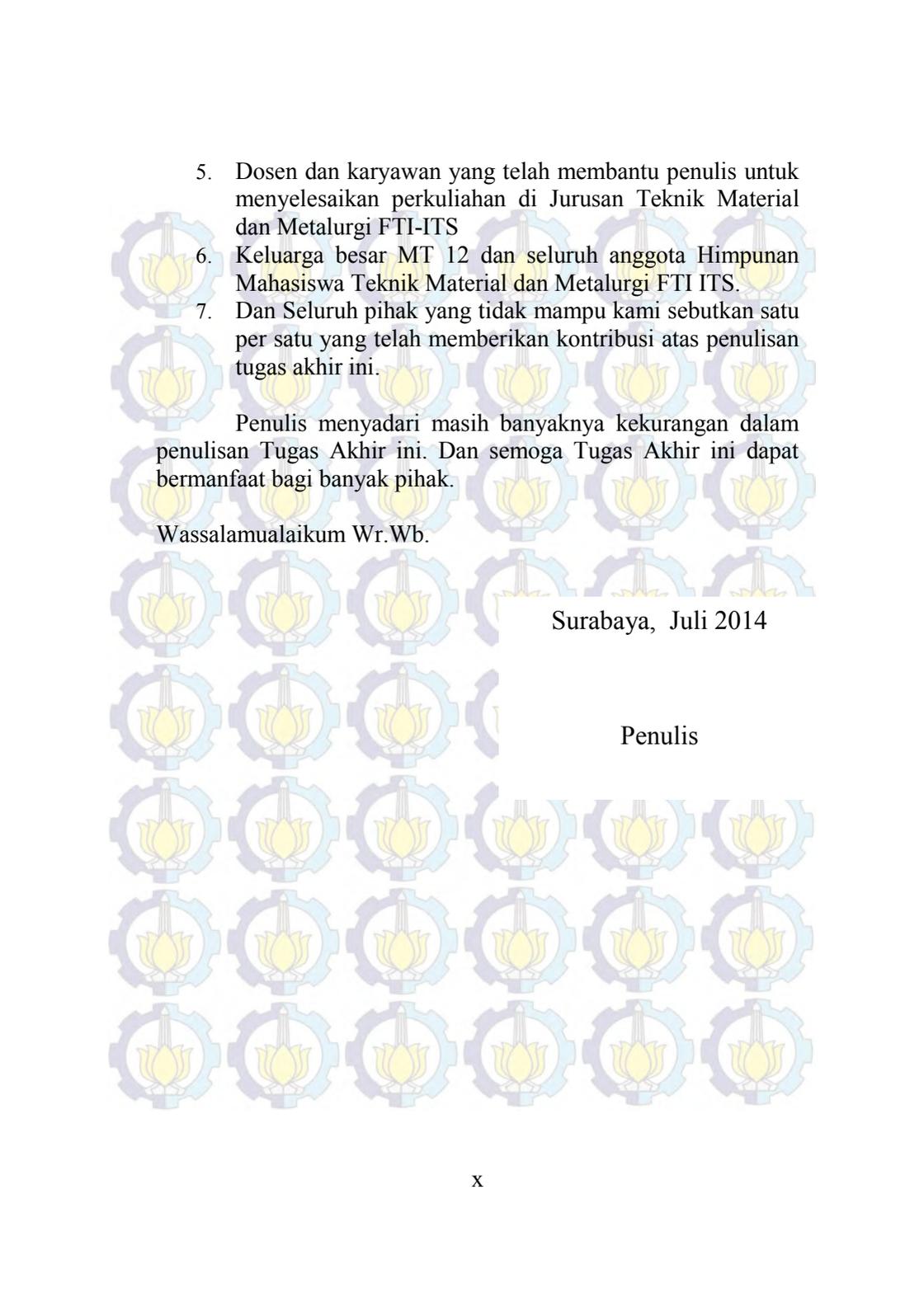
Assalamualaikum Wr.Wb.

Segala puji bagi Allah SWT atas karunia, nikmat, dan kemudahan yang diberikan pada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

“Perilaku Oksidasi Baja API 5L grade X52 dan *weld overlay* inconel 625 pada Temperatur Tinggi di Lingkungan Aliran Gas Oksigen”

Tugas Akhir ini disusun untuk melengkapi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di jurusan Teknik Material dan Metalurgi - Fakultas Teknologi Industri - Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Orang tua yang telah memberi dukungan, doa, dan nasehat.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan ilmu, bimbingan, serta wawasan.
3. Bapak Dr. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. sebagai Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS, yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama kuliah di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
4. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc., Bapak Tubagus Noor Rochmanuddin, ST.,M.Sc. dan Ibu Hariyati Purwaningsih, S.Si.,M.Si, sebagai dosen penguji dalam sidang tugas akhir yang telah memberi banyak saran dan arahan.

- 
5. Dosen dan karyawan yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan perkuliahan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
 6. Keluarga besar MT 12 dan seluruh anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
 7. Dan Seluruh pihak yang tidak mampu kami sebutkan satu per satu yang telah memberikan kontribusi atas penulisan tugas akhir ini.

Penulis menyadari masih banyaknya kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini. Dan semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Wassalamualaikum Wr.Wb.

Surabaya, Juli 2014

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan.....	iii
Abstrak.....	v
Abstract.....	vii
Kata Pengantar.....	ix
Daftar Isi.....	xi
Daftar Gambar.....	xiv
Daftar Tabel.....	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Korosi.....	5
2.2 Klasifikasi Korosi.....	6
2.2.1 Korosi Kering.....	6
2.3 Oksidasi pada Temperatur Tinggi.....	8
2.3.1 Perkembangan penelitian.....	8
2.3.2 Tinjauan dalam Termodinamika.....	9
2.3.3 Diagram Ellingham.....	10
2.3.4 Rasio Pilling-Bedworth.....	14
2.3.5 Kinetika Oksidasi.....	15
2.3.6 Laju Reaksi – Teori Arrhenius.....	20
2.3.7 Aspek Elektrokimia dan Morfologi Oksidasi.....	21
2.3.8 Oksidasi Internal.....	23
2.3.9 Efek Galvanik dan elektrolisis pada Oksida.....	25
2.3.10 Ketahanan Oksidasi.....	27
2.4 Pengendalian Korosi.....	28

2.4.1 Metode Pelapisan Logam	29
2.4.2 Pelapisan <i>Weld Overlay</i>	30
2.5 Material untuk Aplikasi Temperatur Tinggi	33
2.5.1 Nikel dan Paduan Nikel.....	34
2.5.2 Inconel 625.....	35
2.6 Pipa API 5L grade X52	38
2.7 Penelitian Sebelumnya tentang oksidasi temperatur Tinggi pada paduan berbasis Nikel.....	39
2.7.1 Oksidasi paduan Inconel 690.....	39
2.7.2 Korosi temperatur tinggi pada komponen Boiler.....	40

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian	41
3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian	42
3.2.1 Peralatan Penelitian	42
3.2.2 Bahan Penelitian.....	47
3.3 Pelaksanaan Penelitian	48
3.3.1 Preparasi Sampel.....	49
3.3.2 Pengujian Perilaku Oksidasi.....	52
3.3.3 Pengujian Karakterisasi Sampel.....	54
3.4 Alat Penelitian	54
3.5 Rancangan Penelitian	57

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data	59
4.1.1 Kondisi Awal Pipa API 5 L Grade X52 dan <i>weld overlay</i> inconel 625	59
4.1.2 Pengukuran Laju Oksidasi API 5L grade X52 Dan <i>weld overlay</i> inconel 625.....	61
4.1.3 Morfologi Permukaan API 5L grade X52 dan <i>weld overlay</i> inconel 625	63
4.1.4 Identifikasi Fasa pada Lapisan Oksida.....	76

4.2 Pembahasan	82
----------------------	----

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	87
----------------------	----

5.2 Saran.....	88
----------------	----

DAFTAR PUSTAKA.....	89
----------------------------	-----------

LAMPIRAN.....	93
----------------------	-----------



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Energi bebas standar pembentukan dari beberapa oksida sebagai fungsi temperatur.....	13
Gambar 2.2	Kurva jenis-jenis kinetika oksidasi	19
Gambar 2.3	Skema proses elektrokimia yang terjadi saat oksidasi pada lingkungan gas.....	21
Gambar 2.4	Pembentukan lapisan oksida pada besi yang diekspos di udara pada temperatur tinggi	23
Gambar 2.5	Pembentukan lapisan oksida paduan 617 pada 900°C di udara	24
Gambar 2.6	Efek dari penempelan tantalum pada perak terhadap reaksi dari uap yodium dengan perak.....	25
Gambar 2.7	Sel galvanic – Pt;O ₂ dalam larutan boraks. Ilustrasi percepatan oksidasi nikel melalui kontak dengan platinum.....	26
Gambar 2.8	Perbedaan penggunaan fungsi (a) pengelasan untuk penyambungan dan (b) pengelasan untuk pelapisan (<i>weld overlay cladding</i>)	30
Gambar 2.9	Skema pengelasan GTAW (<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>) untuk aplikasi <i>weld overlay cladding</i>	32
Gambar 2.10	Penampang melintang pipa yang telah diberikan aplikasi <i>weld overlay cladding</i>	33
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	42
Gambar 3.2	Mesin <i>Wire Cut EDM</i>	43
Gambar 3.3	Skema kerja mesin <i>Wire Cut EDM</i>	43
Gambar 3.4	<i>Combustion Boat</i>	44
Gambar 3.5	Mesin SEM-EDX	45
Gambar 3.6	Mesin XRD	46
Gambar 3.7	Mesin <i>tube furnace</i>	46
Gambar 3.8	Desain <i>overlay</i> pipa API 5L X52 dengan Inconel 625	48
Gambar 3.9	Sampel awal baja API 5L grade X52 yang dioverlay inconel 625.....	49

Gambar 3.10	Desain pemotongan secara horizontal untuk memisahkan bagian <i>weld overlay</i> inconel 625 dengan API 5L grade X52	50
Gambar 3.11	Sampel dan bentuk tiga dimesi baja API 5L grade X52 dan <i>weld overlay</i> inconel 625 untuk pengujian analisa termal	51
Gambar 3.12	Sampel dan bentuk tiga dimesi baja API 5L grade X52 dan <i>weld overlay</i> inconel 625 untuk pengamatan morfologi dan identifikasi senyawa ..	51
Gambar 3.13	Proses perendaman sampel dalam HCl 5M selama ± 20 menit.....	52
Gambar 3.14	Skema Mesin SEM	55
Gambar 3.15	Contoh Pola Difraksi Sinar-X dari Nanowires ZnO Ditumbuhkan pada Substrat Batu Safir.....	56
Gambar 4.1	Kinetika oksidasi baja API 5L grade X52 dan <i>weld overlay</i> inconel 625 untuk beberapa variasi temperatur dalam aliran oksigen	61
Gambar 4.2	Morfologi permukaan baja API 5L grade X52 (a) sebelum oksidasi dan setelah oksidasi pada temperatur (b) 500 °C, dan (c) 900 °C selama waktu tahan 2 jam.....	64
Gambar 4.3	Morfologi permukaan sampel API 5L grade X52 dalam waktu pemanasan (a) 2, (b) 4, dan (c) 6 jam pada temperatur 500 °C	66
Gambar 4.4	Morfologi permukaan sampel API 5L grade X52 dalam waktu pemanasan (a) 2, (b) 4, dan (c) 6 jam pada temperatur 900 °C	67
Gambar 4.5	Morfologi permukaan sampel API 5L grade X52 pada temperatur pemanasan 900 °C selama 6 jam 68	
Gambar 4.6	(a) pengelupasan pada lapisan oksida, dan (b) pembentukan oksida internal pada penampang melintang baja API 5L grade X52 di temperatur 900 °C selama 6 jam.....	69
Gambar 4.7	Morfologi permukaan lapisan <i>weld overlay</i> inconel 625 (a) sebelum oksidasi dan setelah oksidasi pada	

	temperatur (b) 500 °C, dan (c) 900 °C selama waktu tahan 2 jam	70
Gambar 4.8	Morfologi permukaan sampel <i>weld overlay</i> inconel 625 dalam waktu pemanasan (a) 2, (b) 4, dan (c) 6 jam pada temperatur 500 °C	72
Gambar 4.9	Morfologi permukaan sampel <i>weld overlay</i> inconel 625 dalam waktu pemanasan (a) 2, (b) 4, dan (c) 6 jam pada temperatur 900 °C	74
Gambar 4.10	(a) Morfologi permukaan sampel <i>weld overlay</i> inconel 625 (b) penampang melintang (<i>cross section</i>) sampel dalam pemanasan selama 6 jam pada temperatur 900 °C	75
Gambar 4.11	Hasil pengujian XRD pada baja API 5L grade X52 inconel 625 pada waktu ekspos selama 2 jam, 4 jam, dan 6 jam di temperatur 500 °C	76
Gambar 4.12	Hasil pengujian XRD pada baja API 5L grade X52 pada waktu ekspos selama 2 jam, 4 jam, dan 6 jam di temperatur 900 °C	78
Gambar 4.13	Hasil pengujian XRD pada <i>weld overlay</i> inconel 625 pada waktu ekspos selama 2 jam, 4 jam, dan 6 jam di temperatur 500 °C	79
Gambar 4.14	Hasil pengujian XRD pada <i>weld overlay</i> inconel 625 pada waktu ekspos selama 2 jam, 4 jam, dan 6 jam di temperatur 900 °C	80
Gambar 4.15	Hasil pengujian SEM-EDX pada lapisan oksida (a) baja API 5L grade X52 dan (b) <i>weld overlay</i> inconel 625 pada parameter temperatur pemanasan 900 °C selama 6 jam	81

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rasio volume oksida-logam	14
Tabel 2.2 Parameter pengelasan yang mempengaruhi <i>weld overlay</i>	32
Tabel 2.3 Komposisi kimia paduan Inconel 625 dalam bentuk hasil penempaan (<i>wrought</i>) dan filler metal	38
Tabel 2.4 Material dan Spesifikasi Pipa API 5 L	39
Tabel 2.5 Beberapa Jenis Kerusakan yang Terjadi pada Coating	16
Tabel 2.6 Kondisi Permukaan Logam Baja pada Berbagai Nilai Potensial	39
Tabel 2.7 Elektroda Pembanding	40
Tabel 2.8 Beberapa Anoda yang Digunakan pada Sistem ICCP	42
Tabel 2.9 Laju Konsumsi Anoda Grafit	43
Tabel 3.1 Komposisi filler metal inconel 625 dibandingkan dengan standar	47
Tabel 3.2 Informasi yang Terkandung dalam Karakter Tinggi, Posisi serta Lebar dan Bentuk Puncak Difraksi	57
Tabel 3.3 Rancangan percobaan pengujian analisa termal melalui pengukuran massa secara diskontinyu	58
Tabel 4.1 Komposisi unsur sampel awal baja API 5L grade X52 setelah pengujian EDX	59
Tabel 4.2 Komposisi unsur sampel awal <i>weld overlay</i> inconel 625 setelah pengujian EDX	60



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam dunia perindustrian, seperti industri minyak dan gas, pupuk, pembuatan kertas, otomotif dan pembangkit listrik, beberapa proses manufaktur didalamnya harus dilakukan pada lingkungan dengan temperatur tinggi (Crook P, 2007). Pada proses produksi dan pengolahan gas bumi dimana lingkungan kerja merupakan campuran gas-gas yang memiliki sifat pengoksidasi seperti O_2 , CH_4 , H_2S , CO_2 , dan lain-lain akan menyebabkan terjadinya proses oksidasi pada instrument atau material yang mengalami kontak dengan lingkungan kerja. Reaksi oksidasi antara material logam dengan lingkungan gas akan semakin dipercepat dengan kondisi temperatur dan tekanan gas yang tinggi. Reaksi oksidasi yang berlangsung pada temperatur tinggi tersebut dapat mengakibatkan terjadinya korosi pada temperatur tinggi atau korosi kering (*dry corrosion*) yang kemudian dapat menyebabkan kerusakan dan kegagalan komponen dalam industri tersebut.

Pada umumnya proses oksidasi identik sebagai proses yang terjadi dan melibatkan elektron, namun saat ini istilah oksidasi juga berlaku untuk mendeskripsikan reaksi antara logam dengan udara atau oksigen tanpa melibatkan air atau fasa cair. Fenomena ini sering disebut sebagai korosi kering (*dry corrosion*) (Fontana, 1987). Lapisan oksida yang terbentuk akibat reaksi oksidasi dapat berperan sebagai lapisan pelindung dan meningkatkan ketahanan korosi dalam kondisi stabil, namun disatu sisi juga dapat menurunkan kualitas suatu material apabila lapisan oksida yang tidak terbentuk tidak stabil dan menjadi produk korosi yang berbahaya. Oleh karena itu dibutuhkan pemilihan material yang sesuai terhadap kondisi lingkungan dan memiliki ketahanan oksidasi yang baik.

Baja merupakan salah satu material yang cukup luas penggunaannya. Dalam industri produksi dan pengolahan gas



alam, baja biasa digunakan sebagai material untuk konstruksi, instalasi, saluran gas dari sumur hingga penyimpanan. Hal tersebut dikarenakan baja memiliki sifat mekanik yang cukup baik, mudah dimachining serta harganya yang relatif murah. Namun kelemahan dari penggunaan material ini adalah ketahanan korosi yang kurang baik terutama pada lingkungan korosif dan kondisi temperatur tinggi (Pujilaksono, Johnsson, & Halvarsson, 2010).

Paduan dengan komposisi dasar Nickel memiliki sifat-sifat yang baik pada temperatur tinggi. Dalam beberapa jenis paduan berbasis nickel, paduan 625 (Inconel 625) memiliki kekuatan dan ketahanan korosi yang tinggi, paduan yang mengandung komposisi dominan Ni-Cr ini banyak digunakan pada industri kimia karena tahan terhadap aplikasi pada beberapa lingkungan korosif. Pada lingkungan yang ekstrim, kombinasi dari Ni, Cr, dan Mo memberikan ketahanan terhadap lingkungan pengoksidasi (ASM handbook, corrosion, 1987). Namun penggunaan material berbasis nickel secara keseluruhan pada suatu komponen tidak menjadi pilihan bagi pelaku industri, karena biaya yang dikeluarkan cukup besar. Sehingga mayoritas pelaku industri masih memilih baja sebagai material yang ekonomis dan memiliki sifat mekanik yang baik, namun untuk mengatasi masalah ketahanan korosi yang rendah pada baja, diperlukan suatu metode proteksi untuk meningkatkan ketahanan baja terhadap terjadinya oksidasi atau korosi.

Korosi yang merugikan ini dapat diminimalisir melalui penggunaan teknik-teknik proteksi korosi. Beberapa cara dapat digunakan untuk mengurangi laju korosi pada suatu material, salah satunya adalah metode pelapisan (Bardal, 2003). *Weld overlay* adalah salah satu metode modifikasi permukaan melalui proses pengelasan dimana satu atau lebih logam dengan karakteristik yang spesifik diaplikasikan pada logam dasar untuk meningkatkan sifat yang diinginkan atau untuk mengembalikan dimensi dari komponen tersebut (Tsay, 1998). Salah satu sifat yang dapat ditingkatkan dengan metode *weld overlay* ini adalah



ketahanan korosi. Sehingga penggunaan metode *weld overlay* untuk melapisi baja dengan paduan berbasis nickel diharapkan dapat meningkatkan ketahanan komponen terhadap terjadinya oksidasi dan korosi terutama untuk aplikasi pada lingkungan temperatur tinggi.

Berdasarkan pada permasalahan di atas, maka dilakukan penelitian tugas akhir untuk mempelajari perilaku oksidasi lapisan *weld overlay* inconel 625 dan baja API 5L grade X52 di lingkungan gas O₂ pada temperatur tinggi.

1.2. Perumusan Masalah

Adapun permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana pengaruh temperatur terhadap perilaku oksidasi lapisan *overlay* inconel 625 pada baja API 5L grade X52 di lingkungan gas O₂.
2. Bagaimana ketahanan oksidasi lapisan *overlay* inconel 625 pada baja API 5L grade X52 di lingkungan gas O₂ pada temperatur tinggi.

1.3. Batasan Penelitian

Penelitian ini menggunakan baja karbon API 5L grade X52 dilapisi inconel 625 pada sisi dalam melalui metode *weld overlay* dalam lingkungan gas O₂ dengan :

1. Tekanan dan aliran gas O₂ di dalam *chamber tube furnace* dianggap konstan
2. *Chamber* spesimen dalam *tube furnace* dianggap kedap udara
3. Hasil pengelasan *overlay* dianggap homogeny di seluruh permukaan dan sesuai dengan parameter pengelasan diseluruh permukaan baja



1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisa pengaruh temperatur terhadap perilaku oksidasi lapisan *overlay* inconel 625 dan baja API 5L grade X52 di lingkungan gas O_2 .
2. Menganalisa ketahanan oksidasi lapisan *overlay* inconel 625 dan baja API 5L grade X52 di lingkungan gas O_2 pada temperatur tinggi.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mempelajari mekanisme oksidasi pada lapisan *overlay* inconel 625 dan baja API 5L grade X52 pada kondisi temperatur tinggi di lingkungan gas O_2
2. Dapat dijadikan acuan mengenai efektifitas metode *weld overlay* untuk meningkatkan ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi di lingkungan gas O_2
3. Data hasil penelitian ini dapat dijadikan informasi yang saling melengkapi dan komprehensif dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya tentang perilaku oksidasi pada paduan super dan faktor-faktor yang berperan didalamnya.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Definisi Korosi

Korosi didefinisikan sebagai proses degradasi atau penurunan kualitas suatu material akibat bereaksi dengan lingkungannya (Fontana, 1987). Menurut Uhlig, korosi adalah kegagalan atau kerusakan suatu material akibat reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya. Pada dasarnya korosi adalah sebuah proses natural dimana material akan kembali ke alam atau kembalinya material ke tingkat energi yang paling rendah, sehingga korosi tidak dapat dihilangkan, namun dapat dicegah atau setidaknya dikontrol (Ahmad, 2006). Walaupun terdapat berbagai definisi tentang korosi, namun dapat disimpulkan bahwa korosi adalah bentuk atau hasil dari interaksi antara suatu material dengan lingkungannya.

Hingga sekitar tahun 1960, pemahaman akan fenomena korosi hanya terbatas pada logam dan paduannya dan tidak berlaku untuk keramik, polimer, komposit dan semikonduktor. Namun saat ini, istilah korosi telah meliputi seluruh jenis material baik alami hingga buatan manusia termasuk biomaterial dan nanomaterial, serta tidak terkecuali logam dan paduannya sendiri. Ruang lingkup korosi akan terus berkembang seiring dengan penemuan-penemuan material baru dari tahun ke tahun (Ahmad, 2006).

Pemahaman akan bidang korosi juga dapat dipelajari dalam dua bagian yaitu korosi dalam hal ilmu pengetahuan (*corrosion science*) dan korosi dalam hal rekayasa teknologi (*corrosion engineering*). Korosi sebagai ilmu pengetahuan (*corrosion science*) berarti memahami korosi berdasarkan teori dan hukum-hukum ilmiah serta melalui percobaan-percobaan atau eksperimen. Sehingga, pemahaman korosi dalam hal ini akan dapat menjelaskan mekanisme terjadinya korosi, pengukuran laju korosi dan macam-macam bentuk dari korosi. Bila korosi sebagai ilmu pengetahuan dapat diartikan sebagai proses untuk mengetahui



alasan atau penyebab (*knowing why*), berbeda halnya dengan pemahaman korosi dalam hal rekayasa teknologi yang dapat diartikan sebagai proses mengetahui bagaimana (*knowing how*) tindakan nyata dan aplikatif untuk menangani korosi. Pada dasarnya rekayasa teknologi dalam bidang korosi (*corrosion engineering*) merupakan bentuk aplikasi dari ilmu-ilmu korosi (*corrosion science*) secara teoritis yang digunakan untuk meminimalisir atau mencegah terjadinya korosi. Namun, pemahaman akan korosi sebagai ilmu pengetahuan secara mutlak tidak dapat dipisahkan dengan pemahaman rekayasa korosi, karena dibutuhkan pemahaman kedua hal tersebut untuk dapat merumuskan metode proteksi korosi yang lebih baik dari waktu ke waktu.

2.2. Klasifikasi Korosi

Korosi pada material logam dapat diklasifikasikan dalam dua bagian utama yaitu :

- 1) Korosi basah (*wet corrosion*), dimana lingkungan korosif adalah air atau larutan. Lingkungan korosif yang berupa media cair adalah elektrolit dan pada umumnya proses yang berlangsung adalah proses elektrokimia.
- 2) Korosi kering, dimana lingkungan korosif adalah gas kering. Korosi kering disebut juga korosi kimia dan lebih dikenal sebagai korosi temperature tinggi.

2.2.1. Korosi Kering

Pada umumnya proses oksidasi identik sebagai proses yang terjadi dan melibatkan elektron, namun saat ini istilah oksidasi juga berlaku untuk mendeskripsikan reaksi antara logam dengan udara atau oksigen tanpa melibatkan air atau fasa cair. Fenomena ini sering disebut sebagai korosi kering (*dry corrosion*) (Fontana, 1987).



Proses korosi kering yang paling nyata adalah reaksi logam dengan oksigen udara. (walaupun nitrogen menjadi unsur utama yang membentuk udara, perannya tidak penting ketika logam dipanaskan di udara, karena pengaruh oksigen lebih dominan. Pada temperatur tinggi, nitrogen memang bereaksi dengan kromium, aluminium, titanium, molibdenum, dan tungsten). Kendati reaksi dengan oksigen pada prinsipnya sangat sederhana, para ilmuwan di masa lampau mengalami kesulitan dalam memahami perubahan berat yang menyertai kalsinasi (oksidasi) logam di udara. Bahkan sekarang, pengkajian tentang oksidasi dan reaksi – reaksi temperatur tinggi lain menyangkut paduan – paduan moderen telah membuktikan bahwa proses yang dilibatkan kompleks sekali.

Oksigen mudah bereaksi dengan kebanyakan logam; meskipun energi termal yang dibutuhkan untuk menghasilkan laju oksidasi yang bermakna bagi perekayasa mungkin sangat bervariasi untuk logam – logam yang berbeda pada temperatur yang sama. Pada temperatur lingkungan sehari – hari, dari kebanyakan bahan untuk rekayasa ada yang sudah teroksidasi sedemikian rupa sehingga lapisan oksida melindungi logam di bawahnya. Ada pula yang di udara kering bereaksi begitu lambat sehingga oksidasi tidak mendatangkan masalah. Pada temperatur tinggi, walau bagaimanapun, laju oksidasi logam – logam akan meningkat. Jadi, jika sebuah komponen mesin mengalami kontak langsung dengan lingkungan bertemperatur tinggi untuk waktu yang lama, komponen itu mungkin menjadi tidak berguna.

Oleh karena itu mengingat pemahaman akan proses oksidasi merupakan hal yang penting untuk dikaji terus, maka proses oksidasi pada temperatur tinggi merupakan fokus pembahasan pada penelitian ini.



2.3. Oksidasi pada Temperatur Tinggi

2.3.1. Perkembangan penelitian

Oksidasi adalah suatu fenomena penting pada korosi di temperatur tinggi. Logam atau paduan akan teroksidasi ketika dipanaskan pada temperatur tinggi di udara atau lingkungan dengan kandungan pengoksidasi tinggi, seperti di lingkungan pembakaran dimana terdapat udara dan oksigen.

Jurnal penelitian pertama yang membahas tentang oksidasi pada temperatur tinggi ditulis oleh Gustav Tammann pada 1920. Dalam penelitiannya, dia menjelaskan tentang hukum parabolik, dimana, laju oksidasi dari logam akan berkurang seiring dengan bertambahnya lapisan oksida. Di tahun 1922, dia menemukan hukum logaritmik dari oksidasi pada logam. Namun, jurnal penelitian pertama yang memaparkan tentang permasalahan mendasar mengenai hal tersebut dikemukakan oleh N.B. Pilling dan R.E. Bedworth pada 1923. Mereka merujuk pada “temperatur tinggi” dimana terjadi pergerakan dari komponen reaktif melalui lapisan pelindung sebagai penentu utama dari laju reaksi (hal ini berlawanan dengan kondisi pada proses korosi basah yang terjadi pada temperatur kamar). Mereka juga menggarisbawahi tentang permasalahan permasalahan berkaitan dengan pembentukan lapisan oksida yang bersifat melindungi, kuat, dan bebas dari retak pada permukaan material yang teroksidasi.

Enam tahun kemudian, Leonard B. Pfeil mengenalkan konsep pergerakan logam ke arah luar sedangkan oksigen ke arah dalam pada suatu lapisan oksida, dan pada 1934, Portevin, Pretet, dan Jolivet melakukan penelitian secara luas mengenai oksidasi pada besi dan paduannya. Pada tahun yang sama, sebuah penemuan menyatakan bahwa pada oksida terdapat cacat kisi dan proses perpindahan elemen didalamnya ditentukan oleh pergerakan dari cacat tersebut yang kemudian dapat dilakukan pendekatan secara kuantitatif. Hal tersebut dikemukakan oleh Carl Wagner, yang kemudian dikenal karena telah menjelaskan teori dasar dari proses perpindahan bagian-bagian dalam lapisan oksida.



Kontribusi penting lainnya dilakukan oleh Cabrera dan Mott pada tahun 1939-1948 yang menjelaskan bahwa pertumbuhan lapisan oksida dikontrol oleh lompatan ion dari satu tempat ke tempat lain di atasnya yang mempengaruhi terjadinya lapisan energi pelindung. Kemudian, teori Mott dikritisi secara keras oleh Karl Hauffe, yang mempelajari tentang oksidasi pada paduan. Selama periode tahun 1920-1940, terdapat beberapa penelitian lain yang relevan dan menjadi rujukan pada oksidasi pada temperatur tinggi diantaranya: Metode *interference* untuk mendapatkan ketebalan dari lapisan oksida (Tammann, 1920-1926), metode spektroskopi untuk mendapatkan ketebalan lapisan oksida (Constable, 1927), dan metode difraksi sinar X untuk mempelajari lapisan oksida (Finch Quarrell, 1933).

Pada awalnya, penelitian tentang permasalahan oksidasi mengacu pada sistem sederhana, dimana melibatkan pengoksidasi tunggal (biasanya oksigen) dan logam murni, meskipun secara aplikasinya material tahan temperatur tinggi adalah selalu paduan. Saat ini, dengan didukung kemajuan teknik karakterisasi, beberapa pendekatan seperti teori difusi multikomponen dan pertumbuhan oksida pada material *polyphase* sangat mungkin untuk dianalisa.

2.3.2. Tinjauan dalam Termodinamika

Salah satu tinjauan terpenting dalam menganalisa permasalahan tentang oksidasi adalah melalui kesetimbangan termodinamika, yang merupakan metode untuk memastikan suatu reaksi yang mungkin terjadi. Kerumitan dari fenomena oksidasi menyebabkan analisa secara termodinamika dituangkan dalam bentuk grafik atau diagram. Beberapa tipe diagram termodinamika yang sering digunakan dalam penelitian oksidasi diantaranya:

- 1) Digram hubungan energi bebas Gibbs dengan komposisi dan aktivasi dengan komposisi, yang digunakan untuk menjelaskan pemecahan masalah termodinamika.
- 2) Diagram hubungan energi bebas standar dari pembentukan dengan temperatur, yang menyediakan data secara



termodinamika untuk kelompok senyawa, oksida, sulfide, karbida, dan lainnya.

- 3) Diagram jenis-jenis gas/uap, yang memungkinkan tekanan uap dari senyawa ditunjukkan sebagai fungsi dari variable yang sesuai seperti tekanan parsial dari komponen gas.
- 4) Diagram kesetimbangan *isothermal* dua dimensi, yang memetakan fasa yang stabil dalam suatu sistem yang melibatkan satu komponen logam dan dua komponen nonlogam yang reaktif.
- 5) Diagram kesetimbangan *isothermal* dua dimensi, yang memetakan fasa yang stabil dalam suatu sistem yang melibatkan dua komponen logam dan satu komponen nonlogam yang reaktif.
- 6) Diagram kesetimbangan *isothermal* dua dimensi, yang memetakan fasa yang stabil dalam suatu system yang melibatkan dua komponen logam dan dua komponen nonlogam yang reaktif

Adapun konsep dasar yang menyangkut pada perumusan dan analisa menggunakan diagram termodinamika adalah energi bebas Gibbs parsial, potensial kimia, energi bebas dari pencampuran, persamaan Gibbs-Duhem, aktivasi, hukum Raoult, hukum Henry, dan lain-lain.

Penentuan suatu kondisi lingkungan untuk mengetahui kemungkinan produk korosi yang terbentuk seringkali dibutuhkan. Pada kasus ini, diagram Ellingham, yang memetakan hubungan antara energi bebas standar pembentukan (ΔG°) dengan temperatur dari beberapa jenis senyawa (oksida, sulfide, karbida) akan sangat berguna karena dapat membandingkan stabilitas relative dari setiap senyawa (J. Zurek, D.J. Young, & E. Essuman, 2008).

2.3.3. Diagram Ellingham

Diagram Ellingham adalah grafik hubungan antara energi bebas standar dari oksidasi pada logam murni dengan temperatur. Secara termodinamika, suatu oksida akan terbentuk ketika potensial oksigen dalam lingkungan lebih besar daripada tekanan



parcial oksigen dalam kondisi setimbang dengan oksida. Tekanan parcial oksigen dalam kondisi setimbang dengan oksida dapat ditentukan dari energi bebas standar pembentukan dari oksida (Lai, 1990). Mengacu pada reaksi berikut:



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

$$\Delta G^\circ_T = \Delta H^\circ_T - T \Delta S^\circ_T \quad (II.2)$$

Dimana ΔH°_T dan ΔS°_T adalah enthalpi dan entropi standar dari reaksi. Pada kondisi setimbang dapat dituliskan

$$\Delta G^\circ_T = -RT \ln K = -RT \ln \left(\frac{a_{MO_2}}{a_M \cdot P_{O_2}} \right) \quad (II.3)$$

Diasumsikan bahwa aktivitas antara M dan MO_2 adalah sebagai satu kesatuan. Oleh karena itu

$$\Delta G^\circ_T = RT \ln p_{O_2} \quad (II.4)$$

Pada gambar 2.2 ditunjukkan pembentukan beberapa oksida sederhana. Nilai dari ΔG°_T ditunjukkan dalam kilojoule per mol O_2 sehingga stabilitas dari beberapa oksida dapat dibandingkan secara langsung, dimana semakin ke bawah posisi dari garis pada diagram, maka oksida yang terbentuk akan semakin stabil.

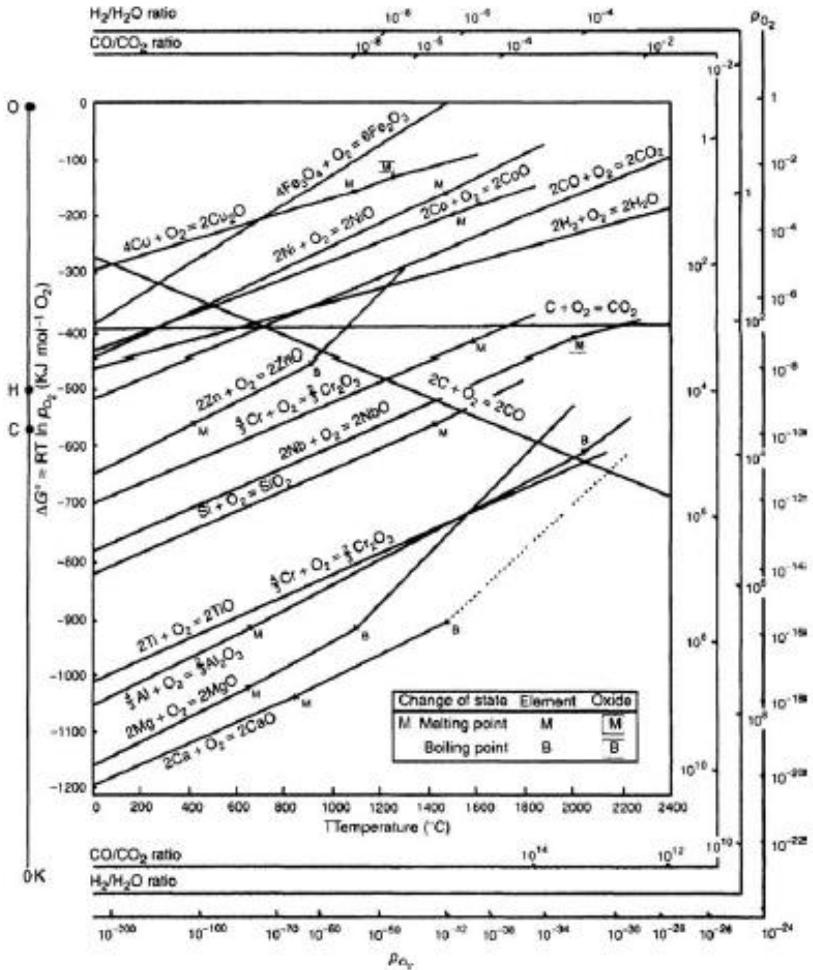
Nilai dari p_{O_2} bisa didapatkan secara langsung dari diagram dengan menarik garis lurus dari titik "O" menuju titik pada garis energy bebas yang merupakan perpotongan dari temperatur yang diinginkan, dan diteruskan hingga memotong garis skala di sisi kanan yang berlabel p_{O_2} . Nilai dari tekanan rasio H_2/H_2O pada kondisi setimbang juga bisa didapatkan melalui cara yang sama namun garis diawali dari titik "H" dan diakhiri di skala berlabel rasio H_2/H_2O dan nilai untuk rasio CO/CO_2 juga bisa didapatkan dengan menarik garis dari titik "C" ke garis skala CO/CO_2 . Sehingga, melalui cara tersebut dimungkinkan untuk memperoleh



potensial oksigen dalam lingkungan sebagai p_{O_2} , p_{H_2}/p_{H_2O} , dan p_{CO}/p_{CO_2} , dan tekanan parsial oksigen dalam kesetimbangan dengan oksida, yang digunakan untuk menentukan oksida yang terbentuk secara termodinamika.

Pada gambar 2.2 juga menunjukkan tingkat stabilitas dari beberapa oksida. Oksida yang paling stabil akan memiliki nilai negatif paling besar dari ΔG°_T , atau nilai paling kecil dari p_{O_2} , atau nilai paling tinggi dari p_{H_2}/p_{H_2O} dan p_{CO}/p_{CO_2} .

Dari gambar 2.2 juga didapatkan informasi bahwa oksida dari besi, nikel, dan kobalt, yang merupakan unsur dasar pada paduan yang mayoritas digunakan di industri, memiliki sifat oksida yang kurang stabil bila dibandingkan dengan oksida dari beberapa unsur terlarut (seperti kromium, aluminium, silikon) pada suatu paduan. Ketika salah satu unsur terlarut tersebut ditambahkan pada besi, nikel, atau kobalt, maka akan terjadi oksidasi internal (*internal oxidation*) bila konsentrasi yang ditambahkan relatif rendah. Namun bila konsentrasi unsur terlarut tersebut ditambah cukup banyak, maka akan terjadi perubahan dari oksidasi internal menjadi oksidasi eksternal, yang kemudian menghasilkan lapisan oksida yang melindungi paduan dari percepatan oksidasi. Proses ini disebut sebagai "*selective oxidation*" (Uhlig, 1948).



Gambar 2.1. Energi bebas standar pembentukan dari beberapa oksida sebagai fungsi temperatur (N. Birks, G. H. Meier, & F. S. Pettit, 2006).



2.3.4. Rasio Pilling-Bedworth

Salah satu awal penelitian ilmiah di bidang oksidasi dilakukan oleh Pilling dan Bedworth, yang menjelaskan bahwa ketahanan oksidasi berhubungan dengan rasio volume oksida dan logam. Menurut Pilling dan Bedworth, rasio volume yang bernilai kurang dari 1 akan menghasilkan oksida yang tidak mencukupi untuk menutup seluruh permukaan logam, sehingga tidak bersifat sebagai pelindung. Hal yang sama juga terjadi bila rasio melebihi dari 1, maka akan menimbulkan konsentrasi tegangan yang besar pada oksida sehingga mengakibatkan ketahanan korosi kecil karena terjadi keretakan dan pengelupasan. Rasio ideal berdasarkan penjelasan tersebut adalah nilai yang paling mendekati 1 (Fontana, 1987).

Rasio volume untuk beberapa logam ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Rasio volume oksida-logam (Chalmers, 1959).

Lapisan Pelindung	Lapisan non-Pelindung
Be – 1.59	Li – 0.57
Cu – 1.68	Na – 0.57
Al – 1.28	K – 0.45
Si – 2.27	Ag – 1.59
Cr – 1.99	Cd – 1.21
Mn – 1.79	Ti – 1.95
Fe – 1.77	Mo – 3.40
Co – 1.99	Cb – 2.61
Ni – 1.52	Sb – 2.35
Pd – 1.60	W – 3.40
Pb – 1.60	Ta – 2.33
Ce – 1.16	U – 3.05
	V – 3.18

Dari tabel diketahui bahwa rasio tersebut tidak dapat memprediksi secara tepat dari ketahanan oksidasi. Pada dasarnya,



logam dengan rasio volume kurang dari 1 akan membentuk oksida bukan pelindung (*non-protective*), begitu pula dengan rasio volume yang sangat tinggi (2 atau 3), namun rasio tersebut hanya sebagai kriteria empiris dan tidak meliputi sifat-sifat lain yang lebih penting dalam penentuan ketahanan oksidasi. Agar dapat melindungi dari reaksi oksigen, sebuah oksida harus memiliki sifat mampu lekat yang baik, titik leleh yang tinggi, tekanan uap yang rendah, ketahanan retak pada temperatur tinggi yang baik, dan konduktivitas listrik yang rendah atau koefisien difusi terhadap ion logam dan oksigen yang rendah. Oleh karena itu, ketahanan oksidasi dari suatu logam dan paduan ditentukan oleh beberapa faktor yang kompleks.

Sebagai tambahan pada pembahasan rasio Pilling-Bedworth, proteksi oleh oksida ditentukan oleh kemampuan ikat dari oksida dengan substrat, tekanan uap rendah, dan temperatur leleh yang tinggi dari oksida, laju pertumbuhan oksida yang lambat, stabilitas yang tinggi secara termodinamik. Mekanisme pertumbuhan dari oksida juga relevan terhadap kemampuan perlindungan suatu oksida. Sebagai contohnya, bila lapisan terbentuk pada bidang antarmuka antara logam dengan oksida karena migrasi dari ion oksida, maka tegangan sisa dapat terjadi karena terdapat ruang cukup untuk oksida tumbuh. Disisi lain, lapisan yang terbentuk pada bidang antara oksida dengan gas karena perpindahan ion logam keluar tidak akan mendorong untuk mengambil alih volume dari logam yang teroksidasi, pada kondisi tersebut maka lapisan protektif akan terbentuk.

2.3.5. Kinetika Oksidasi

Parameter terpenting dari oksidasi logam dari sudut pandang teknik adalah laju reaksi. Dikarenakan produk dari reaksi oksidasi secara umum terjadi pada permukaan logam, maka laju oksidasi diukur dan ditunjukkan sebagai pertambahan berat per unit area (Fontana, 1987).

Kinetika reaksi adalah sebuah tinjauan tentang kecepatan dari sebuah reaksi kimia. Faktor yang mempengaruhi sebuah reaksi



adalah interaksi kompleks antara material dengan lingkungan. Adapun faktor lingkungan yang berpengaruh diantaranya :

- 1) Temperatur
- 2) Waktu/siklus termal pada lingkungan
- 3) Jenis media korosi serta konsentrasinya
- 4) Tegangan statis dan siklus regangan

Sedangkan beberapa faktor dari suatu material yang mempengaruhi korosi pada temperatur tinggi adalah :

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

Sebuah material dapat mengalami perubahan mekanisme korosi yang mengakibatkan perubahan juga pada kinetika reaksinya. Salah satu contohnya, sebuah paduan mengalami korosi yang diawali dengan mengikuti kinetika parabolik selama proses pembentukan lapisan, kemudian memasuki tahap perilaku linear pada proses pertumbuhan lapisan selanjutnya, dan, hingga akhirnya proses pembentukan lapisan selesai kondisi korosi katastrofik terjadi dan laju korosi berubah secara drastis.

Reaksi yang menggambarkan terjadinya korosi temperatur tinggi secara umum dapat digolongkan menjadi tiga jenis yaitu linear, parabolik, dan logaritmik (Baboian, 2005).

- 1) Reaksi kinetika linear (*Linear Reaction Kinetics*)

Kinetika laju linear adalah proses yang sering dikaitkan dengan material yang tidak membentuk lapisan



protektif atau memiliki lapisan dengan tingkat porositas tinggi, retak, atau daya lekat yang kurang.

Adapun persamaan II.8 menjelaskan tentang kinetika reaksi linear

$$x = k_1 t \quad (\text{II.5})$$

Dimana x adalah ketebalan lapisan atau pertambahan massa per unit area dan k_1 adalah konstanta laju linear. Ketika tebal lapisan diukur maka k_1 disekripsikan sebagai cm s^{-1} ; bila pengukuran yang digunakan adalah pertambahan masasa, maka konstanta laju yang digunakan adalah $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

2) Reaksi kinetika parabolik (*Parabolic reaction kinetics*)

Reaksi kinetika parabolik menunjukkan korosi temperatur tinggi dimana pada laju tersebut teridentifikasi terjadi difusi. Hal ini menjadi karakter akan terbentuknya lapisan protektif dan terdapat penetrasi oleh unsur-unsur korosif seperti oksigen, karbon, atau sulfur pada material tertentu.

Adapun persamaan laju reaksi kinetika parabolic ditunjukkan pada persamaan II.9

$$x^2 = k_2 t \quad (\text{II.6})$$

Dimana x adalah ketebalan lapisan atau pertambahan massa per unit area, k_2 adalah kontanta laju parabolik dan untuk ketebalan lapisan oksida di deskripsikan sebagai $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ sedangkan untuk pertambahan massa oksida ditunjukkan dalam satuan $\text{g}^2 \text{cm}^{-4} \text{s}^{-1}$. Pada korosi temperatur tinggi, mayoritas pembentukan lapisan kromia (Cr_2O_3) dan alumina (Al_2O_3) mengikuti reaksi kinetika parabolik.

Penetrasi internal dapat juga didefinisikan melalui persamaan laju parabolik. Kondisi ini menunjukkan dari pembentukan presipitat (baik inter- maupun intragranular) karena terjadi interaksi dari satu atau lebih elemen/unsur di atmosfer dengan substrat/logam dasar. Unsur reaktif di atmosfer akan larut ke dalam substrat bila tekanan gas di



bawah tekanan untuk memisahkan senyawa yang terbentuk dari unsur reaktif dengan elemen di substrat. Unsur reaktif di atmosfer akan terlarut kedalam substrat dan memungkinkan terbentuk presipitat yang stabil. Penetrasi internal terjadi hanya jika komponen reaktif pada substrat berdifusi keluar lebih lambat daripada komponen gas berdifusi ke dalam. Wagner menemukan persamaan sederhana untuk memperkirakan serangan internal.

$$X = \left[\frac{2N^s D t}{v N_B^i} \right]^{1/2} \quad (\text{II.7})$$

Dimana,

X = kedalaman dari penetrasi unsur dalam waktu t .

N^s = fraksi mol dari gas reaktif pada permukaan substrat

D = koefisien difusi dari unsur reaktif dalam substrat

t = waktu

v = rasio dari atom gas reaktif dengan komponen atom reaktif pada presipitat

N_B^i = fraksi mol dari komponen reaktif yang dimulai pada substrat.

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

Reaksi kinetika logaritmik seringkali dihubungkan dengan kondisi lingkungan temperatur rendah, menjadi fase awal terjadinya oksidasi pada beberapa material, dan dapat membentuk lapisan luar yang tebal dimana didalamnya terdapat porositas intergranular atau presipitat yang mengganggu mekanisme difusi. Adapun persamaan laju reaksi ini adalah sebagai berikut

$$x = k_{log} (t - t_0) + A \quad (\text{direct log law}) \quad (\text{II.8})$$

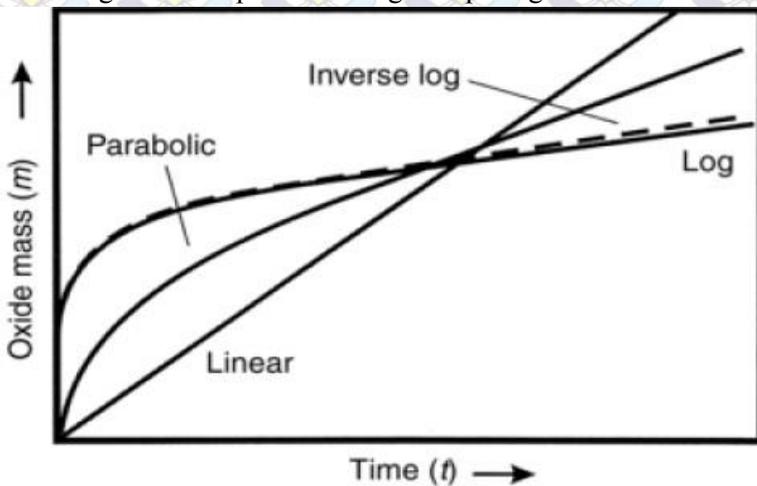
$$1/xk = B - k_0 \log t \quad (\text{inverse log law}) \quad (\text{II.9})$$

Dimana A , B , t_0 , dan k_{log} dan k_2 adalah konstanta pada temperatur konstan.



Perilaku dengan laju logaritmik dapat terjadi ketika jalur difusi untuk ion atau vakansi berkurang sebagai fungsi dari waktu. Sebagai contoh, hal ini dapat terjadi ketika vakansi terdapat pada lapisan antarmuka logam dengan lapisan dan menyebabkan pembentukan kavitas atau pengelupasan sebagian lapisan yang kemudian menghalangi mekanisme tumbuhnya lapisan. Hal ini juga dapat terjadi pada paduan ketika partikel sangat stabil namun lambat dalam pertumbuhan presipitat pada permukaan antarmuka lapisan atau logam dan membatasi pertumbuhan lapisan secara cepat. Tegangan pada saat pertumbuhan pada lapisan juga menyebabkan cacat retak pendek parallel pada lapisan substrat. Laju secara *inverse logarithmic* seringkali ditemukan pada tembaga, aluminium, dan besi pada temperatur mendekati temperatur kamar.

Adapun perilaku ketiga jenis laju korosi di atas dapat digambarkan pada sebuah grafik pada gambar 2.3.



Gambar 2.2. Kurva jenis-jenis kinetika oksidasi (Baboian, 2005)



2.3.6. Laju Reaksi – Teori Arrhenius

Kecepatan reaksi kimia akan bertambah dengan naiknya suhu. Kenaikan suhu pada suatu reaksi kimia akan meningkatkan vibrasi molekuler yang terlibat dalam reaksi. Jika vibrasi meningkat maka frekuensi tumbukan antar molekul, juga akan meningkat sehingga laju reaksi akan semakin besar.

Ada 2 (dua) teori yang digunakan untuk menjelaskan kebergantungan laju reaksi pada suhu (Gaskell, 2003).

1. Teori Arrhenius
$$d \ln k / dT = E_a / RT^2 \quad (\text{II.10})$$

jika persamaan (1.21) diintegrasikan akan diperoleh:
$$\ln k = -E_a / RT + \ln A \quad (\text{II.11})$$

dengan :

k = konstanta laju reaksi

E_a = energi aktivasi

A = konstanta Arrhenius

T = suhu (K)

R = konstanta gas

Pada suhu tertentu, makin tinggi energi aktivasi maka makin lambat reaksi yang berlangsung. Dengan membuat kurva log k terhadap T nilai E_a dan A dapat ditentukan.

2. Teori Laju Reaksi Absolut

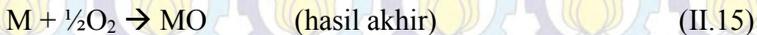
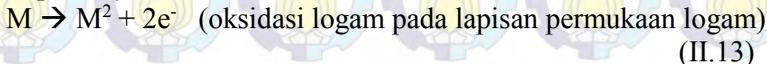
Pada dasarnya teori ini menyatakan bahwa pada tahap penentu kecepatan reaksi, zat-zat reaktan, A dan B bergabung secara reversibel membentuk suatu kompleks teraktivasi, AB^* yang selanjutnya terdekomposisi menjadi produk. $A + B = AB^* \rightarrow$ Produk. Konstanta kesetimbangan semu untuk kompleks teraktivasi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$K^* = [AB^*] / [A][B] \quad (\text{II.12})$$

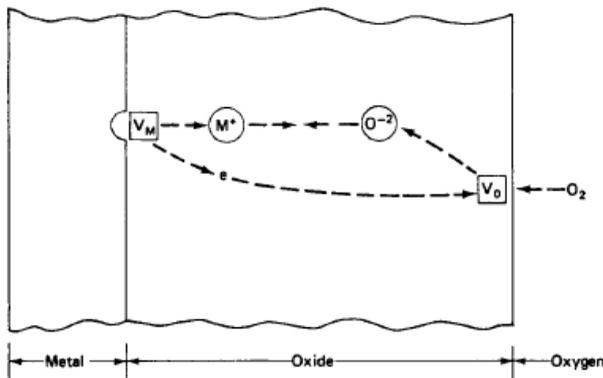


2.3.7 Aspek Elektrokimia dan Morfologi dari Oksidasi

Dalam ruang lingkup ilmu pengetahuan tentang reaksi antara gas dan logam, oksidasi mengacu kepada reaksi yang melibatkan berbagai macam gas, seperti sulfur, nitrogen, karbon dioksida, dan uap air. Reaksi antara gas dengan logam ini akan menghasilkan lapisan oksida yang dalam proses pembentukannya dapat dianalisa berdasarkan hukum termodinamika (Uhlig, 1948). Oksidasi oleh gas oksigen, seperti halnya terjadi pada korosi yang melibatkan cairan, adalah proses elektrokimia. Hal ini tidak sesederhana reaksi kimia dari logam dengan oksigen dalam skala molekuler, $M + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow MO$, namun terdiri dari dua proses yang terpisah, yaitu :



Gambar 2.4 menunjukkan bahwa lapisan oksida berperan secara simultan sebagai (1) sebuah konduktor ion (elektrolit), (2) sebuah konduktor elektron, (3) sebuah elektroda dimana oksigen tereduksi, dan (4) sebuah lapisan pelindung terjadinya difusi dimana ion dan elektron akan mencapai permukaan logam.

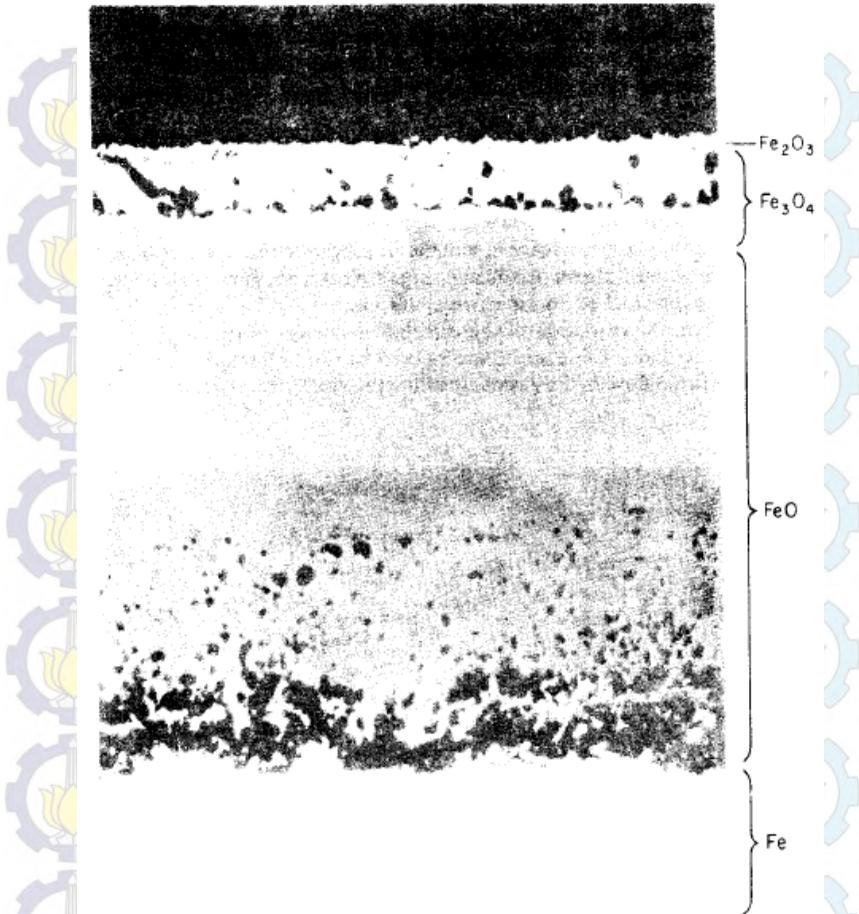


Gambar 2.3. Skema proses elektrokimia yang terjadi saat oksidasi pada lingkungan gas (Fontana, 1987).



Proses yang berlangsung pada permukaan logam yang bersih dan terkspos pada lingkungan oksigen akan mengikuti skema atau proses berikut : (1) adsorpsi atom oksigen, (2) pembentukan inti oksida yang kemudian tumbuh secara lateral, dan (3) pertumbuhan lapisan oksida secara kontinyu. Karena energy bebas untuk mengikat atom oksigen melebihi dari energy bebas untuk mengurai oksigen, lapisan pertama yang terbentuk akan mengandung atom oksigen. Proses ekpos secara kontinyu pada kondisi oksigen tekanan rendah akan diikuti oleh pengikatan molekul O_2 pada atom logam yang terkspos melewati layer pertama. Karena layer kedua dari oksigen teikat lebih lemah daripada layer pertama, maka akan tetap terserap tanpa adanya penguraian atom. Struktur yang dihasilkan biasanya lebih stabil pada logam transisi daripada logam non transisi.

Beberapa diagram fasa logam-oksigen menunjukkan kemungkinan untuk terbentuk beberapa oksida pada kondisi stabil. Sebagai contoh, besi dapat membentuk senyawa FeO , Fe_3O_4 , dan Fe_2O_3 ; tembaga dapat membentuk Cu_2O dan CuO ; dan lain-lain. Dalam pembentukan lapisan oksida pada logam murni, fasa oksida yang terbentuk akan stabil sesuai urutan berdasarkan kandungan oksigen dan logam didalamnya. Senyawa dengan kandungan oksigen yang banyak akan berada di lapisan terluar, sedangkan senyawa dengan kandungan logam paling banyak akan berada di lapisan terdekat dengan logam dasar ; sehingga untuk Fe pada temperature $560\text{ }^\circ\text{C}$ fasa yang terbentuk sesuai urutan adalah $Fe/FeO/Fe_3O_4/Fe_2O_3/O_2$, seperti ditunjukkan pada gambar 2.4.



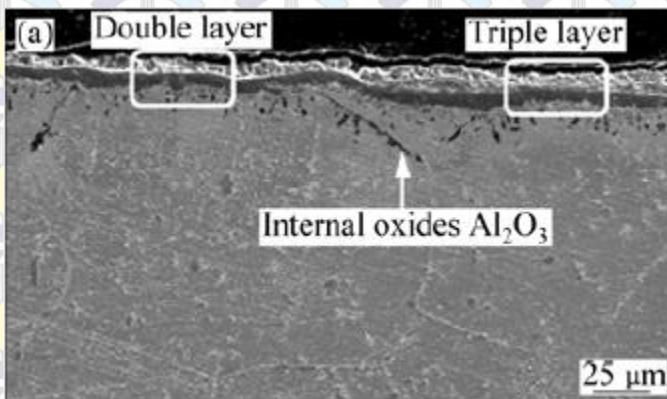
Gambar 2.4. Pembentukan lapisan oksida pada besi yang diekspos di udara pada temperatur tinggi (Fontana, 1987).

2.3.8. Oksidasi Internal (*Internal Oxidation*)

Dalam beberapa sistem paduan, satu atau lebih komponen terlarut memungkinkan untuk membentuk oksida yang lebih stabil daripada logam dasar sehingga memungkinkan untuk teroksidasi



dibawah permukaan logam, atau dibawah bagian antarmuka antara logam dengan lapisan. Hal ini disebut sebagai oksidasi internal (*internal oxidation*) karena presipitat oksida cenderung terbentuk dalam matriks logam, daripada di lapisan permukaan bagian luar. Paduan terlarut pada logam dasar yang memiliki kelarutan dan difusifitas yang tinggi untuk atom oksigen akan memiliki kecenderungan terbentuk oksidasi internal (*internal oxidation*). Paduan dasar perak dan tembaga yang mengandung unsur Al, Zn, Cd, Be dan lain-lain menunjukkan terjadinya oksidasi jenis ini. Oksidasi Internal juga beberapa kali terjadi pada paduan besi, nikel, dan kobalt yang umumnya digunakan untuk aplikasi di temperatur tinggi. Oksidasi internal dapat dicegah dengan menambahkan paduan yang memiliki kestabilan lebih kecil, sehingga lapisan di permukaan dapat terbentuk dan tidak terjadi oksida internal. Pengurangan aktivitas oksidasi dari lingkungan, pada komposisi kimia tertentu, juga akan mendorong terbentuknya lapisan pelindung (Fontana, 1987). Salah satu contoh internal oksidasi ditunjukkan pada gambar 2.6.

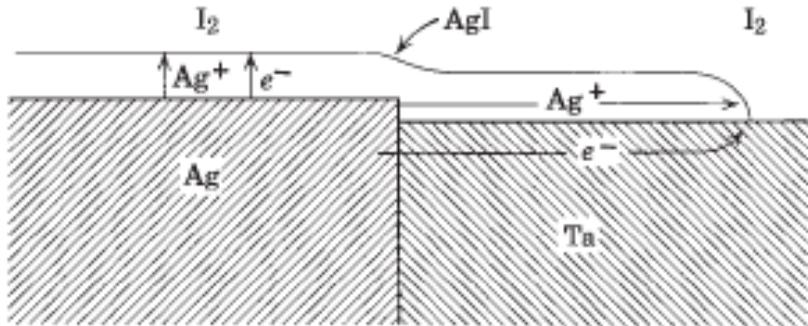


Gambar 2.5. Pembentukan lapisan oksida paduan 617 pada 900°C di udara (Jang, et al., 2011).



2.3.9. Efek Galvanik dan elektrolisis pada oksida

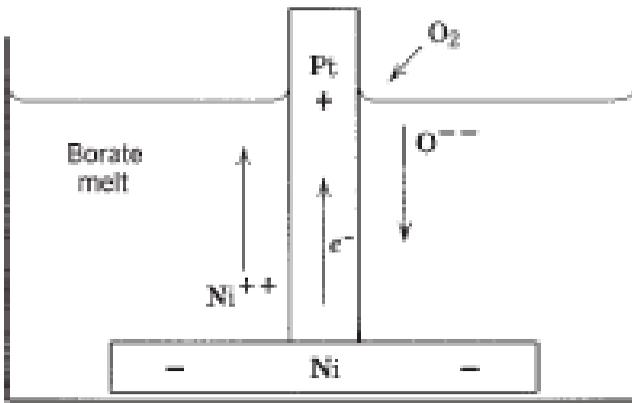
Sifat alami elektrokimia pada oksidasi temperatur tinggi menunjukkan bahwa kopling galvanik dari logam yang berbeda akan mempengaruhi laju, dan, pada kenyataannya, seperti efek yang terjadi. Sebagai contoh, reaksi antara perak dengan gas yodium pada 174°C , dipercepat oleh kontak perak dengan tantalum, platinum, atau grafit. AgI, yang merupakan konduktor ionik utama, terbentuk pada perak pada laju dibatasi oleh transport elektron di lapisan AgI. Ketika perak digabungkan ke tantalum, Ag⁺ ion menyebar di atas permukaan tantalum, dengan memasok elektron untuk konversi Hasten perak menjadi AgI. Selain itu, karena untuk biasa 1 m AgI pada perak, senyawa tersebut menyebar secara progresif diatas yang permukaan tantalum (Gambar 2.7). Secara analog, ditemukan bahwa, ketika perak dilapisi dengan emas yang berporous (electroplating) terkena uap sulfur pada suhu 60°C , maka Ag₂S membentuk lapisan protektif dan erat atas permukaan emas.



Gambar 2.6 Efek dari penempelan tantalum pada perak terhadap reaksi dari uap yodium dengan perak



Contoh kedua dilakukan pada nikel yang kemudian dilakukan immersi dalam cairan Na-K boraks ke kedalaman sekitar 3 mm pada 780°C pada 1 atm O_2 (Gambar 2.8). Adapun laju oksidasi dibawah kondisi tersebut adalah rendah kerana terbatasnya akses oksigen dari fasa gas. Jika nikel digabungkan ke platinum atau kasa perak, yang terakhir mencapai di atas permukaan boraks cair, korosi pada nikel dipercepat oleh faktor 35-175 selama 1 jam pemaparan. Nikel dalam kondisi ini terkorosi bahkan lebih cepat dibandingkan jika terkena oksigen murni pada suhu yang sama karena lapisan pelindung NiO tidak terbentuk. Sebaliknya, Ni^{2+} larut dalam elektrolit boraks, dan platinum bertindak sebagai elektroda oksigen; sirkuit beda potensial terbuka antara platinum dan nikel 0,7 V di bawah kondisi yang dikutip sebelumnya. Penambahan 1% FeO ke dalam boraks akan lebih meningkatkan laju oksidasi, mungkin dengan menyediakan Fe^{2+} ion, yang teroksidasi menjadi Fe^{3+} oleh oksigen di dekat permukaan elektrolit, dengan ion trivalen daripada dikurangi lagi baik di katoda atau dengan tindakan sel lokal pada anoda nikel.



Gambar 2.7 Sel galvanic – Pt; O_2 dalam larutan boraks. Ilustrasi percepatan oksidasi nikel melalui kontak dengan platinum.



Kecenderungan oksidasi pada migrasi ion dalam reaksi pada produk lapisan menunjukkan bahwa tingkat oksidasi pasti dipengaruhi oleh arus listrik yang digunakan. Hal ini pertama kali terbukti pada kasus oleh Schein et al. Dengan membungkus kawat platinum di sekitar besi yang teroksidasi dan melewati arus $1,5 \text{ A/cm}^2$, peneliti ini menurunkan tingkat oksidasi pada $880 \text{ }^\circ \text{C}$ ketika besi dibuat katodik, dan mereka dipercepat tingkat ketika besi dibuat anodik. Hubungan serupa yang ditunjukkan oleh Jorgensen untuk oksidasi seng dalam oksigen pada $375 \text{ }^\circ \text{C}$ (Revie, 2008).

2.3.10. Ketahanan Oksidasi (*Oxidation resistance*)

Oksidasi dari suatu paduan adalah suatu proses kompleks yang terdiri dari beberapa fenomena dan bergantung pada komposisi material dan lingkungan yang meliputi temperatur, tegangan mekanik, komposisi gas, dan sebagainya. Untuk mendapatkan proteksi yang efektif dari suatu material logam, lapisan yang terbentuk harus mengacu pada pembentukan lapisan permukaan yang kontinyu (*external oxidation*) dan tidak mengalami presipitasi pada paduan (*internal oxidation*).

Meskipun beberapa penelitian telah dilakukan untuk mempelajari oksidasi pada paduan, namun beberapa mekanisme oksidasi masih belum bisa dipahami secara penuh (Uhlig, 1948).

Pada kondisi aplikasi di temperatur tinggi, paduan dengan ketahanan oksidasi yang tinggi sangat dibutuhkan. Nikel, kobalt, dan besi termasuk dalam unsur yang memiliki ketahanan oksidasi menengah, penambahan kromium, silikon, dan aluminium pada paduan akan mengakibatkan pembentukan fasa oksida protektif spinel dan rhombohedral (Cr_2O_3 dan Al_2O_3). Akan tetapi bila penambahan unsur tersebut tidak pada komposisi yang tepat maka akan dapat menyebabkan terjadinya oksidasi internal sehingga efektifitas dari lapisan pelindung yang terbentuk akan sangat berkurang (Dupont, 1996).

Pada aplikasi di temperatur tinggi, molibdenum dan logam dengan titik leleh tinggi seperti tungsten, columbium, dan tantalum



harus digunakan untuk mendapatkan kekuatan material yang cukup dan ketahanan korosi tetap menjadi faktor yang dikontrol. Hal ini dikarenakan Mo dan W akan membentuk oksida yang tidak stabil MoO_3 , dan WO_3 , sedangkan Cb dan Ta akan membentuk lapisan tidak protektif Cb_2O_5 dan Ta_2O_5 , dan logam jenis tersebut harus dilapisi sebelum digunakan pada lingkungan yang mengoksidasi. Disisi lain, material nonlogam seperti borida, karbida, dan nitride memiliki ketahan oksidasi yang cukup baik karena memiliki ikatan atom yang sangat kuat sehingga memiliki titik leleh yang tinggi. Borida, karbida, dan oksida utamanya digunakan untuk aplikasi pada temperatur tinggi. Namun keterbatasan penggunaan dari material non-logam dikarenakan memiliki keuletan dan ketahanan akan *thermal shock* yang rendah, dan tidak dapat dilakukan penyambungan (Fontana, 1987).

Secara umum, untuk menghasilkan lapisan yang protektif pada temperatur tinggi harus mempertimbangkan faktor secara termodinamika dan kinetika oksidasi, yang kemudian dapat dilakukan melalui tiga metoda, yaitu :

- 1) Mengontrol kondisi lingkungan
- 2) Menambahkan unsur paduan yang lebih mudah teroksidasi daripada logam dasar serta membentuk lapisan pelindung yang protektif.
- 3) Menggunakan beberapa metode pelapisan untuk menghasilkan lapisan protektif seperti *cementation*, *plasma spraying*, *ion bombardment*, dan lain-lain (Uhlig, 1948).

2.4. Pengendalian Korosi

Korosi merupakan peristiwa yang alami sehingga prosesnya tidak dapat dihilangkan sepenuhnya. Namun, bagaimanapun juga diperlukan usaha yang maksimal untuk menekan atau mengendalikan dari proses korosi tersebut (Ahmad, 2006). Hal ini dikarenakan bahaya korosi yang sangat besar serta dibutuhkan biaya yang tinggi untuk memperbaiki yang terkena serangan korosi. Penanggulangan korosi mempunyai beberapa



aspek penting yang harus diperhatikan yakni, aspek ekonomi serta teknologi. Aspek Ekonomi sangatlah krusial sehingga diperlukan perhitungan yang matang mengenai keuntungan serta kerugiannya.

Pada dasarnya pengendalian korosi dapat dilakukan melalui beberapa metode dasar yaitu pemilihan jenis material yang sesuai, mengubah kondisi lingkungan, pembuatan desain yang sesuai, proteksi elektrokimia (proteksi anodik dan katodik), dan metode pelapisan (Bardal, 2003). Selanjutnya pemilihan untuk menggunakan metode proteksi korosi biasanya berdasarkan kemampuan ekonomis, namun pada beberapa kasus, faktor desain, lingkungan dan keamanan harus menjadi prioritas.

2.4.1 Metode pelapisan logam (*metallic coating*)

Metode pengendalian korosi dengan mengaplikasikan lapisan logam akan meningkatkan ketahanan korosi dari logam yang berperan sebagai lapisan pelindung begitupula lapisan korban. Penggunaan lapisan logam memiliki sifat tahan lama, umumnya dapat diaplikasikan dengan mudah, namun rentan akan terjadi porositas yang dapat mempercepat korosi pada logam atau material substrat (Craig et al, 2006). Dalam aplikasi untuk melapisi baja, terdapat banyak alternatif logam yang dapat digunakan sebagai bahan pelapis, seperti Ag, Ni, Cr, Pb, Zn, dan Cd.

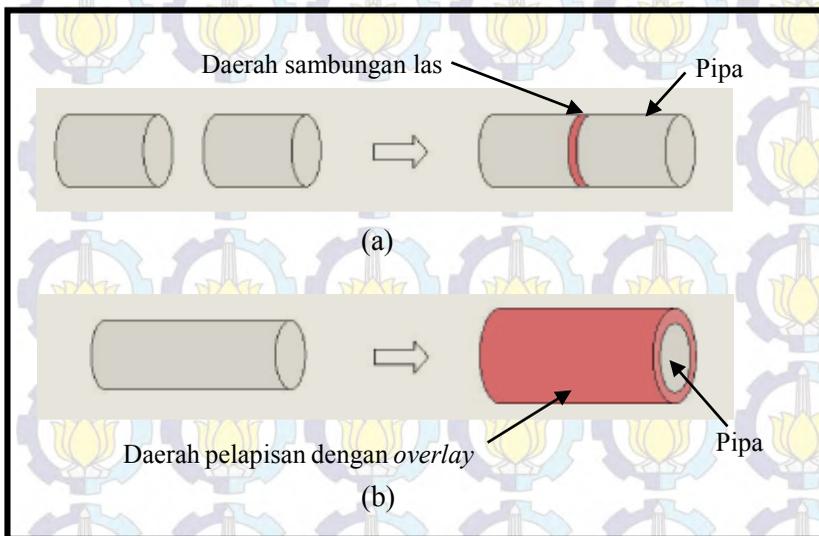
Dalam penelitian ini, material lapisan yang digunakan adalah paduan berbasis nickel. Nickel seringkali digunakan sebagai lapisan untuk menghambat korosi dan menghasilkan permukaan yang baik ketika kontak dengan udara bebas. Untuk dapat meningkatkan ketahanan korosi dengan lebih baik, nickel tidak diaplikasikan sebagai lapisan logam murni namun dipadukan dengan unsur lain seperti Cr, Mo, dan Nb (Bardal, 2006).

Metode pelapisan logam juga dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya seperti *electroplating*, *hot dipping*, *thermal spraying*, *cladding*, *spot welding*, *overlay welding* *chemical deposition*, dan *laser treatment*. Namun dalam penelitian ini, metode pelapisan logam yang digunakan adalah *overlay welding*.



2.4.2. Pelapisan Weld-Overlay (*Weld-Overlay Coatings*)

Weld-overlay coatings adalah salah satu bentuk pengelasan dimana dilakukan dengan memberikan lapisan untuk tujuan meningkatkan ketahanan korosi, aus, dan erosi. Pelapisan *weld-overlay*, seringkali disebut juga sebagai *hardfacing*, yang memberikan keuntungan tersendiri bila dibandingkan dengan metode pelapisan yang lain dimana proses ini akan menghasilkan ikatan metalurgis antara bagian pelapis dengan substrat yang tidak rentan untuk mengalami pengelupasan dan dapat diaplikasikan dengan mudah terbebas dari porositas dan cacat yang lainnya. Deposit dari proses pengelasan pada permukaan paduan dapat diaplikasikan dengan ketebalan lebih besar dari teknik yang lainnya, dengan rentang antara 3 sampai 10 mm. (Davis, 2001).



Gambar 2.8. Perbedaan penggunaan fungsi (a) pengelasan untuk penyambungan dan (b) pengelasan untuk pelapisan (*weld overlay cladding*).



Mayoritas proses pengelasan yang digunakan untuk aplikasi pelapisan permukaan dan pemberian deposit di permukaan dapat dengan mudah di jalankan, selain itu juga bertujuan untuk perbaikan komponen. *Weld overlays* dinilai memiliki banyak kegunaan karena secara komersial dapat mencakup banyak paduan yang dapat dipilih untuk menghasilkan proteksi dari berbagai kondisi lingkungan.

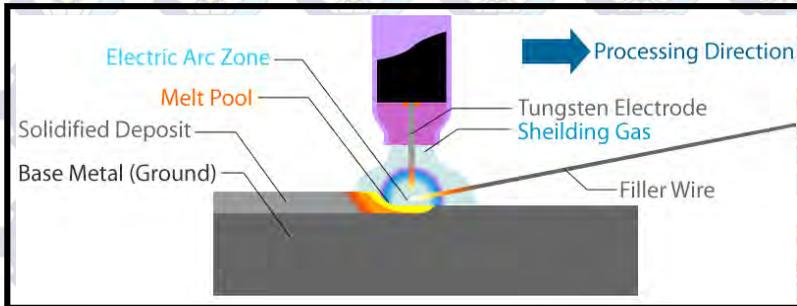
Selama proses pelapisan dengan metode *weld-overlay*, material pelapis akan dipanaskan hingga titik leleh dan kemudian membeku di permukaan substrat, hal ini berarti bahwa logam dan paduan yang digunakan untuk tujuan ini harus memiliki temperatur leleh sama atau lebih kecil dari material substratnya. Efektivitas dari pelapisan dengan metode *weld-overlay* ditentukan oleh proses pengelasan dan komposisi dari paduan lapisan. Proses pengelasan harus dipilih dan dioptimalkan untuk menghasilkan lapisan protektif pada laju deposisi dan efisiensi termal yang tinggi, disertai pengaturan yang baik pada daerah dilusi *overlay*/substrat dan ketebalan lapisan. Komposisi paduan *overlay* harus dipilih dengan baik untuk menghasilkan sifat yang dibutuhkan untuk mencegah degradasi karena korosi, dan komposisi paduan harus mudah untuk dilakukan proses pengelasan. Adapun ilustrasi aplikasi *weld-overlay* pada pipa dapat dilihat di gambar 2.7.

Beberapa proses pengelasan memungkinkan untuk diaplikasikan yang menghasilkan lapisan protektif dengan metode *weld overlay*, dan banyak parameter pengelasan yang harus ditinjau untuk mengoptimalkan proses pelapisan. Proses pengelasan tersebut dapat digolongkan sebagai proses api, busur listrik, dan teknik sorotan energy tinggi. Adapun parameter pengelasan yang mempengaruhi proses aplikasi lapisan ditunjukkan di tabel 2.2.



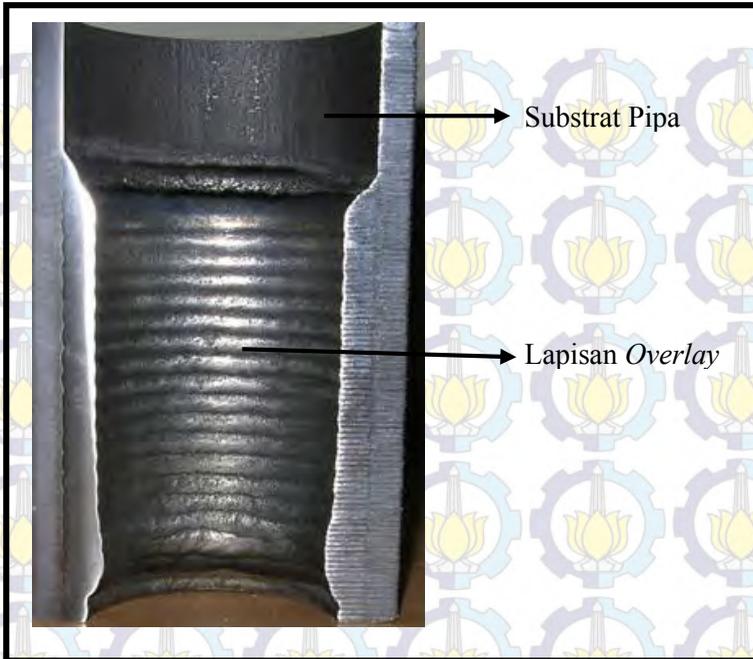
Tabel II.2. Parameter pengelasan yang mempengaruhi *weld overlay* (Davis, 2001).

Proses secara keseluruhan	Proses terkonsumsi	
Potensial yang melintasi busur	Laju konsumsi <i>filler metal</i>	
Arus yang melalui busur	Diameter elektroda	
Polarisasi arus	<i>Electrode extension</i>	
Current pulsing parameters		
Kecepatan aplikasi dari pemanasan	Proses tidak terkonsumsi	
Tipe gas pelindung (kecuali SAW)	Sudut elektroda GTAW	
	Laju alir gas plasma PAW	



Gambar 2.9. Skema pengelasan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) untuk aplikasi *weld overlay cladding*

Ketahanan korosi dari lapisan *weld-overlay* mengikuti sifat ketahanan korosi dari material tersebut dan juga bergantung pada kondisi lingkungan korosifnya. Lapisan *weld-overlay* meningkatkan ketahanan dari oksidasi dan sulfidasi. Dalam metode pelapisan *weld-overlay* seperti pada stainless steel austenitic, pengurangan komposisi kromium atau peningkatan komposisi karbon melalui perpindahan karbon dari substrat ke lapisan pelindung dapat mempengaruhi ketahanan korosi, proses disebut sebagai proses dilusi (Davis, 2001).



Gambar 2.10. Penampang melintang pipa yang telah diberikan aplikasi *weld overlay cladding*

2.5. Material untuk Aplikasi Temperatur Tinggi

Pada kondisi aplikasi temperatur tinggi dan lingkungan yang mengoksidasi, baik kekuatan mekanik dan ketahanan oksidasi harus menjadi pertimbangan utama. Terdapat beberapa sifat mekanik dari suatu logam dan paduannya yang penting sebagai pertimbangan dalam aplikasinya, seperti kekuatan Tarik, kekuatan mulur, keuletan, dan ketangguhan. Pada penggunaan di temperatur tinggi, beberapa parameter mekanik juga menjadi pertimbangan tersendiri. Salah satunya adalah *creep*, atau deformasi plastis kontinyu dari sebuah logam yang diberikan beban seiring dengan meningkatnya temperatur.



2.5.1. Nikel dan Paduan Nikel

Paduan dengan unsur dasar nikel memiliki rentang penggunaan yang lebih luas bila dibandingkan dengan paduan yang lain. Paduan ini digunakan sebagai paduan tahan korosi, elemen pemanas, paduan tahan mulur pada turbin dan mesin jet, serta paduan tahan temperatur tinggi dan korosi.

Baja tahan karat austenitic diciptakan dan digunakan sejak tahun 1900, dimana penemuan paduan dengan dasar nikel dimulai sekitar tahun 1930. Awalnya, beberapa paduan diproduksi hanya dalam produk cor dan kemudian produk hasil penempaan mulai diproduksi. Sejak saat itu mulai banyak diciptakan dan pengembangan kemampuan paduan berunsur dasar nikel. Banyak diantaranya menemukan penggunaan utamanya sesuai dalam aplikasi pada temperatur tinggi di turbin gas dan *furnace*, namun beberapa menggunakan pada bidang industry kimia dalam aplikasi lingkungan korosif.

Dalam sistem elektrokimia, nikel lebih stabil bila dibandingkan dengan besi namun lebih aktif daripada tembaga. Lingkungan yang mereduksi, seperti larutan asam sulfat, menunjukkan nikel lebih tahan terhadap korosi bila dibandingkan dengan besi namun tidak lebih tahan daripada tembaga atau paduan nikel-tembaga. Paduan nikel-molibdenum lebih tahan terhadap lingkungan yang mereduksi daripada nikel atau paduan nikel-tembaga.

Meskipun nikel dapat membentuk lapisan pasif pada beberapa lingkungan, namun lapisan ini bukanlah lapisan yang stabil, karena itu nikel secara umum nikel tidak dapat digunakan pada media yang menyebabkan oksidasi, seperti asam nitrat. Ketika dipadukan dengan kromium, maka kemampuan untuk membentuk lapisan pasif meningkat, menghasilkan ketahanan korosi yang tinggi pada beberapa lingkungan yang mengoksidasi (Schweitzer, 2000).



2.5.2. Inconel 625

Inconel adalah logam paduan super yang termasuk dalam golongan *austenitic nickel-chromium*. Nama tersebut adalah nama dagang dari perusahaan *Special Metals*

Paduan inconel adalah paduan yang tahan terhadap korosi dan oksidasi yang sesuai untuk digunakan pada lingkungan yang ekstrim dengan tekanan dan panas tinggi. Ketika dipanaskan, inconel akan membentuk lapisan oksida pasif yang tebal dan stabil melindungi permukaan dari serangan yang berlanjut. Inconel memiliki kekuatan yang stabil pada rentang temperatur yang luas, sehingga sesuai untuk digunakan pada temperatur tinggi dimana aluminium dan baja tidak tahan pada kondisi tersebut.

Paduan inconel seringkali disebut hanya dengan kata “inco”. Nama lain yang merujuk pada paduan inconel 625 diantaranya: Chronin 625, Altemp 625, Haynes 625, Nickelvac 625, dan Nicrofer 6020. Jenis paduan super inconel pertama kali ditemukan pada tahun 1940 melalui tim peneliti *Wiggin Alloys* sebagai penunjang dari pengembangan mesin jet.

Inconel seringkali dihubungkan dengan aplikasi pada lingkungan ekstrim. Paduan ini umumnya digunakan pada sudu-sudu turbin gas, *seals*, ruang pembakaran, pengolahan kimia dan bejana bertekanan (*pressure vessel*), pipa *heat exchanger*, generator uap, proses pengolahan gas alam dengan aliran yang mengandung unsur H_2S dan CO_2 . Paduan ini juga digunakan pada sistem turbo generasi ketiga Mazda RX7 dimana temperatur kerjanya dapat mencapai $1000\text{ }^{\circ}C$. Inconel juga banyak digunakan pada bagian boiler dan wellhead.

Inconel 625 adalah salah satu paduan super dengan unsur dasar nikel (Ni) dan unsur-unsur yang dominan adalah kromium (Cr) dan molybdenum (Mo). Sehingga sering disebut paduan Ni-Cr-Mo.

Pengaruh unsur-unsur pada Inconel 625 adalah sebagai berikut ini:



i. Nikel (Ni)

Nikel berfungsi sebagai matriks yang dapat melarutkan paduan yang lain. Meningkatkan ketahanan terhadap panas dengan membentuk fasa intermetalik. Meningkatkan ketahanan korosi pada lingkungan yang tidak mengoksidasi walaupun memiliki kandungan besi yang tinggi. Tahan terhadap alkalis. Tahan terhadap *stress corrosion cracking* walupun kandungan klorin meningkat. Meningkatkan ketahanan terhadap karburasi, nitridasi dan klorinasi. Ketahanan terhadap sulfidasi rendah. Meningkatkan sifat mekanik pada temperatur tinggi.

ii. Karbon (C)

Karbon berfungsi meningkatkan kekuatan pada temperatur rendah dan meningkatkan terbentuknya karbida yang berbahaya pada batas butir. Memiliki ketahanan terhadap oksidasi rendah.

iii. Mangan (Mn)

Mangan biasa ditambahkan sebagai deoksidiser selama proses *melting*. Namun penambahan Mn pada paduan Ni tidak menunjukkan adanya pengaruh terhadap sifat korosi. Kandungan Mn yang tinggi dapat mengganggu kestabilan struktur metalurgi dengan membentuk presipitasi intermetalik. Mn memiliki pengaruh khusus pada temperatur tinggi dan *creep* (mulur). Ketahanan terhadap oksidasi rendah. Meningkatkan kelarutan nitrogen.

iv. Fosfor (P)

Fosfor menurunkan ketahanan korosi karena mampu menuju batas butir/segregasi yang dapat menginisiasi adanya penggetasan oleh hidrogen.

v. Sulfur (S)

Sulfur dapat menurunkan ketahanan korosi. Namun S sering ditambahkan untuk meningkatkan kemampuan permesinan.



vi. Silikon (Si)

Silikon mampu meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dengan tingkat oksidasi yang tinggi, lingkungan non-halida yang mengandung asam sulfat dan asam nitrat. Kadang-kadang Si ditambahkan untuk menyebabkan pengerasan karena presipitasi dengan membentuk Ni_3Si . Dapat menurunkan kestabilan metalurgi. Meningkatkan aktifitas karbon yang dapat membentuk karbida. Meningkatkan tendensi terbentuknya fasa sigma jika terdapat Cr dan Mo. Meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi, nitridasi, sulfidasi dan karburasi. Tidak tahan terhadap klorinasi.

vii. Kromium (Cr)

Krom berfungsi meningkatkan ketahanan pada lingkungan yang mengoksidasi. Meningkatkan kelarutan nitrogen (N) dan karbon. Meningkatkan kerentanan terhadap presipitasi fasa sigma. Berkombinasi dengan molybdenum (Mo), tungsten (W) dan Nitrogen dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi lokal. Bersama Mo meningkatkan ketahanan oksidasi pada lingkungan halida. Mampu meningkatkan kekuatan karena *solid-solution*. Meningkatkan tendensi terbentuknya fasa intermetalik. Meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi. Tidak tahan terhadap nitridasi dan flourinasi. Tahan terhadap sulfidasi. Meningkatkan ketahanan terhadap karburasi.

viii. Molybdenum (Mo)

Mo meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan yang tidak mengoksidasi seperti HCl dan H_2SO_4 . Bersama Cr meningkatkan ketahanan oksidasi pada lingkungan halida. Meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi dan kekuatan *creep* (mulur).

ix. Besi (Fe)

Secara umum, penambahan besi pada paduan dasar nikel adalah untuk mengurangi biaya dan meningkatkan



pemanfaatan *scrap*, meningkatkan tendensi terbentuknya fasa intermetalik seperti fasa sigma, jika kandungan kromium, molybdenum dan tungsten tinggi maka besi yang ditambahkan harus sedikit untuk menjaga kestabilan metalurgi (Uhlig, 2011).

Lapisan *overlay weld* dalam penelitian ini menggunakan filler metal Inconel 625. Adapun komposisi kimia dari Inconel 625 ditunjukkan pada tabel II.3

Tabel II.3 Komposisi kimia paduan Inconel 625 dalam bentuk hasil penempaan (*wrought*) dan filler metal

	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	Al	C	S	Si
<i>Wrought</i> Inconel 625	55,08	20,97	8,30	4, 50	2,80	0,44	0,15	0,02	0,31
Filler metal 625	64,50 (bal.)	22,19 (20-23 max)	8,67	0, 38	3,61	0,09	0,008	0,001	0,07

2.6. Pipa API 5L grade X52

Dalam penelitian ini, material pipa yang digunakan adalah baja karbon rendah API 5 L X52. Pipa API 5 L banyak digunakan dalam industri minyak dan gas baik onshore maupun offshore. Maksud dari API 5 L X52 adalah

API : *American Petroleum Institute*

5 : Seri yang digunakan untuk *Tubular Goods*
(*ex: Casing, Tubing, Pipeline*)

L : Line Pipe

X52 : Salah satu grade yang berhubungan dengan sifat mekanik material dan komposisi kimianya



Baja API 5 L X52 memiliki spesifikasi seperti ditunjukkan pada tabel II.4.

Tabel II.4 Material dan Spesifikasi Pipa API 5 L (API Specification for Line Pipe Book, tabel 5 and 7)

Standard Specification	Chemical Composition (%)						Mechanical Strength	
	Grade	Application	C	Mn	P	S	Yield Strength (N/mm ²)	Ultimate Tensile Strength (N/mm ²)
			max	max	max	max		
API 5L	A25	Oil & Gas Line Pipe	0.21	0.6	0.03	0.03	175	310
	A25		0.22	0.9	0.03	0.03	210	335
	B		0.26	1.2	0.03	0.03	245	415
	X42		0.26	1.3	0.03	0.03	290	515
	X46		0.26	1.4	0.03	0.03	320	435
	X52		0.26	1.4	0.03	0.03	360	460
	X56		0.26	1.4	0.03	0.03	390	490
	X60		0.26	1.4	0.03	0.03	415	520
	X65		0.26	1.45	0.03	0.03	450	535
	X70		0.26	1.65	0.03	0.03	485	530

2.7. Penelitian sebelumnya tentang oksidasi temperature tinggi pada paduan berbasis Nickel

2.7.1 Oksidasi paduan Inconel 690

(Allen et al, 1987) melakukan percobaan untuk menganalisa perilaku oksidasi dari paduan Inconel 690 di lingkungan udara dengan temperatur oksidasi 600 K. Fokus penelitian adalah untuk menganalisa pembentukan lapisan oksida serta mengidentifikasi komposisi kimia pada lapisan oksida yang terbentuk.

Penelitian ini dilakukan dengan memanaskan spesimen dalam *tube furnace* dan ditahan pada temperatur 600 ± 5 K dan lingkungan udara selama 60, 120, 240, 960, 2700, 3600, dan 28800 detik. Kemudian setelah dipanaskan spesimen dianalisis untuk mengetahui komposisi dari lapisan oksida yang terbentuk menggunakan *scanning Auger microscopy (SAM)*, *scanning electron microscopy with electron dispersive analysis of X-rays*



(SEM/EDAX), secondary ion mass spectrometry (SIMS) dan X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

Hasil analisa menunjukkan bahwa pembentukan lapisan α - Cr_2O_3 pada temperatur kamar. Oksidasi pada temperatur 600 K menghasilkan pembentukan lapisan oksida duplex Fe_2O_3 dengan layer luar yang tipis. Selain itu juga terbentuk lapisan oksida Cr, Fe, dan Ni. Ketika oksidasi selama 28800 detik terbentuk lapisan oksida setebal 10 nm.

2.7.2 Korosi temperatur tinggi pada komponen boiler

(Adamiec, 2009) melakukan penelitian untuk menganalisa ketahanan korosi temperatur tinggi pada komponen boiler yang dilapisi oleh paduan nickel 625 dan 686 dengan metode *overlay weld*. Fokus penelitian ini adalah untuk melihat kemungkinan terjadinya korosi temperatur tinggi pada komponen boiler.

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan pelapisan komponen boiler oleh material Inconel 625 dan 686 dengan cara pengelasan. Kemudian spesimen diuji ketahanan temperatur tinggi pada lingkungan yang terdiri dari $\text{N}_2 + 9\% \text{O}_2 + 0,08\% \text{SO}_2 + 0,15\% \text{HCl}$ selama 750 jam. Setelah dilakukan pemanasan, spesimen dianalisa menggunakan *scanning electron microscopy with electron dispersive analysis of X-rays (SEM/EDAX)* untuk melihat morfologi permukaan dan komposisi yang terkandung pada lapisan oksida. Selain itu juga dilakukan analisa *X-ray diffractometer (XRD)* untuk mengetahui fase dan senyawa yang terbentuk setelah pemanasan.

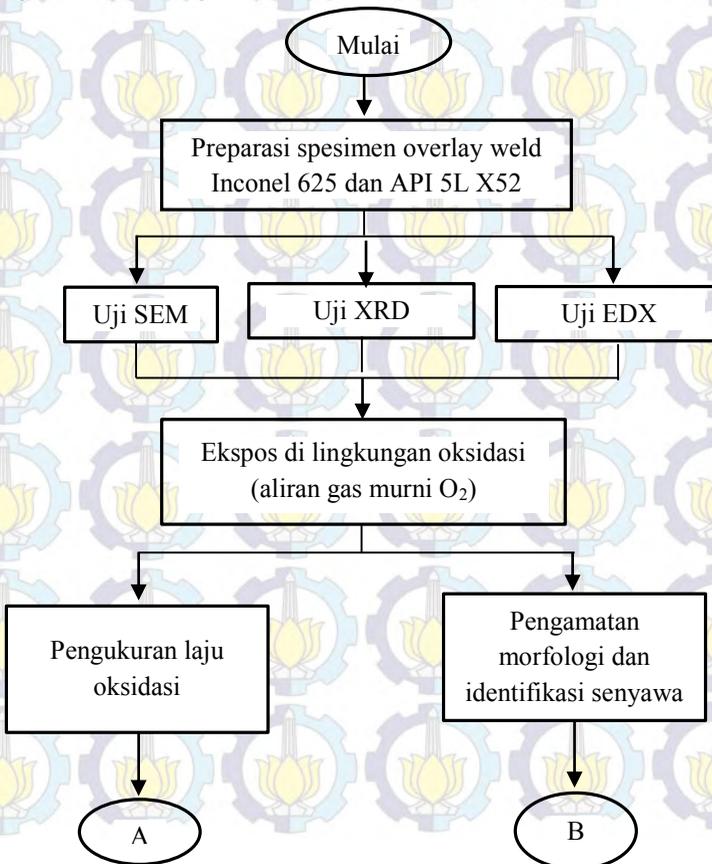
Hasil analisa menunjukkan bahwa lapisan *overlay* nickel memiliki ketahanan korosi yang tinggi yang ditunjukkan melalui laju korosi yang terukur setelah pemanasan yaitu $0,0033 \text{ (mg/cm}^2\text{)/jam}$. Pemanasan pada temperatur tinggi juga akan mengakibatkan terbentuknya lapisan oksida Cr_2O_3 setebal $5\text{-}10 \mu\text{m}$ yang berperan sebagai lapisan pasif dan mengurangi laju korosi.

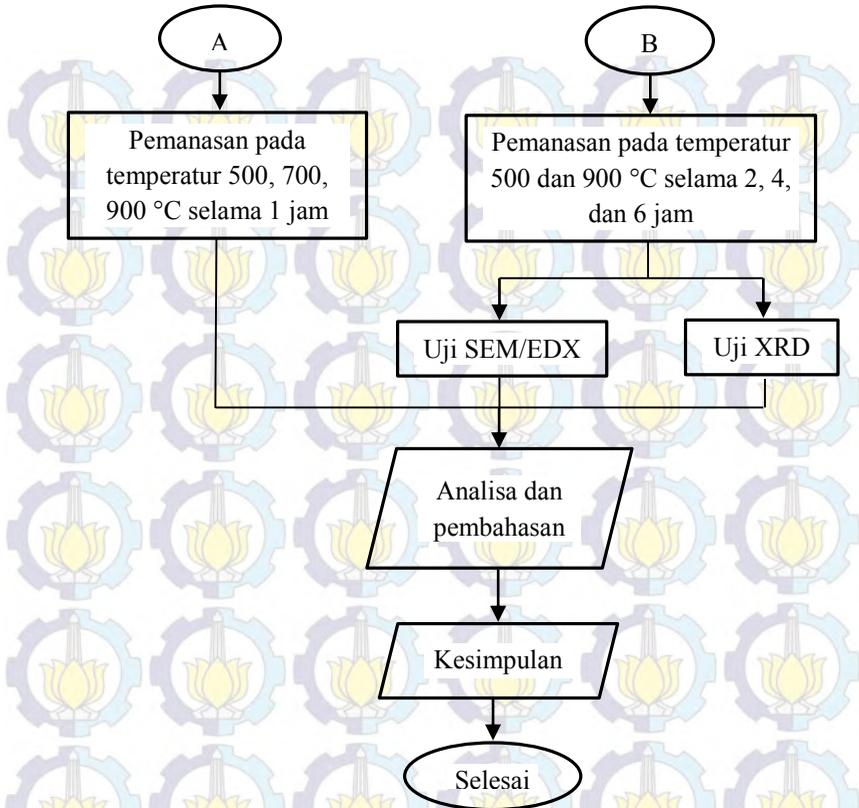


BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan alur penelitian yang digambarkan seperti Gambar 3.1 di bawah. Pembuatan diagram alir penelitian bertujuan agar mempermudah pemahaman mengenai langkah-langkah penelitian yang dilakukan, karena digambarkan dengan sistematis.





Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

3.2.1 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. *Wire Cut EDM Machine*

Mesin *wire cut* disini digunakan untuk memotong material baja API 5L X52 yang telah dilapisi dengan Inconel 625 agar sesuai dengan dimensi yang diinginkan yang kemudian digunakan untuk pengujian pengukuran

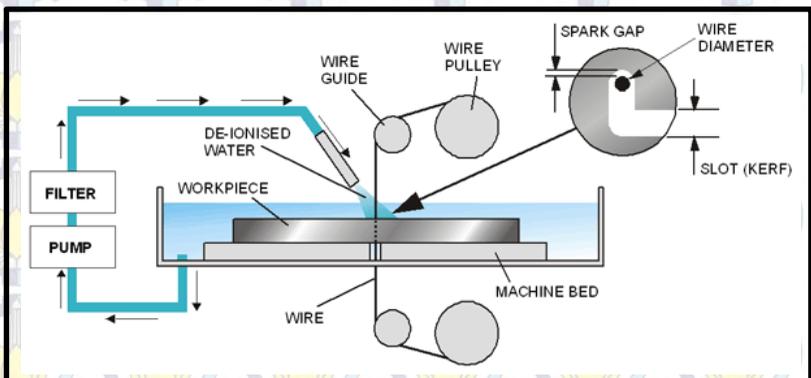


laju oksidasi dan pengamatan karakteristik permukaan sampel melalui pemanasan dalam *tube furnace*.

Preparasi menggunakan mesin *wire cut* ini dilakukan di PT Surya Gemilang Buana Cibodas, Tangerang.



Gambar 3.2 mesin *Wire Cut EDM*.



Gambar 3.3 Skema kerja mesin *Wire Cut EDM*



2. *Combustion Boat*

Combustion boat adalah cawan keramik memanjang menyerupai bentuk kapal dan digunakan sebagai tempat untuk menempatkan material yang akan diuji pada pemanasan di *tube furnace*.



Gambar 3.4. *Combustion Boat*

3. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan dalam preparasi sampel untuk mengukur dimensi sampel sebelum dilakukan pemotongan untuk keperluan pengujian.

4. *Stopwatch*

Digunakan sebagai *timer* baik saat ekstraksi ataupun saat dilakukan pemanasan terhadap sampel.

5. Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk mengukur massa sampel saat pemanasan.



6. Mesin *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray* (EDX)

Mesin SEM ini digunakan untuk melakukan pengamatan morfologi dari sampel yang dilengkapi dengan EDX untuk analisa komposisi kimia. Pada penelitian ini menggunakan dua mesin SEM yaitu mesin SEM yang dilengkapi EDX di Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro Semarang dan mesin SEM tanpa EDX di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.



Gambar 3.5. Mesin SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray*)

6. Mesin XRD (*X-ray diffractometry*)
Mesin pengujian XRD PW 3040/60 X'Pert PRO Instrumen Enclosure, digunakan untuk mengidentifikasi senyawa (Frilla dkk., 2008). Pada penelitian ini menggunakan mesin XRD di Laboratorium Karakterisasi Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.



Gambar 3.6. Mesin XRD (*X-Ray Diffractometry*)

7. Mesin *Tube Furnace*

Tube furnace adalah tungku pemanasan elektrik dengan bentuk horizontal dimana ruang pemanasan terbuat dari dinding keramik yang memungkinkan adanya pemanasan disertai dengan aliran gas.



Gambar 3.7. Mesin *tube furnace*



3.2.2 Bahan Penelitian

Selain peralatan, dalam penelitian ini juga dibutuhkan beberapa bahan antara lain :

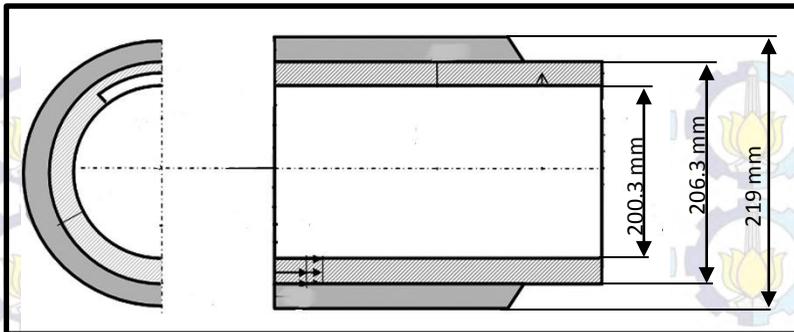
1. Material pada pipeline

Pada penelitian ini menggunakan material pipeline yang terbuat dari pipa baja API 5L X52 yang telah diberikan lapisan filler metal Inconel 625 dengan metode *weld overlay cladding*. Material logam dasar yaitu pipa baja karbon memiliki spesifikasi yang mengacu pada standar *API (American Petroleum Institute) 5L: Specification for line pipe* yang ditunjukkan pada tabel II.3, sedangkan filler metal Inconel 625 yang digunakan sebagai pelapis baja memiliki spesifikasi yang mengacu pada standar *AWS (American Welding Society) A5,14-89: Specification for Nickel and Nickel Alloy Bare Welding Electrodes and Rods* dan *ASTM B0444-03* yang ditunjukkan pada tabel III.1.

Tabel III.1. Komposisi filler metal inconel 625 dibandingkan dengan standar.

	C	Cr	Fe	Ni	Mo	Nb	Cu	Al	Si
<i>Product spec.</i>	0,017	21,86	0,22	64,76	8,96	3,645	0,012	0,086	0,042
<i>AWS A5,14-89</i>	0,1	20-23	5,0	58 min	8-10	3,15-4,15	0,5	0,4	0,5
<i>ASTM B0444-03</i>	0,1	20-23	5,0	58 min	8-10	3,15-4,15	0,5	0,4	0,5

Pelapisan baja API 5L grade X52 dengan Inconel 625 melalui metode *weld overlay* mengacu pada WPS (*Welding Procedure and Specification*) yang dibuat dan dikerjakan oleh PT. Rekayasa Industri dapat dilihat pada Lampiran B dan desain *overlay* pada gambar 3.9.



Gambar 3.8. Desain *overlay* pipa API 5L X52 dengan Inconel 625

2 Gas Oksigen (O_2)

Gas Oksigen di sini digunakan sebagai elemen pengoksidasi pada proses pengujian oksidasi pada temperatur tinggi. Gas oksigen yang digunakan diperoleh dari PT. Karina Gas Surabaya.

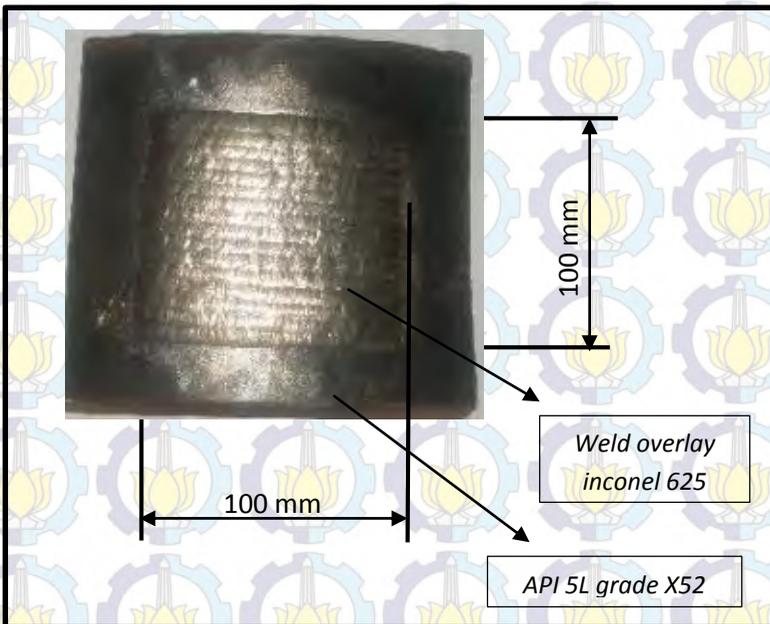
3.3 Pelaksanaan Penelitian

Pada penelitian kali ini dilakukan tiga tahapan utama yaitu, preparasi sampel, pengujian perilaku oksidasi dan karakterisasi pembentukan lapisan oksida. Pengujian perilaku oksidasi dilakukan melalui pemanasan dalam *tube furnace* yang dialiri gas O_2 pada temperatur 500 °C, 700 °C, dan 900 °C selama 1 jam untuk memperoleh data perubahan massa terhadap fungsi waktu untuk mengukur laju oksidasi material. Selain itu, pengujian perilaku oksidasi juga dilakukan dengan mengekspos sampel pada temperatur 500 °C dan 900 °C di aliran gas O_2 selama 2, 4 dan 6 jam yang kemudian diikuti pengujian SEM-EDX dan XRD untuk mengetahui karakteristik morfologi dan identifikasi senyawa pada permukaan sampel.



3.3.1 Preparasi Sampel

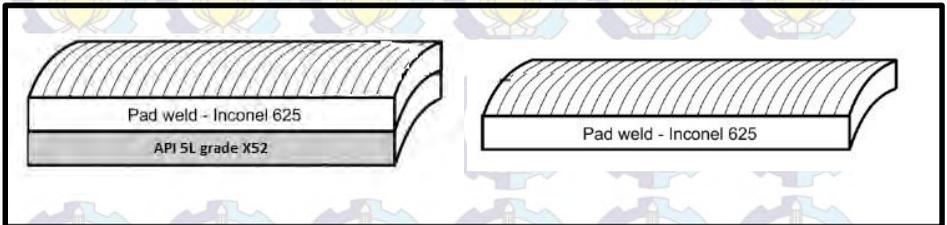
Dalam penelitian ini, terlebih dahulu dilakukan preparasi sampel. Preparasi sampel ini penting untuk dilakukan, karena dapat mempengaruhi hasil pengujian dan dapat mempengaruhi hasil dari analisa dan pembahasan yang kita lakukan. Penelitian ini menggunakan material pipa baja API 5L grade X52 yang telah diberikan lapisan paduan super Inconel 625 melalui metode *weld overlay cladding*. Preparasi sampel yang dilakukan disesuaikan dengan pengujian selanjutnya yaitu pemanasan pada *tube furnace* untuk pengukuran laju oksidasi dan pengamatan karakteristik permukaan sampel. Adapun bentuk awal hasil pengelasan *overlay* inconel 625 pada baja API 5L grade X52 ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3.9. Sampel awal baja API 5L grade X52 yang dioverlay inconel 625

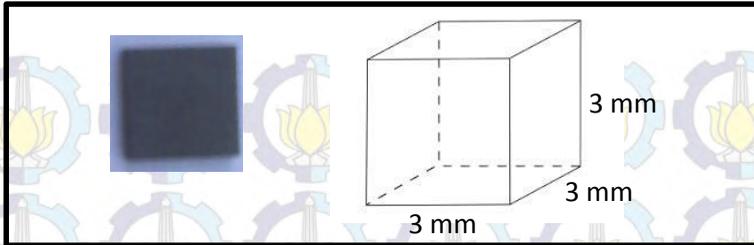


1. Pemotongan sampel awal dengan dimensi 100 mm x 100 mm menggunakan mesin potong *wire cut*.
2. Pemotongan secara horizontal pada batas antara lapisan iniconel 625 dengan logam induk baja API 5L grade X52, sehingga didapatkan dua bagian material berbeda yaitu API 5L grade X52 dan lapisan *overlay* iniconel 625, seperti ditunjukkan pada desain gambar 3.11.



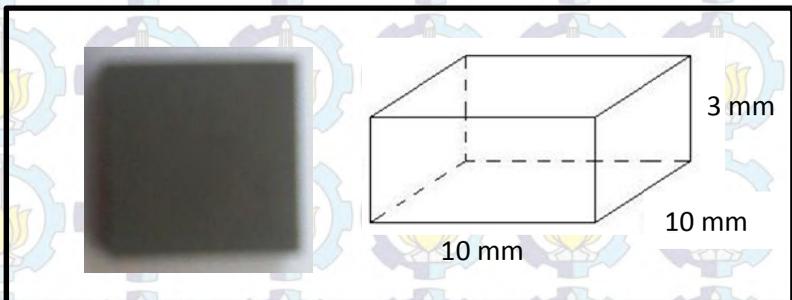
Gambar 3.10. Desain pemotongan secara horizontal untuk memisahkan bagian *weld overlay* iniconel 625 dengan API 5L grade X52.

3. Preparasi sampel untuk pengukuran laju oksidasi dilakukan dengan pemotongan sampel dengan dimensi 3 mm x 3 mm sebanyak 3 buah mewakili parameter pemanasan pada 500 °C, 700 °C, dan 900 °C baik untuk baja API 5L grade X52 maupun *weld overlay* iniconel 625, sehingga dihasilkan sampel untuk pengujian pengukuran laju oksidasi seperti ditunjukkan pada gambar 3.12.



Gambar 3.11. Sampel dan bentuk tiga dimensi baja API 5L grade X52 dan *weld overlay* inconel 625 untuk pengujian analisa termal.

4. Preparasi sampel untuk pengamatan karakteristik permukaan sampel dilakukan dengan pemotongan sampel dengan dimensi 10 mm x 10 mm sebanyak 6 buah mewakili parameter waktu pemanasan selama 2, 4, dan 6 jam pada temperatur 500 °C dan 900 °C untuk baja API 5L grade X52 maupun *weld overlay* inconel 625, sehingga dihasilkan sampel untuk pengamatan karakteristik permukaan sampel seperti ditunjukkan pada gambar 3.13.



Gambar 3.12. Sampel dan bentuk tiga dimensi baja API 5L grade X52 dan *weld overlay* inconel 625 untuk pengamatan morfologi dan identifikasi senyawa



5. Pencucian (*cleaning*) sampel baja API 5L grade X52 dan *weld overlay* inconel 625 baik untuk pengujian pengukuran laju oksidasi maupun pengamatan karakteristik permukaan sampel. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan produk-produk oksidasi yang terbentuk akibat proses preparasi sebelumnya. Proses pencucian ini dilakukan dengan merendam sampel dalam larutan HCl 5M selama ± 20 menit, lalu kemudian dibilas dengan air mengalir. Adapun proses perendaman sampel dalam HCl 5M ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3.13. Proses perendaman sampel dalam HCl 5M selama ± 20 menit.

3.3.2. Pengujian perilaku oksidasi

Setelah proses preparasi sampel maka selanjutnya dilakukan pengujian perilaku oksidasi yang dapat diketahui dengan melakukan pemanasan dalam *tube furnace* yang dialiri gas O_2 untuk mengetahui laju oksidasi dan karakteristik morfologi serta senyawa dalam sampel.

Pengujian pengukuran laju oksidasi ini bertujuan untuk mengetahui stabilitas thermal dari spesimen dengan menganalisa perubahan massa sampel terhadap perubahan temperatur tinggi. Pemanasan dalam *tube furnace* bisa beroperasi dalam kondisi inert



dengan mengalirkan gas tertentu seperti nitrogen ataupun helium. Tetapi untuk mendapatkan data pengukuran laju oksidasi juga bisa beroperasi dalam atmosfer gas non-inert seperti udara dan oksigen yang memungkinkan terjadinya reaksi dengan sampel dengan adanya kenaikan temperatur. Sehingga disini Pemanasan dalam *tube furnace* juga bisa berfungsi sebagai reaktor untuk menganalisa massa bahan yang bereaksi dalam kondisi operasi tertentu Adapun langkah pengujian ini adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan *combustion boat* untuk pengujian pemanasan dalam *tube furnace*.
2. Melakukan pengukuran massa awal sampel sebelum dipanaskan (m_a)
3. Meletakkan spesimen yang telah dipreparasi untuk pengukuran laju oksidasi pada *combustion boat*.
4. Meletakkan *Combustion boat* ke dalam ruang pemanasan pada *tube furnace*.
5. Memprogram pemanasan dengan temperatur 500 °C dengan waktu penahanan selama 1 jam dan laju kenaikan pemanasan 10 °C/menit .
6. Melakukan pengukuran massa pada waktu ke-0 (m_0) kemudian memasukkan kembali dalam furnace dan mengalirkan gas Oksigen (O_2) dengan laju alir 60 ml/menit ketika temperatur telah mencapai 500 °C.
7. Melakukan pengukuran massa pada waktu ke-1 (m_1) saat pemanasan telah berlangsung selama 10 menit dan kemudian memasukkan kembali sampel ke dalam furnace dengan segera.
8. Mengulangi langkah 7 setiap 10 menit pemanasan untuk mendapatkan data m_2 hingga m_6 .
9. Melakukan pendinginan dalam furnace ketika telah selesai waktu pemanasan *isothermal* selama 1 jam.
10. Mengulangi langkah 1-9 untuk temperatur penahanan 700 dan 900 °C.



Pengujian perilaku oksidasi dengan tujuan untuk dapat mempelajari karakter lapisan oksida yang terjadi serta perubahan yang terjadi pada material awal juga dilakukan dengan pemanasan dalam *tube furnace* dalam aliran gas O₂. Adapun langkah pengujian ini adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan *combustion boat* untuk pengujian pemanasan dalam *tube furnace*.
2. Meletakkan spesimen yang telah dipreparasi untuk pengujian pemanasan dalam *tube furnace* dalam *combustion boat*.
3. Meletakkan *Combustion boat* ke dalam ruang pemanasan pada *tube furnace*.
4. Memprogram pemanasan dengan temperatur 500 °C dengan waktu penahanan selama 2 jam dan laju kenaikan pemanasan 10 °C/menit .
5. Mengalirkan gas Oksigen (O₂) dengan laju alir 60 ml/menit ketika temperatur telah mencapai 500 °C.
6. Melakukan pendinginan dalam furnace ketika telah selesai waktu pemanasan *isothermal* selama 2 jam.
7. Mengulangi langkah 1-7 untuk waktu penahanan selama 4 dan 6 jam.
8. Mengulangi langkah 1-8 untuk temperatur pemanasan 900 °C dengan waktu penahanan selama 2, 4, dan 6 jam.

3.3.3 Pengujian Karakterisasi Sampel

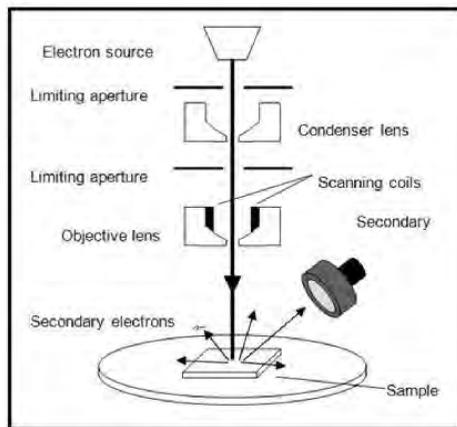
Setelah pengujian pemanasan pada lingkungan oksidasi dalam *tube furnace* selesai, sampel dilakukan pengujian karakterisasi dengan menggunakan instrument *Scanning Electron Microscopy (SEM)* dengan *Energy Dispersive X-ray (EDX)* serta *X-ray Diffractometry (XRD)* . Pengujian ini dilakukan untuk mempelajari morfologi, struktur mikro, dan fasa yang terbentuk pada sampel setelah perilaku oksidasi pada lingkungan oksidasi yang kemudian dapat kita gunakan sebagai bahan saat melakukan analisa.



3.3.3.1. Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Pengujian SEM ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui morfologi dari baja API 5L X52 dan lapisan *weld overlay* Inconel 625, sehingga dapat membedakan karakteristik lapisan oksida yang terjadi serta mengetahui distribusi unsur setelah perlakuan pemanasan di lingkungan oksidasi melalui metode EDX.

Prinsip kerja dari SEM adalah sebagai berikut, sebuah pistol elektron akan memproduksi sinar elektron, kemudian elektron tadi dipercepat oleh anoda, setelah itu lensa magnetik memfokuskan elektron menuju ke sampel, elektron telah fokus tadi memindai keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai, ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor (CRT).



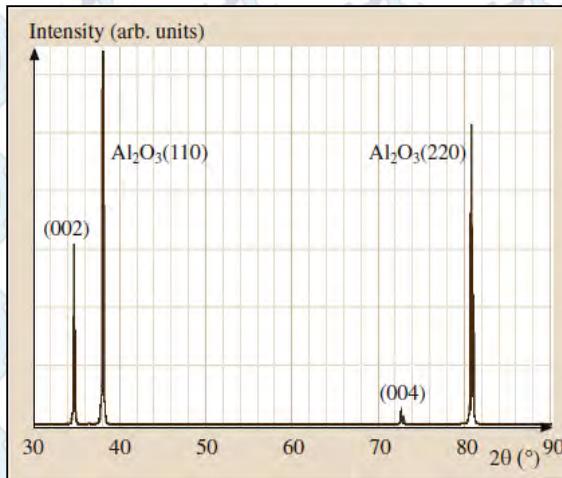
Gambar 3.14. Skema Mesin SEM
(<http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/postgraduate/regs/mpags/ex5/techniques/electronic/sem-copy/sem.jpg?maxWidth=435&maxHeight=400>)



3.3.3.2 Pengujian XRD (X-Ray Diffractometry)

Pengujian XRD dengan menggunakan alat XRD PW 3040/60 X'Pert PRO Instrumen Enclosure yang berada di Laboratorium Karakterisasi Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. XRD merupakan salah satu alat pengujian material yang biasanya digunakan untuk identifikasi unsur atau senyawa (analisis kualitatif) dan penentuan komposisi (analisis kuantitatif). Analisis yang dilakukan berhubungan dengan alat ukur yang lain misal SEM ataupun TEM. Pengamatan dengan mikroskop akan menjelaskan bagaimana distribusi fasa yang teridentifikasi berdasarkan hasil XRD. Sehingga untuk keperluan identifikasi material yang tidak diketahui, contohnya material baru hasil reaksi, maka cukup dilakukan dua pengujian tersebut.

Posisi puncak dalam pola difraksi sinar-X dapat digunakan untuk menentukan komposisi kimia dan fasa kristal nano partikel. Sebagai contoh Gambar 3.19 menunjukkan pola difraksi sinar-X dari *nanowires* ZnO.



Gambar 3.15 Contoh Pola Difraksi Sinar-X dari Nanowires ZnO Ditumbuhkan pada Substrat Batu Safir.



Tabel III.2 Informasi yang Terkandung dalam Karakter Tinggi, Posisi serta Lebar dan Bentuk Puncak Difraksi (Sujatmika H, dkk., 2011).

No	Karakter	Informasi dari material	Informasi dari instrument
1	Posisi puncak (2θ)	<ul style="list-style-type: none">• Fasa• kristal/identifikasi• Struktur kristal• Parameter kisi• Regangan seragam	<ul style="list-style-type: none">• Kesalahan 2θ• Ketidaktepatan penempatan sampel
2	Tinggi puncak (intensitas)	<ul style="list-style-type: none">• Identifikasi• Komposisi• Hamburan tak koheren• <i>Extinction</i>• <i>Preferred-orientation</i>	
3	Lebar dan bentuk puncak	<ul style="list-style-type: none">• Ukuran kristal (bukan partikel atau grain)• Distribusi ukuran	<ul style="list-style-type: none">• Duplet radiasi• Divergensi aksial• Kedataran• permukaan sampel

3.4. Rancangan Penelitian

Untuk memudahkan penelitian selama percobaan disusun rancangan percobaan yang dilakukan berupa tabel hasil pengujian analisa termal secara diskontinyu untuk mengukur laju oksidasi pada temperatur 500 °C, 700 °C, dan 900 °C selama 1 jam dan pemanasan dalam *Tube Furnace* pada temperatur 500 °C dan 900 °C selama 2, 4, dan 6 jam dalam aliran gas oksigen.



Tabel III.3 Rancangan percobaan pengujian analisa termal melalui pengukuran massa secara diskontinyu

Temperatur (°C)	Waktu (menit)	Perubahan massa (mg/cm ²)	Log waktu / log t	Log (mg/cm ²)
500	10		1,176	
	20		1,477	
	30		1,653	
	40		1,778	
	50		1,176	
	60		1,477	
700	10		1,653	
	20		1,778	
	30		1,176	
	40		1,477	
	50		1,653	
	60		1,778	
900	10		1,176	
	20		1,477	
	30		1,653	
	40		1,778	
	50		1,176	
	60		1,477	



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Data

4.1.1 Kondisi Awal pipa API 5L Grade X52 dan *weld overlay* Inconel 625

Sebelum sampel baja API 5L grade X52 dan lapisan *overlay* inconel 625 diberikan perlakuan oksidasi pada temperatur tinggi, perlu dilakukan pengujian awal yang bertujuan sebagai pembandingan dengan kondisi akhir setelah diberikan perlakuan pemanasan pada temperatur tinggi disertai aliran gas O₂ untuk kemudian menjadi penunjang dalam menganalisa perilaku oksidasi dari dua material tersebut.

Kondisi awal baja API 5L grade X52 dan lapisan *overlay* inconel 625 diketahui melalui pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dan EDX. Kondisi awal baja API 5L grade X52 setelah dilakukan pengujian SEM, menunjukkan hasil morfologi permukaan seperti ditunjukkan pada gambar 4.2 (a).

Selain itu untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada baja API 5L grade X52 maka dilakukan pengujian EDX yang hasilnya dapat diketahui pada tabel IV.1

Tabel IV.1. Komposisi unsur sampel awal baja API 5L grade X52 setelah pengujian EDX.

	Zn	K	Cl	Fe	Cu	Al	C	S	Si
<i>Weight percent (wt %)</i>	1,12	0,58	0,25	74,24	9,29	0,20	0,27	1,02	0,26

Dari hasil pengujian komposisi tersebut diketahui bahwa sampel awal baja API 5L X52 memiliki sedikit perbedaan dengan komposisi baja API 5L grade X52 sesuai standar *API 5L: Specification for line pipe*, yang ditunjukkan pada tabel II.3. Dari perbandingan komposisi kimia pada tabel IV.1 dan II.3 dapat diketahui bahwa kandungan unsur Fe- dalam material substrat mengalami penurunan sedangkan unsur Ni- dan Cr- mengalami penambahan, hal ini tersebut terjadi karena pada proses pengelasan



overlay dimungkinkan terjadi difusi unsur-unsur elektroda ke dalam substrat. Adanya perbedaan komposisi tersebut pasti mempengaruhi perilaku oksidasi yang terjadi, akan tetapi dikarenakan perbedaan komposisi akibat difusi hanya mempengaruhi daerah di sekitar *interface* antara substrat dengan lapisan *overlay*, maka hasil pengujian sampel awal API 5L grade X52 masih bisa dijadikan acuan sebagai bentuk perilaku oksidasi baja API 5L grade X52 sesuai dengan standar.

Sedangkan untuk lapisan *weld overlay* Inconel 625 juga dilakukan pengujian SEM dan EDX untuk mengetahui kondisi awal sampel yang meliputi morfologi permukaan dan komposisi kimia. Kondisi awal lapisan *weld overlay* Inconel 625 setelah dilakukan pengujian SEM, menunjukkan hasil morfologi permukaan seperti ditunjukkan pada gambar 4.7 (a).

Selain itu untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada lapisan *weld overlay* Inconel 625 maka dilakukan pengujian EDX sehingga didapatkan komposisi kimia sesuai yang ditunjukkan pada tabel IV.2.

Tabel IV.2. Komposisi unsur sampel awal *weld overlay* inconel 625 setelah pengujian EDX.

	Zn	Cr	Ni	Fe	Cu	O	C	Mo	Nb
<i>Weld Overlay inconel 625</i>	1,87	20,82	39,35	10,48	7,16	13,03	0,16	4,32	2,81

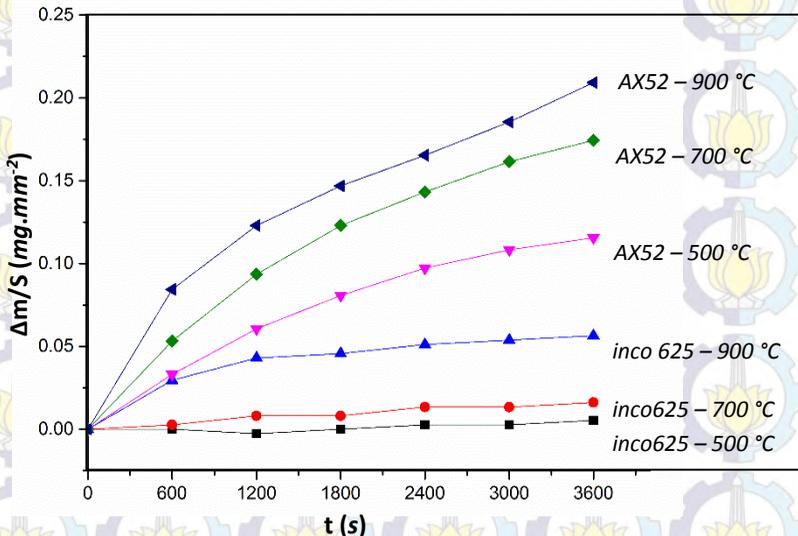
Komposisi kimia yang didapat dari pengujian EDX tersebut kemudian dibandingkan dengan komposisi kimia dari filler metal Inconel 625 yang mengacu pada spesifikasi produk dan pipa Inconel 625 menurut standar *ASTM B0444-03* pada tabel III.1 diketahui bahwa terdapat perbedaan komposisi kimia antara lapisan *weld overlay* inconel 625 dengan filler metal inconel 625 dan pipa inconel 625 menurut standar *API 5L*. Hal tersebut ditunjukkan dengan bertambahnya kandungan Fe- dan C- serta berkurangnya unsur Ni- dan Cr- pada lapisan *weld overlay* inconel 625. Perubahan komposisi kimia tersebut tentu akan



mempengaruhi perilaku oksidasi terutama pembentukan lapisan oksida yang kemudian dapat mempengaruhi ketahanan oksidasi dari lapisan *weld overlay* iniconel 625.

4.1.2 Pengukuran laju oksidasi API 5L Grade X52 dan *weld overlay* Iniconel 625

Pengujian untuk mengetahui perilaku oksidasi suatu material pada temperatur tinggi salah satunya melalui analisa termal. Analisa termal yang dilakukan adalah dengan metode pemanasan dalam furnace dan dilakukan pengukuran berat secara diskontinyu dalam rentang waktu tertentu dimana akan menghasilkan grafik perubahan massa sampel terhadap fungsi temperatur dan waktu. Analisa termal dalam penelitian ini dilakukan dalam lingkungan aliran gas oksigen murni (*partial pressure* 100%) pada proses waktu tahan pemanasan di temperatur 500, 700, dan 900 °C selama 1 jam.



Gambar 4.1. Kinetika oksidasi baja API 5L grade X52 dan *weld overlay* iniconel 625 untuk beberapa variasi temperatur dalam aliran oksigen.



Pada sampel awal baja API 5L grade X52 dan *weld overlay* inconel 625 yang dilakukan pemanasan dalam aliran gas oksigen akan menghasilkan grafik kinetika oksidasi untuk beberapa variasi temperatur yang ditunjukkan pada gambar 4.1. Gambar tersebut menunjukkan grafik laju oksidasi dimana sumbu y mengikuti reaksi antara paduan dengan lingkungan, yang berarti rasio dari pertambahan massa (Δm) per luas area sampel (S), sedangkan sumbu x merupakan waktu pemanasan. Oksidasi baja API 5L grade X52 yang termasuk dalam golongan baja karbon rendah memiliki karakteristik proses oksidasi terjadi dalam satu tahap dimana prosesnya mengikuti hukum laju oksidasi linear pada seluruh temperatur pemanasan yaitu 500, 700, dan 900 °C. Dalam penelitian ini peningkatan temperatur juga terbukti mempengaruhi laju oksidasi baja API 5L grade X52. Konstanta laju oksidasi linear baja API 5L grade X52 akan semakin besar seiring bertambahnya temperatur pemanasan.

Berdasarkan persamaan Wagner tentang laju oksidasi linear (persamaan II.8), maka didapatkan nilai konstanta laju oksidasi (k) untuk baja API 5L grade X52 pada temperatur pemanasan 500, 700, dan 900 °C selama 1 jam dalam aliran gas oksigen murni sebesar $1,27 \times 10^{-5}$, 2×10^{-5} , dan $2,65 \times 10^{-5} \text{ mg.mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Analisa termal juga dilakukan pada sampel lapisan *weld overlay* inconel 625 yang mengikuti parameter dan kondisi pemanasan yang sama pada pemanasan untuk baja API 5L grade X52. Lapisan *weld overlay* inconel 625 yang dalam bentuk filler metal tergolong dalam material Ni-based dengan kandungan Cr yang cukup tinggi, menghasilkan karakteristik kinetika oksidasi dengan ketahanan oksidasi tinggi. Adapun perbandingan ketahanan oksidasi antara lapisan *weld overlay* inconel 625 dengan baja API 5L grade X52 ditunjukkan pada gambar 4.1.

Pada gambar 4.1 ditunjukkan bahwa lapisan *weld overlay* inconel 625 sangat tahan terhadap reaksi oksidasi dimana pada temperatur 500 dan 700 °C terlihat hampir tidak terjadi pertambahan berat selama waktu ekspos pada temperatur tinggi.



Pada kedua parameter temperatur tersebut, *weld overlay* inconel 625 menunjukkan karakteristik oksidasi mengikuti hukum kinetika parabolik. Berdasarkan persamaan Wagner tentang laju oksidasi parabolik (persamaan II.9), maka didapatkan nilai konstanta laju oksidasi (k) untuk *weld overlay* inconel 625 pada temperatur pemanasan 500, dan 700 °C selama 1 jam dalam aliran gas oksigen murni sebesar $1,94 \times 10^{-18}$, dan $4,8 \times 10^{-11} \text{ mg.mm}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Sedangkan kinetika oksidasi *weld overlay* inconel 625 pada temperatur pemanasan 900 °C menunjukkan perilaku yang berbeda dimana proses oksidasi dapat dibagi menjadi dua tahap oksidasi. Proses pertama diawali dengan tahap oksidasi yang cepat mengikuti hukum oksidasi linear, dan kemudian diikuti dengan tahap oksidasi kedua yang mengikuti hukum parabolik dengan laju oksidasi lebih rendah. Berdasarkan persamaan Wagner tentang laju oksidasi, maka nilai konstanta laju oksidasi pada lapisan *weld overlay* inconel 625 pada temperatur 900 °C pada tahap pertama dan kedua sebesar $3,22 \times 10^{-7}$ dan $2,51 \times 10^{-9} \text{ mg.mm}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Setelah mendapatkan nilai konstanta laju oksidasi untuk setiap parameter, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai energi aktivasi (E_a) untuk material baja API 5L grade X52 dan *weld overlay* inconel 625. Energi aktivasi suatu material dapat dihitung menggunakan persamaan Arrhenius (II.11).

Berdasarkan perhitungan tersebut didapatkan nilai energi aktivasi untuk material baja API 5L grade X52 adalah sebesar 13,869 kJ/mol K, sedangkan untuk *weld overlay* inconel 625 didapatkan nilai energi aktivasi sebesar 474,013 kJ/mol K.

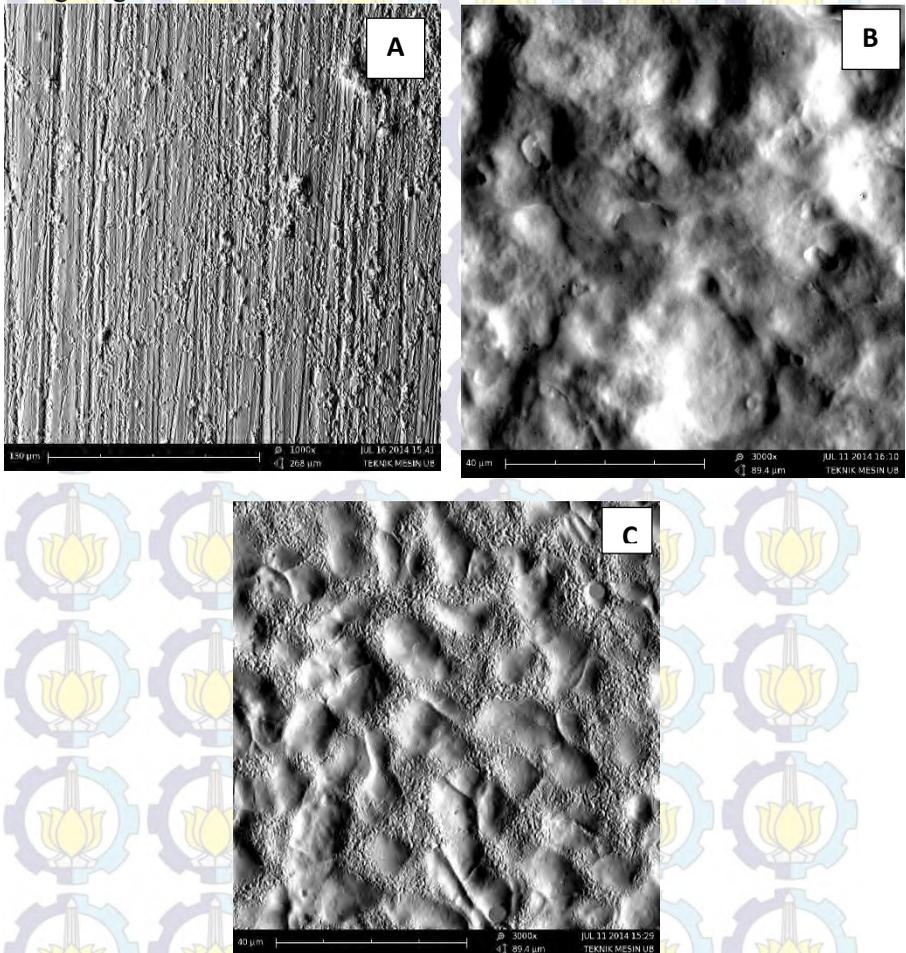
4.1.3 Morfologi permukaan API 5L Grade X52 dan dan *weld overlay* Inconel 625

Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian *scanning electron microscopy* (SEM) yang digunakan untuk mendapatkan foto permukaan sampel sehingga dapat diamati perubahan yang terjadi pada morfologi permukaan sampel seiring dengan perlakuan oksidasi pada temperatur tinggi.

Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan morfologi permukaan baja API 5L grade X52 dalam kondisi sebelum dan



sesudah proses oksidasi pada temperatur tinggi. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kenaikan temperatur akan mempengaruhi pembentukan oksida pada permukaan yang terekspos pada lingkungan oksidasi.



Gambar 4.2 Morfologi permukaan baja API 5L grade X52 (a) sebelum oksidasi dan setelah oksidasi pada temperatur (b) 500 °C, dan (c) 900 °C selama waktu tahan 2 jam.

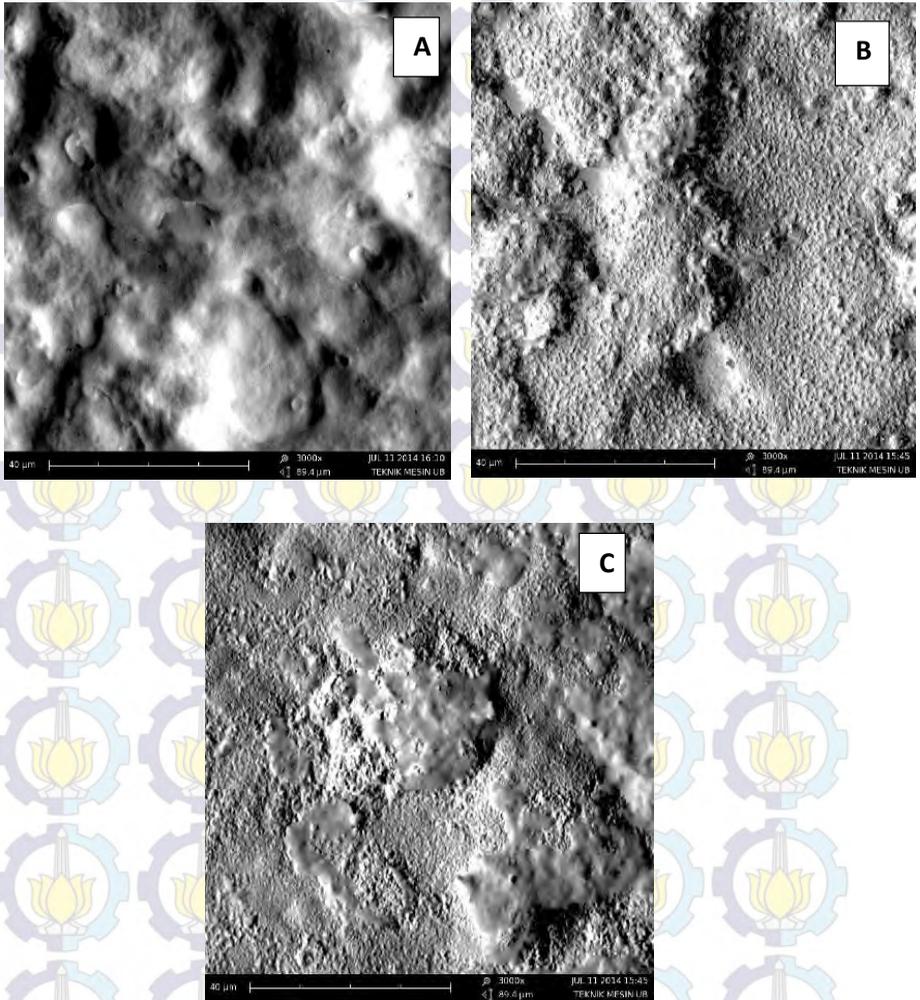


Pada gambar 4.2 (a) morfologi permukaan sampel menunjukkan kondisi homogen dengan kontur permukaan kasar, hal ini dikarenakan pada permukaan sampel masih belum terjadi reaksi pada permukaan dengan lingkungan dan proses preparasi yang kurang baik, sedangkan pada gambar 4.2 (b) mulai terlihat perbedaan pencahayaan pada permukaan sampel. Hal tersebut berarti terdapat perbedaan ketinggian pada permukaan sampel. Selain itu kontur permukaan logam mulai terlihat halus yang mengindikasikan mulai terbentuknya lapisan oksida pada permukaan sampel. Seiring dengan kenaikan temperatur maka perbedaan pembentukan senyawa oksida akan semakin terlihat jelas. Hal tersebut sesuai yang ditunjukkan pada gambar 4.4 (c).

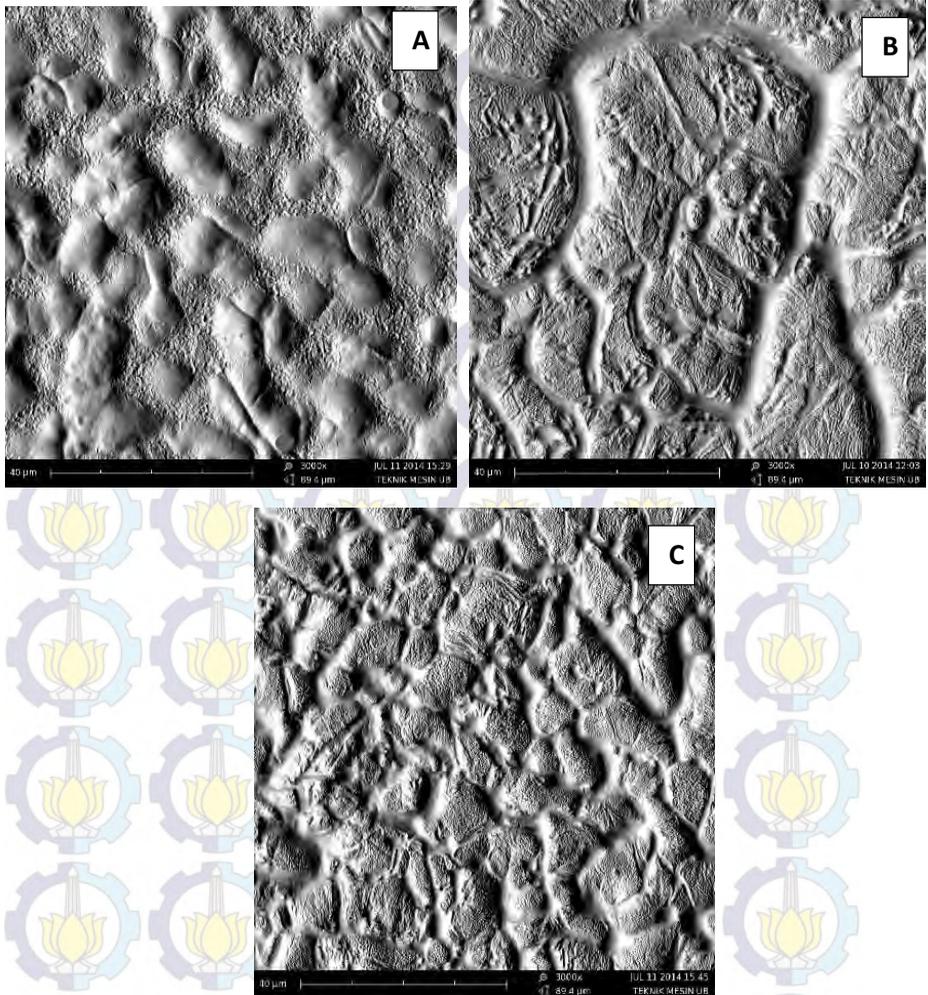
Selain berdasarkan pada kenaikan temperatur, penelitian ini juga melihat pengaruh lama waktu ekspos pada lingkungan oksidasi terhadap pembentukan lapisan oksida pada permukaan sampel. Gambar 4.3 menunjukkan perubahan morfologi yang terjadi pada sampel dalam variasi waktu tahan di temperatur 500 °C.

Gambar 4.3 (a), (b), dan (c) menunjukkan bahwa semakin lama waktu ekspos sampel baja API 5L grade X52 dalam aliran oksigen dan pada temperatur 500 °C, yang diambil sebagai parameter temperatur terendah dari oksidasi temperatur tinggi, maka kondisi permukaan akan semakin kasar. Hal ini merupakan bukti telah terjadi pertumbuhan lapisan oksida seiring dengan bertambahnya waktu ekpos pada lingkungan yang mengoksidasi.

Selain itu kondisi lapisan oksida pada temperatur 500 °C tidak menunjukkan karakteristik bentuk tertentu. Hal ini mengindikasikan bahwa lapisan oksida yang terbentuk tidak terdiri dari hanya satu senyawa.



Gambar 4.3. Morfologi permukaan sampel API 5L grade X52 dalam waktu pemanasan (a) 2, (b) 4, dan (c) 6 jam pada temperatur 500 °C.

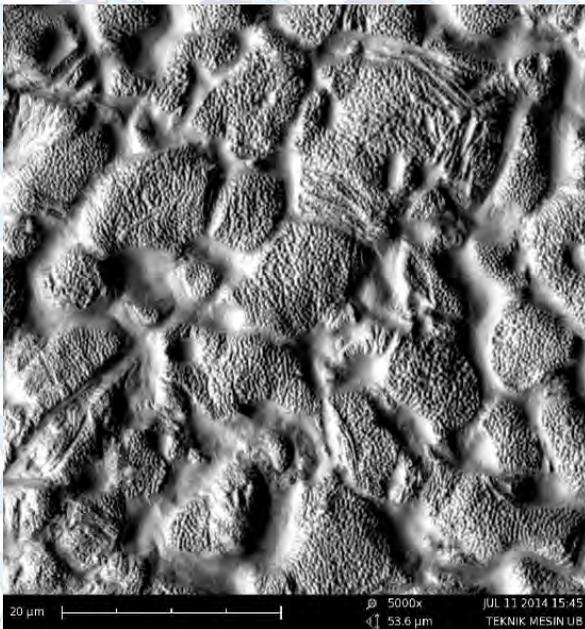


Gambar 4.4. Morfologi permukaan sampel API 5L grade X52 dalam waktu pemanasan (a) 2, (b) 4, dan (c) 6 jam pada temperatur 900 °C.



Disisi lain, perlakuan oksidasi temperatur tinggi baja API 5L grade X52 pada temperatur 900 °C, dimana sebagai parameter temperatur tertinggi dari perlakuan oksidasi, menunjukkan kondisi morfologi yang berbeda dengan temperatur 500 °C yaitu ukuran butir yang terbentuk jauh tampak lebih kasar seiring dengan bertambahnya waktu ekspos pada kondisi temperatur tinggi. Lapisan oksida yang terbentuk memiliki kesamaan bentuk butir yaitu berbentuk polygonal. Hal tersebut mengindikasikan senyawa oksida yang terbentuk homogen. Adapun hasil penampang morfologi permukaan sampel API 5L grade X52 pada temperatur 900 °C ditunjukkan pada gambar 4.4.

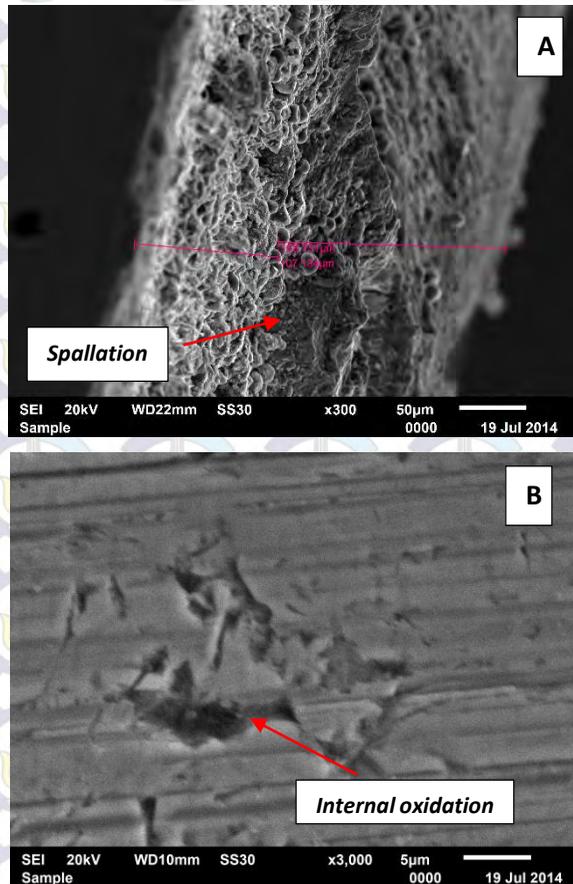
Pada kondisi pemanasan dalam temperatur 900 °C juga menunjukkan kondisi pembentukan lapisan oksida yang tidak rapat (*compact*) yang ditunjukkan pada gambar 4.5.



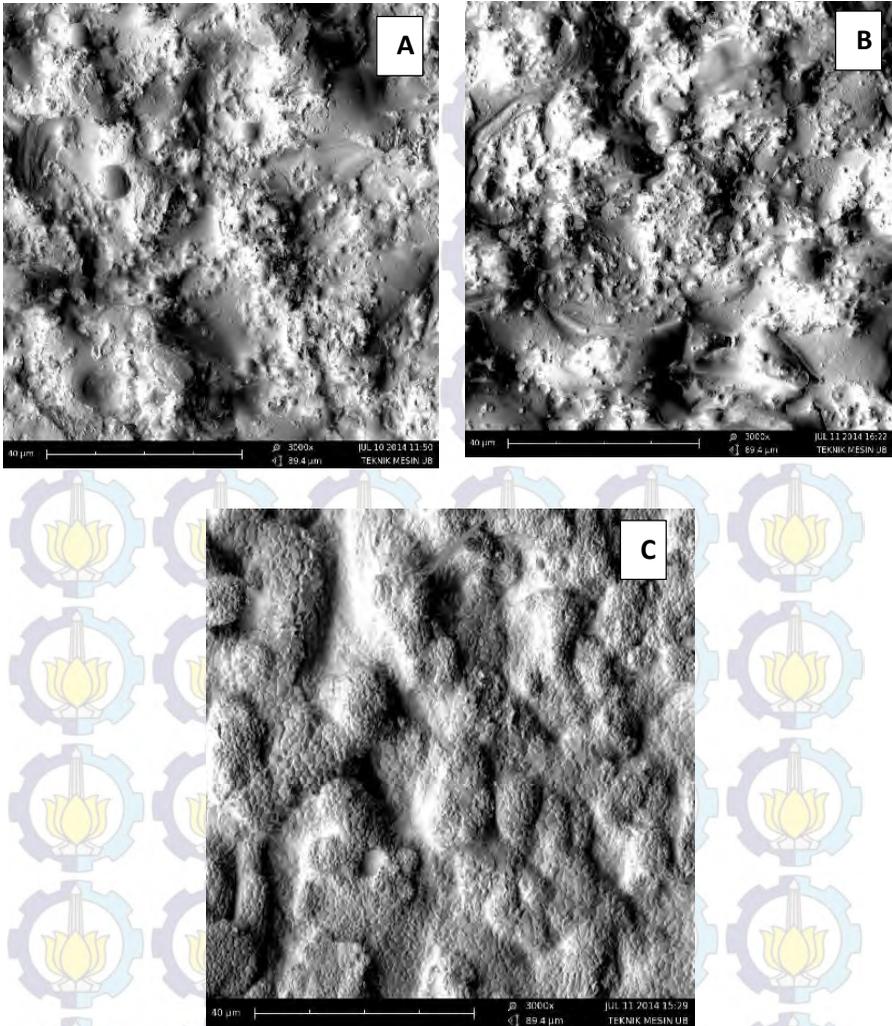
Gambar 4.5. Morfologi permukaan sampel API 5L grade X52 pada temperatur pemanasan 900 °C selama 6 jam.



Selain itu, pada kondisi pemanasan dalam temperatur 900 °C, pengamatan melintang (*cross section*) juga menunjukkan lapisan oksida yang terbentuk mengalami pengelupasan (*spallation*) dan terbentuk oksidasi internal. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6. (a) pengelupasan pada lapisan oksida, dan (b) pembentukan oksida internal pada penampang melintang baja API 5L grade X52 di temperatur 900 °C selama 6 jam.



Gambar 4.7 Morfologi permukaan lapisan *weld overlay* inconel 625 (a) sebelum oksidasi dan setelah oksidasi pada temperatur (b) 500 °C, dan (c) 900 °C selama waktu tahan 2 jam.

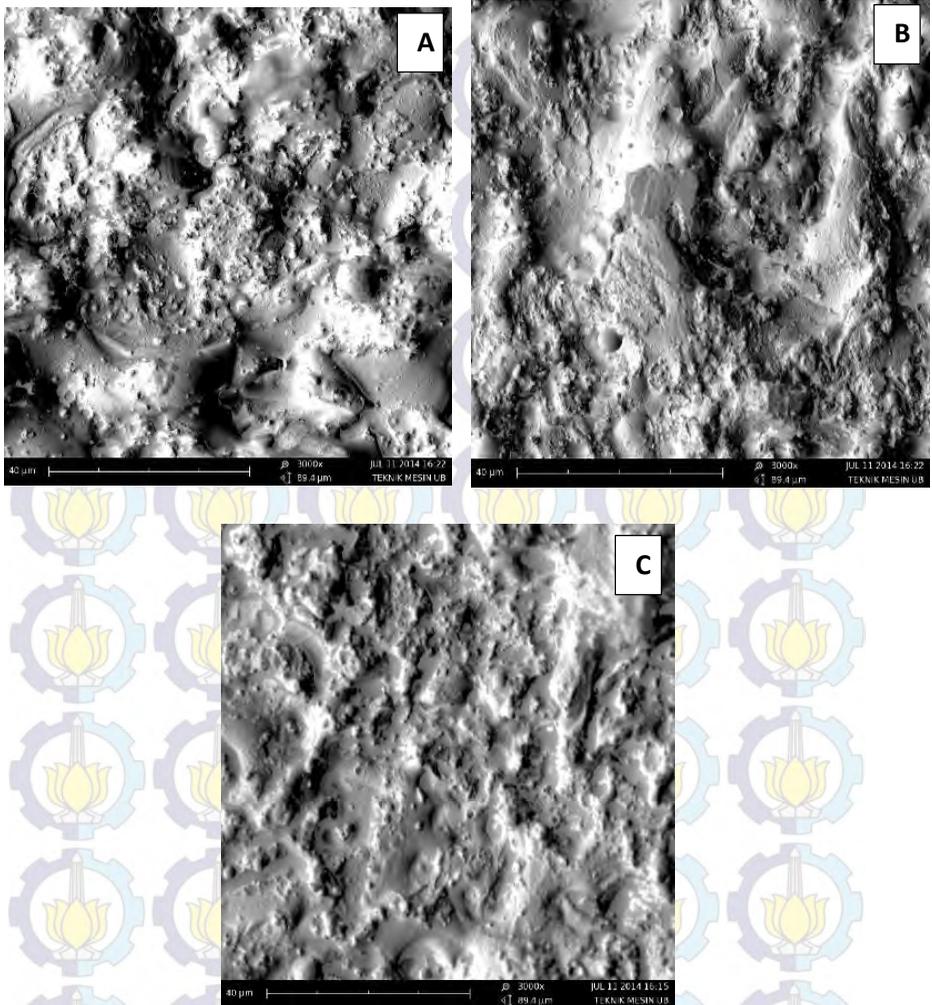


Sedangkan pada lapisan *weld overlay* inconel 625, pengujian pada temperatur 500 °C menghasilkan kondisi morfologi permukaan yang berbeda antara kondisi sebelum dan sesudah perilaku oksidasi temperatur tinggi. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.7.

Pada gambar 4.7 (a) morfologi permukaan sampel menunjukkan kondisi tidak homogenya dengan permukaan kasar, hal ini dikarenakan pada permukaan sampel masih belum terjadi reaksi pada permukaan dengan lingkungan. Pada gambar 4.7 (b) juga belum terlihat adanya perbedaan dengan kondisi awal. Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur 500 °C masih belum terjadi reaksi oksidasi yang mengakibatkan perubahan morfologi pada sampel. Seiring dengan kenaikan temperatur yaitu pada pemanasan dengan temperatur 900 °C kondisi morfologi permukaan mulai mengalami perubahan dimana mulai terbentuk lapisan oksida yang homogen dan menutupi hampir seluruh permukaan sampel. Hal tersebut sesuai yang ditunjukkan pada gambar 4.7 (c).

Selain berdasarkan pada kenaikan temperatur, penelitian ini juga melihat pengaruh lama waktu ekspos pada lingkungan oksidasi terhadap pembentukan lapisan oksida pada permukaan sampel. Gambar 4.8 menunjukkan perubahan morfologi yang terjadi pada sampel dalam variasi waktu tahan di temperatur 500 °C.

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa sampel baja *weld overlay* inconel 625 tidak mengalami banyak perubahan morfologi permukaan berdasarkan waktu ekspos yang berbeda-beda. Hal ini menunjukkan bahwa *weld overlay* inconel 625 memiliki ketahanan oksidasi yang cukup baik pada kondisi pemanasan di temperatur 500 °C disertai aliran gas O₂.



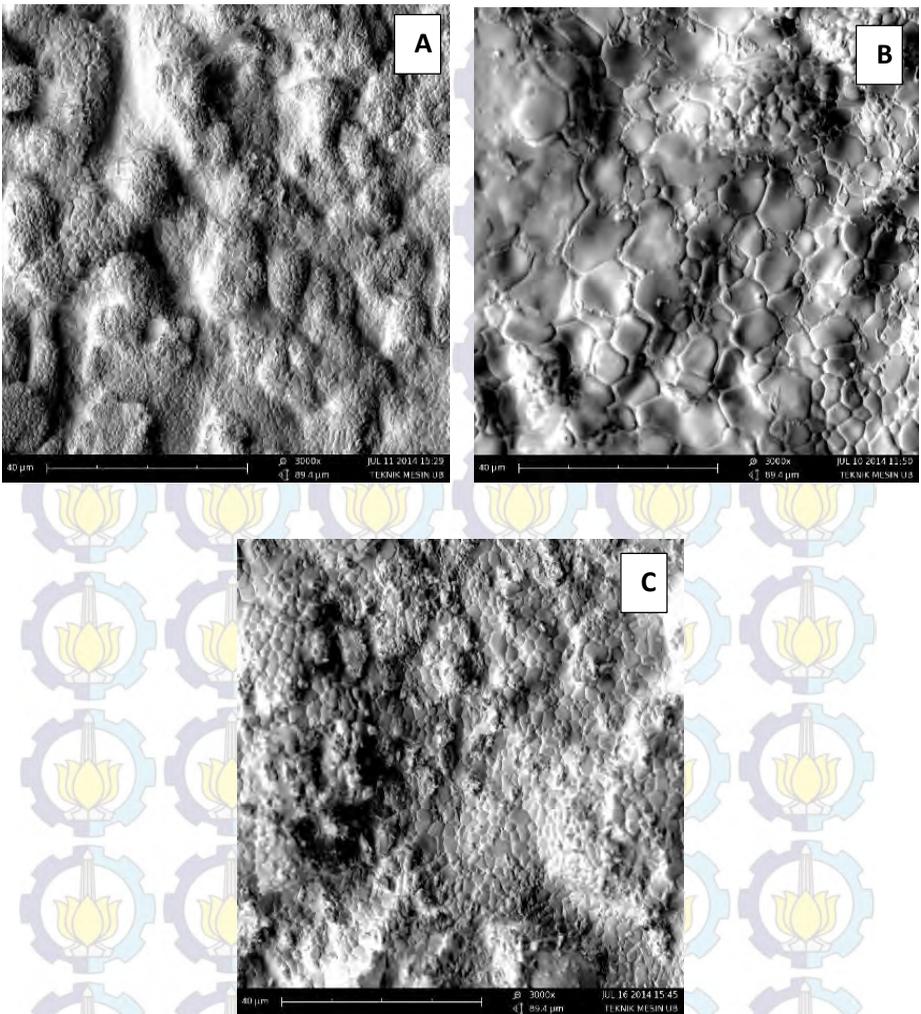
Gambar 4.8. Morfologi permukaan sampel *weld overlay* inconel 625 dalam waktu pemanasan (a) 2, (b) 4, dan (c) 6 jam pada temperatur 500 °C.



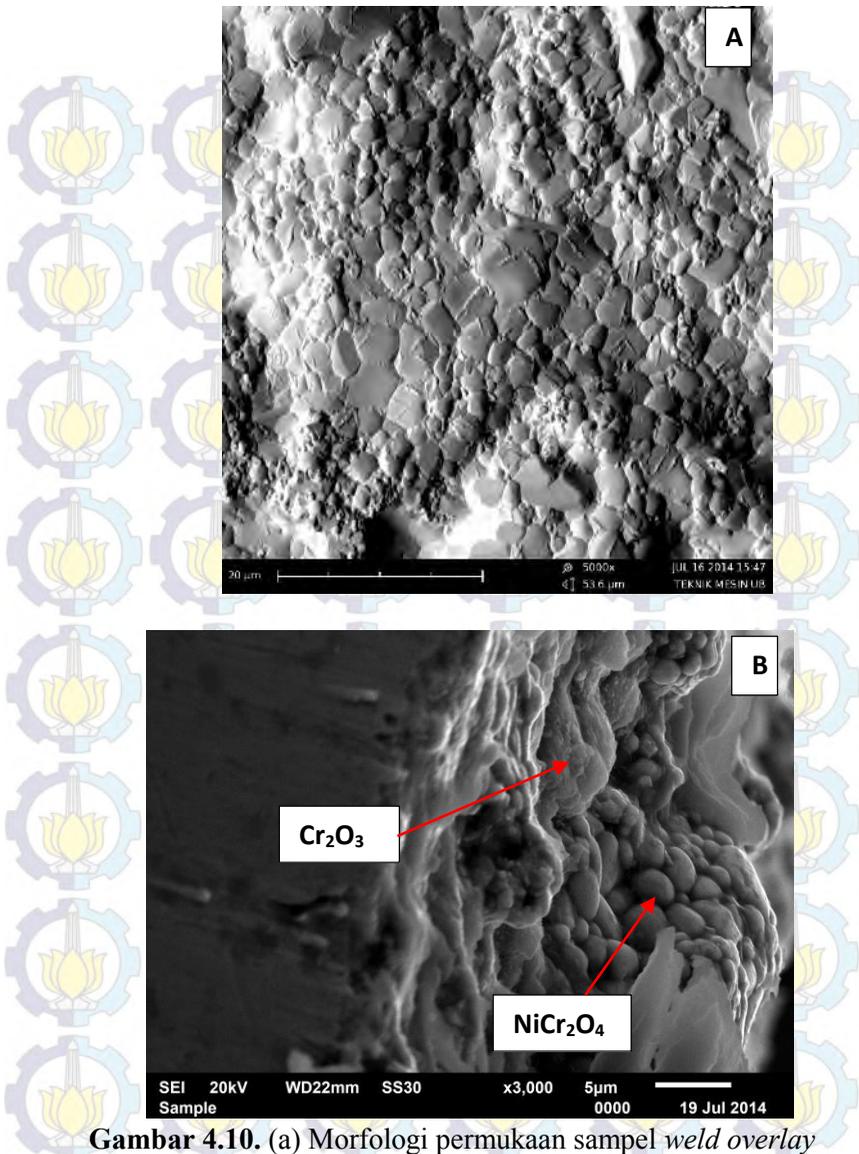
Disisi lain, perilaku oksidasi temperatur tinggi baja *weld overlay* inconel 625 pada temperatur 900 °C, dimana sebagai parameter temperatur tertinggi dari perlakuan oksidasi, menunjukkan kecenderungan kondisi morfologi yang berbeda dengan temperatur 500 °C yaitu seiring dengan semakin lamanya waktu ekspos pada lingkungan oksidasi maka kondisi morfologi juga mengalami perubahan. Pada waktu pemanasan selama 2 jam, oksida yang terbentuk terlihat homogen dengan ukuran butir yang halus, pada waktu pemanasan selama 4 jam ukuran butir oksida yang terbentuk lebih besar dan permukaan lebih halus, dan pada waktu pemanasan selama 6 jam lapisan yang terbentuk menunjukkan bentuk butir lebih kecil dengan kontur permukaan yang tidak rata.

Namun pada temperatur pemanasan 900 °C dapat terlihat bahwa lapisan oksida yang terbentuk pada permukaan *weld overlay* memiliki kesamaan bentuk yaitu berbentuk polygonal. Selain itu lapisan yang terbentuk juga tampak homogen dan merata di seluruh permukaan. Adapun hasil penampang morfologi permukaan sampel *weld overlay* inconel 625 pada temperatur 900 °C ditunjukkan pada gambar 4.9

Secara umum lapisan oksida yang terbentuk pada *weld overlay* inconel 625 memiliki karakteristik rapat dan hampir memiliki bentuk polygonal yang homogen, namun bila pengamatan dilakukan pada penampang melintang dengan perbesaran tinggi maka akan terlihat struktur lapisan tidak seluruhnya homogen. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.10.



Gambar 4.9. Morfologi permukaan sampel *weld overlay* inconel 625 dalam waktu pemanasan (a) 2, (b) 4, dan (c) 6 jam pada temperatur 900 °C.



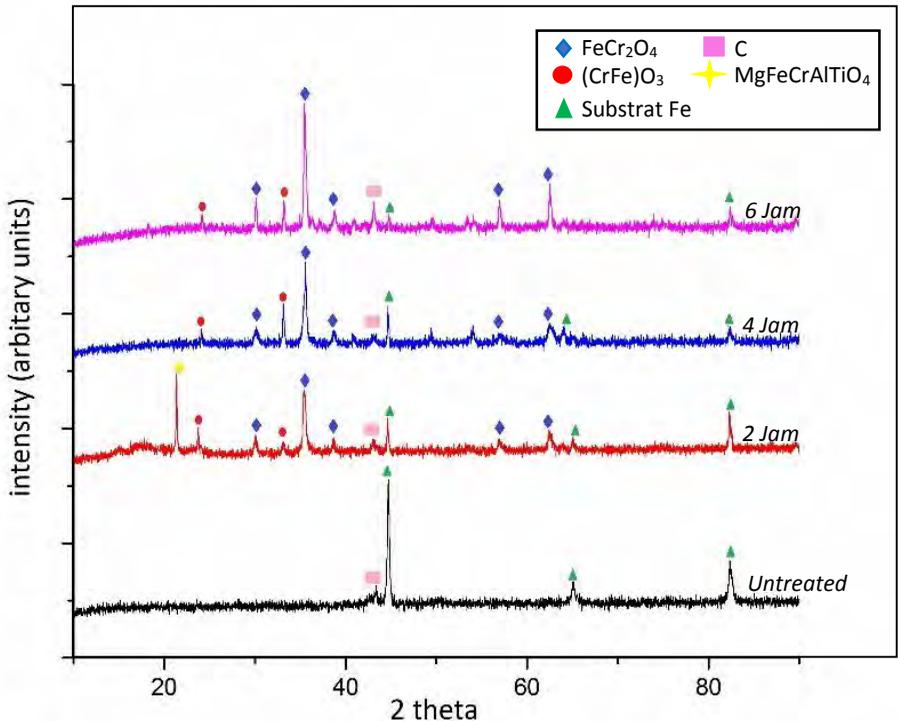
Gambar 4.10. (a) Morfologi permukaan sampel *weld overlay* inconel 625 (b) penampang melintang (*cross section*) sampel dalam pemanasan selama 6 jam pada temperatur 900 °C



4.1.4 Identifikasi fasa pada lapisan oksida

Pengujian *X-ray diffractometry* (XRD) dilakukan untuk dapat mengetahui jenis fasa yang terbentuk pada lapisan oksida pada temperatur tinggi dalam aliran gas oksigen.

Pengujian XRD pada sampel baja API 5L grade X52 pada kondisi tanpa perlakuan (*untreated*) menunjukkan unsur logam dasar yaitu besi (Fe) dan karbon (C). Hasil ini didapatkan melalui pencocokan secara manual antara puncak yang terbentuk dengan posisi 2 theta pada kartu PCPDF. Posisi 2 theta puncak ketiga senyawa tersebut bersesuaian dengan ICDD 01-087-0722, dan 01-079-1470. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.11 dan 4.12.



Gambar 4.11. Hasil pengujian XRD pada baja API 5L grade X52 inconel 625 pada waktu ekspos selama 2 jam, 4 jam, dan 6 jam di temperatur 500 °C.



Hasil difraksi sampel baja API 5L grade X52 dengan parameter pemanasan 500 °C ditunjukkan pada gambar 4.11. Melalui pencocokan secara manual antara puncak yang terbentuk dengan posisi 2 theta pada kartu PCPDF, maka dapat diketahui pada baja API 5L grade X52 yang pada temperatur 500 °C selama 2, 4, dan 6 jam, akan terbentuk senyawa oksida besi kromium yang memiliki rumus kimia FeCr_2O_4 , $(\text{CrFe})\text{O}_3$, dan unsur logam dasar besi. Posisi 2 theta puncak ketiga senyawa tersebut bersesuaian dengan ICDD 01-077-9861, 01-089-2618, dan 01-087-0722. Selain itu pada parameter waktu pemanasan selama 2 jam juga menunjukkan terbentuknya senyawa oksida magnesium besi khrom alumunium titanium dengan rumus kimia MgFeCrAlTiO_4 yang posisi 2 theta bersesuaian dengan ICDD 01-088-1893.

Sedangkan pada parameter pemanasan di temperatur 900 °C selama 2, 4, dan 6 jam, akan terbentuk senyawa oksida besi yang memiliki rumus kimia Fe_2O_3 . Posisi 2 theta puncak senyawa tersebut bersesuaian dengan ICDD 01-076-8400. Hasil difraksi untuk baja API 5L grade X52 dengan parameter temperatur pemanasan 900 °C selama 2, 4, dan 6 jam ditunjukkan pada gambar 4.12.

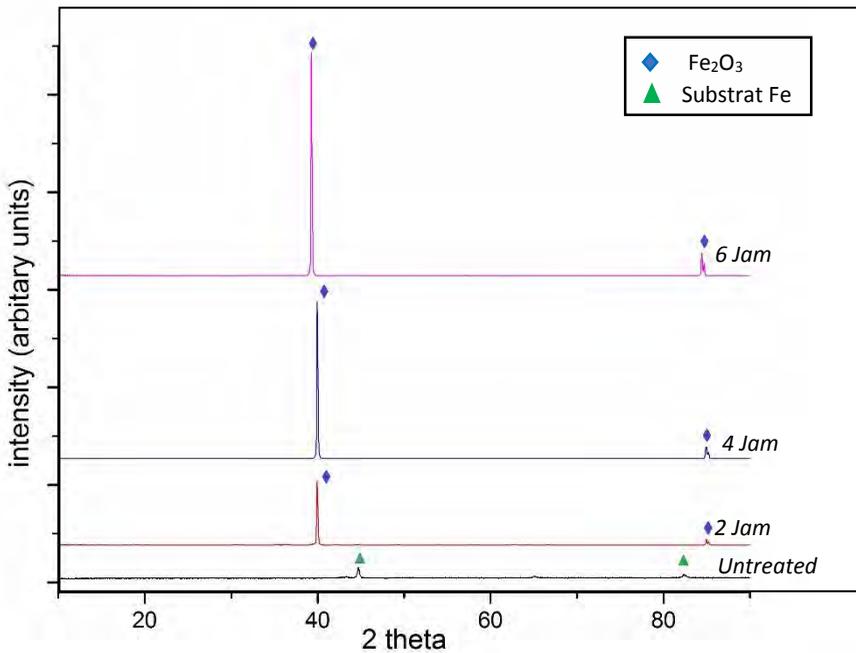
Sedangkan pengujian XRD pada sampel *weld overlay* inconel 625 pada kondisi tanpa perlakuan (*untreated*) menunjukkan unsur logam dasar yaitu nikel (Ni). Hasil ini didapatkan melalui pencocokan secara manual antara puncak yang terbentuk dengan posisi 2 theta pada kartu PCPDF. Posisi 2 theta puncak unsur Ni tersebut bersesuaian dengan ICDD 00-004-0850. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.13 dan 4.14.

Pengujian XRD pada sampel *weld overlay* inconel 625 pada temperatur 500 °C menunjukkan senyawa yang terbentuk cenderung sama pada kondisi waktu ekspos yang berbeda. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.13.

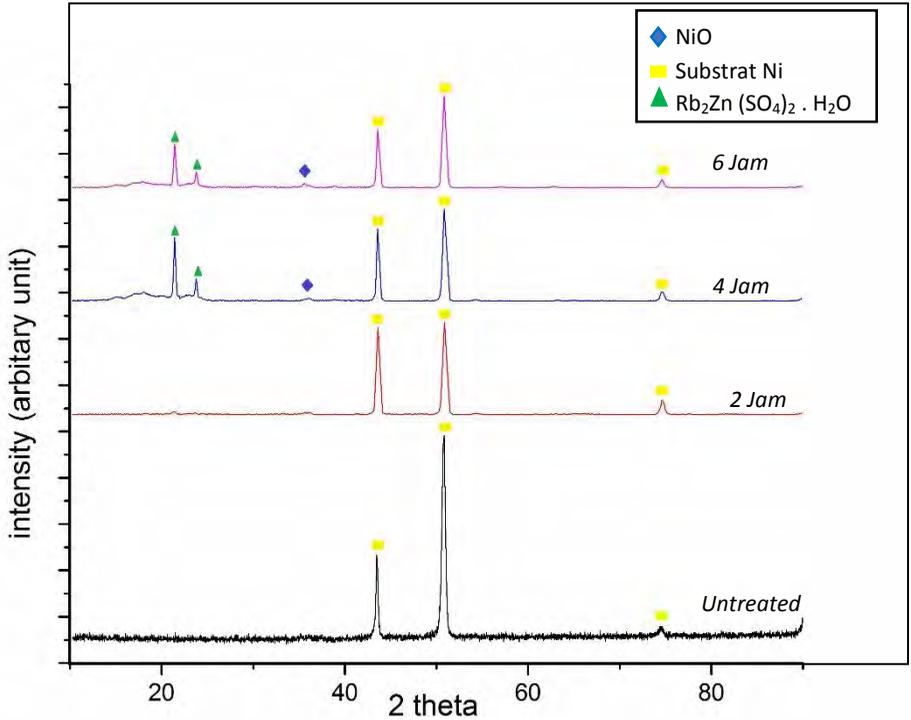
Hasil difraksi sampel *weld overlay* inconel 625 dengan parameter pemanasan 500 °C ditunjukkan pada gambar 4.13. Melalui pencocokan secara manual antara puncak yang terbentuk dengan posisi 2 theta pada kartu PCPDF, maka dapat diketahui



pada *weld overlay* inconel 625 yang pada temperatur 500 °C selama 2, 4, dan 6 jam, terdeteksi unsur logam dasar Ni. Posisi 2 theta puncak senyawa tersebut bersesuaian dengan ICDD 00-004-0850. Selain itu pada kondisi pemanasan selama 4 dan 6 jam juga terdeteksi adanya senyawa NiO dan $\text{Rb}_2\text{Zn}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ yang bersesuaian dengan kartu ICDD 00-004-0835 dan 00-021-1328.



Gambar 4.12. Hasil pengujian XRD pada baja API 5L grade X52 pada waktu ekspos selama 2 jam, 4 jam, dan 6 jam di temperatur 900 °C.

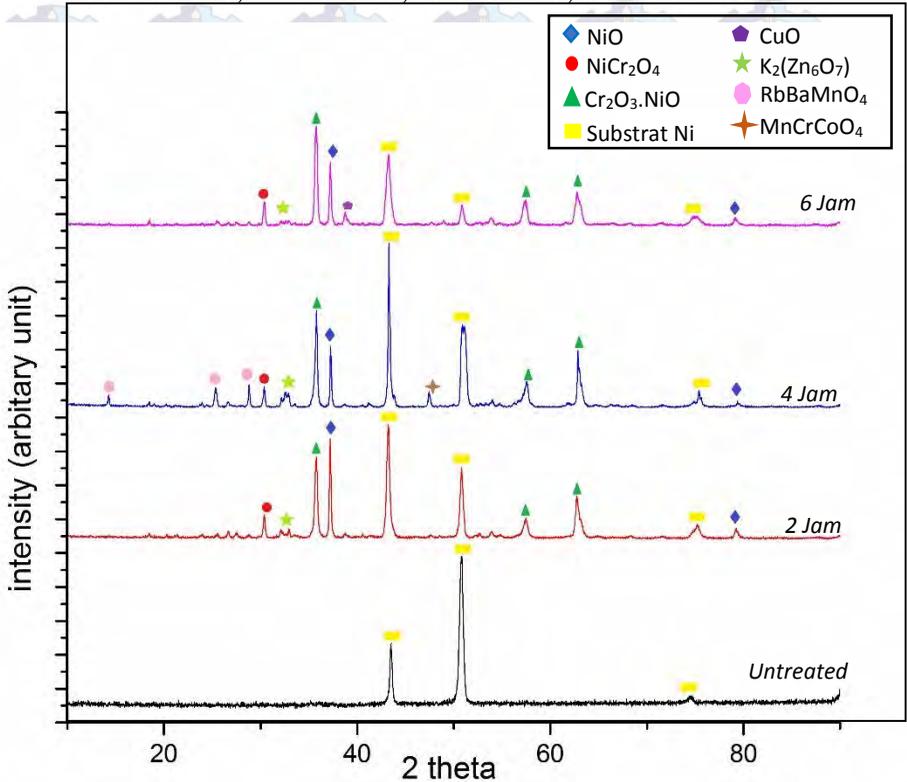


Gambar 4.13. Hasil pengujian XRD pada *weld overlay* inconel 625 pada waktu ekspos selama 2 jam, 4 jam, dan 6 jam di temperatur 500 °C.

Sedangkan pada parameter pemanasan di temperatur 900 °C selama 2, 4, dan 6 jam, akan terbentuk senyawa oksida nikel yang memiliki rumus kimia NiO. Posisi 2 theta puncak senyawa tersebut bersesuaian dengan ICDD 00-004-0835. Selain itu juga terbentuk oksida nikel kromium yang memiliki rumus kimia NiCr_2O_4 dengan posisi 2 theta besesuaian dengan ICDD 00-004-0763 serta oksida kromium nikel yang memiliki rumus kimia $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{NiO}$ dengan posisi 2 theta besesuaian dengan ICDD 00-002-1046. Selain itu juga terbentuk beberapa senyawa lain yaitu CuO,

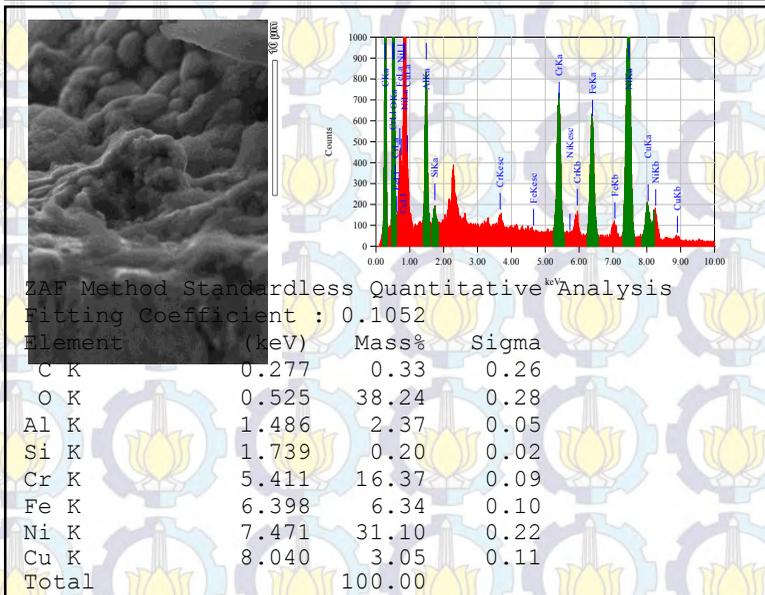
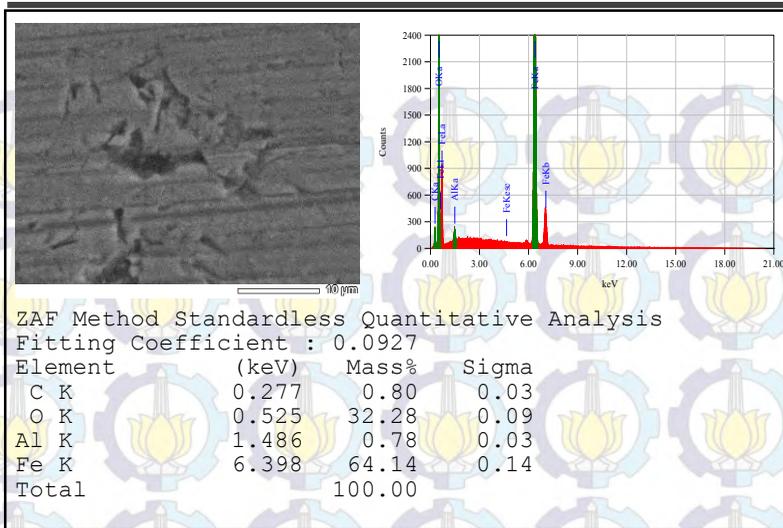


$K_2(Zn_6O_7)$, $MnCrCoO_4$ dan $RbBaMnO_4$ yang bersesuaian dengan ICDD 00-048-1548, 00-070-0473, 00-070-2465, dan 00-048-0662



Gambar 4.14. Hasil pengujian XRD pada *weld overlay* inconel 625 pada waktu ekspos selama 2 jam, 4 jam, dan 6 jam di temperatur 900 °C.

Untuk membandingkan hasil senyawa yang terbentuk dari hasil uji XRD, maka dilakukan pengujian SEM-EDX pada lapisan oksida baja API 5L grade X52 dan *weld overlay* inconel 625 parameter pemanasan 900 °C selama 6 jam yang hasilnya ditunjukkan pada gambar 4.15.



Gambar 4.15. Hasil pengujian SEM-EDX pada lapisan oksida (a) baja API 5L grade X52 dan (b) *weld overlay* inconel 625 pada parameter temperatur pemanasan 900 °C selama 6 jam.



4.2. Pembahasan

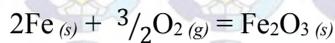
Penggunaan suatu instrument dalam kondisi temperatur tinggi dan pada lingkungan yang mengoksidasi akan menyebabkan material instrument tersebut rentan akan proses oksidasi. Salah satu metode proteksi akan permasalahan ini adalah dengan menggunakan pelapisan logam melalui metode *weld overlay cladding* dengan material paduan super inconel 625. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mempelajari perilaku oksidasi lapisan *weld overlay* inconel 625 dan baja API 5L grade X52 di lingkungan gas O_2 pada temperatur tinggi. Sehingga dapat dibandingkan ketahanan oksidasi dari kedua material tersebut.

Dari hasil pengujian analisa termal dengan melakukan proses pemanasan dan penimbangan secara diskontinyu dengan variasi temperatur 500, 700, dan 900 °C selama 1 jam akan didapatkan perbedaan kurva kinetika oksidasi antara baja API 5L grade X52 dengan lapisan *weld overlay* inconel 625. Pada baja API 5L grade X52, kurva oksidasi menunjukkan perilaku oksidasi linear dimana laju penambahan massa akan berbanding lurus dengan waktu. Proses oksidasi yang mengikuti hukum linear ini menunjukkan terjadinya reaksi pada permukaan logam dengan cepat sehingga akan timbul lapisan oksida. Bila mengacu pada pengujian XRD maka lapisan yang terbentuk pada baja API 5L grade X52 di temperatur 500 °C umumnya adalah oksida besi kromium. Pembentukan oksida besi kromium ini dikarenakan unsur Cr yang terkandung dalam sampel awal baja API 5L grade X52 mengalami penambahan yang cukup signifikan akibat proses pengelasan *overlay*. Unsur Cr- yang merupakan unsur terlarut dalam paduan logam akan menunjukkan karakteristik lebih stabil dalam pembentukan oksida (Fontana, 1987). Sehingga dengan kandungan yang cukup akan terbentuk lapisan oksida eksternal besi kromium. Namun, pada pemanasan dengan temperatur 900 °C senyawa yang terdeteksi oleh pengujian XRD adalah senyawa tunggal oksida besi Fe_2O_3 . Hal ini terjadi karena proses pemanasan akan menyebabkan reaksi oksidasi berlangsung dengan cepat sehingga proses pembentukan oksida yang terjadi hanya

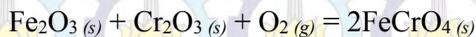


melibatkan unsur Fe dan O. Adapun unsur-unsur lain yang terlarut dalam paduan akan cenderung membentuk oksida internal di bawah *interface* lapisan oksida. Hal ini dibuktikan dengan pengujian EDX pada gambar 4.16 (a) dimana sampel API 5L grade X52 setelah pemanasan pada temperatur 900 °C selama 6 jam yang menunjukkan terdapat unsur Al- yang merupakan salah satu unsur terlarut dalam logam substrat yang dimungkinkan membentuk senyawa oksida aluminium- Al_2O_3 .

Adapun mekanisme oksidasi yang terjadi pada baja API 5L grade X52 adalah secara umum adalah pembentukan oksida besi Fe_2O_3 . Senyawa oksida ini terbentuk akibat reaksi antara logam Fe dengan atom O.



Sedangkan pada temperatur 500 °C, dimana terbentuk senyawa oksida FeCr_2O_4 dikarenakan terjadi reaksi antara oksida krom- Cr_2O_3 dengan oksida besi Fe_2O_3 sesuai reaksi berikut.



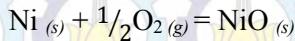
Pembentukan kedua senyawa oksida tersebut dapat dibuktikan dengan perhitungan perubahan energy Gibbs untuk senyawa Fe_2O_3 dan Cr_2O_3 bernilai negatif pada kondisi temperatur 500 °C. Nilai negatif tersebut berarti bahwa reaksi pembentukan produk reaksi berjalan spontan.

Selain itu, pada temperatur 500 °C dengan waktu ekspos selama 2 jam ditunjukkan terbentuk senyawa MgFeAlCrTiO_4 dimana senyawa tersebut terbentuk karena pengaruh difusi dari proses *weld overlay cladding* yang menyebabkan distribusi unsur tidak merata sehingga dimungkinkan terbentuk senyawa oksida kompleks pada bagian baja API 5L grade X52.

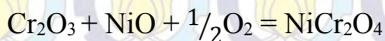
Sedangkan pada sampel *weld overlay* inconel 625 menunjukkan proses oksidasi berjalan sangat lambat, dimana pada temperatur 500, dan 700 °C hampir tidak terlihat adanya



penambahan berat. Hal ini menunjukkan bahwa proses oksidasi mengikuti kurva parabolik. Pada kedua parameter temperatur ini, senyawa yang terbentuk tidaklah mengalami perubahan dimana hanya senyawa oksida nikel yang terdeteksi pada pengujian XRD. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan *weld overlay* iniconel 625 memiliki ketahanan oksidasi yang hingga temperatur 700 °C. Sedangkan pada temperatur 900°C, proses oksidasi dapat terbagi menjadi dua tahap, yaitu tahap awal dimana terjadi reaksi pada permukaan yang cepat sehingga akan terbentuk lapisan oksida nikel sesuai reaksi berikut



Setelah pembentukan oksida nikel-NiO kemudian diikuti dengan pembentukan oksida kromium-Cr₂O₃ sesuai dengan hasil pengujian XRD dimana pada temperatur 500 °C oksida nikel sudah terbentuk, sehingga dapat disimpulkan oksida nikel lebih dahulu terbentuk daripada oksida kromium yang baru teridentifikasi pada pemanasan 900 °C. Namun senyawa oksida kromium yang terbentuk tidaklah menjadi fasa stabil yang berdiri sendiri melainkan akan bereaksi dengan oksida nikel membentuk oksida nikel kromium-NiCr₂O₄ yang stabil. Adapun reaksi yang terjadi yaitu.



Pembentukan senyawa oksida kromium nikel dapat disimpulkan lebih stabil daripada oksida nikel dan oksida kromium karena memiliki nilai negatif perubahan energi bebas Gibbs (ΔG) yang lebih besar.

Selain itu, pada temperatur 500 °C ditunjukkan terbentuk senyawa Rb₂Zn(SO₄)₂.H₂O dan pada temperatur 900 °C terbentuk senyawa CuO, K₂(Zn₆O₇), MnCrCoO₄ dan RbBaMnO₄. Senyawa-senyawa tersebut terbentuk karena pengaruh difusi dari proses *weld overlay cladding* yang menyebabkan distribusi unsur tidak merata



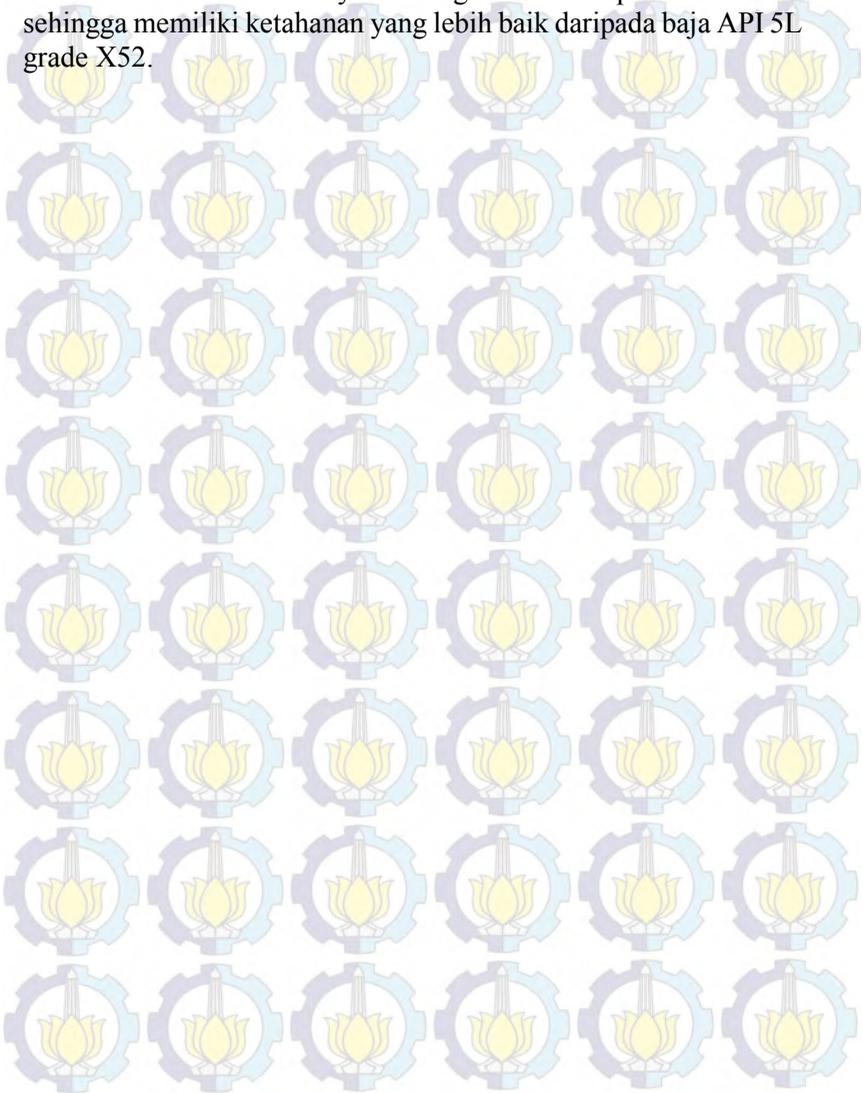
sehingga dimungkinkan terbentuk senyawa oksida kompleks pada *weld overlay* inconel 625.

Pada pengujian SEM dapat diketahui bahwa morfologi permukaan untuk baja API 5L grade X52 berbeda dengan *weld overlay* inconel 625, dimana morfologi baja API 5L grade X52 cenderung lebih mudah mengalami perubahan seiring dengan naiknya temperatur berbeda dengan *weld overlay* inconel 625 yang cenderung tidak mengalami banyak perubahan. Selain itu, lapisan oksida yang terbentuk pada baja API 5L grade X52 terdiri dari bentuk kristal yang heterogen berbeda dengan *weld overlay* inconel 625 yang hampir seluruh lapisan di permukaannya berbentuk polygonal yang ditunjukkan pada gambar (4.10). Baja API 5L juga menunjukkan cenderung mudah membentuk lapisan oksida yang ditunjukkan dengan pembentukan lapisan Fe_2O_3 setebal 274 μm , namun lapisan tersebut juga menunjukkan karakteristik yang tidak rapat dan mudah mengalami pengelupasan (*spallation*). Hal tersebut ditunjukkan pada gambar (4.6). Sehingga, walaupun baja API 5L grade X52 mudah membentuk lapisan oksida pada temperatur tinggi namun lapisan oksida yang terbentuk menunjukkan karakteristik tidak protektif dan lapisan *weld overlay* inconel menunjukkan karakteristik lapisan oksida yang cukup protektif karena pembentukan lapisan oksida berjalan lambat namun cukup stabil sehingga tidak terjadi adanya porositas ataupun oksidasi internal.

Selain itu melalui kurva laju oksidasi juga dapat diketahui bahwa konstanta laju oksidasi dari *weld overlay* inconel 625 lebih rendah dari baja API 5L grade X52, namun memiliki kecenderungan yang sama ketika terjadi peningkatan temperatur yaitu konstanta laju oksidasi juga ikut naik. Setelah mendapatkan nilai konstanta laju oksidasi maka dengan menggunakan persamaan Arrhenius bisa diketahui besar energi aktivasi (E_a). Energi aktivasi adalah jumlah energi minimum yang dibutuhkan oleh suatu material untuk dapat melakukan reaksi. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai energi aktivasi *weld overlay* inconel 625 jauh lebih besar bila dibandingkan dengan baja API 5L



grade X52. Hal ini berarti bahwa material *weld overlay* inconel 625 membutuhkan lebih banyak energi untuk dapat teroksidasi sehingga memiliki ketahanan yang lebih baik daripada baja API 5L grade X52.





BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. a) Pengujian analisa termal pada temperatur 500, 700, dan 900 °C dalam aliran gas oksigen menunjukkan bahwa karakteristik kinetika oksidasi dari baja API 5L grade X52 berbeda dengan lapisan *weld overlay* inconel 625. Pada baja API 5L grade X52 pada temperatur 500, 700, dan 900 °C didapatkan konstanta laju oksidasi sebesar $1,27 \times 10^{-5}$, 2×10^{-5} , dan $2,65 \times 10^{-5}$ $\text{mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, sedangkan pada *weld overlay* inconel 625 pada temperatur 500, 700, didapatkan konstanta laju oksidasi sebesar $1,94 \times 10^{-18}$, dan $4,8 \times 10^{-11}$ $\text{mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Sedangkan pada temperatur 900 °C terdapat dua konstanta laju oksidasi yaitu sebesar $3,22 \times 10^{-7}$ dan $2,51 \times 10^{-9}$ $\text{mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.
- b) Nilai energi aktivasi untuk material baja API 5L grade X52 adalah sebesar 13,869 kJ/mol K, sedangkan untuk *weld overlay* inconel 625 didapatkan nilai energi aktivasi sebesar 474,013 kJ/mol K.
- c) Pengujian SEM-EDX dan XRD menunjukkan bahwa morfologi serta senyawa yang terbentuk pada lapisan oksida dari baja API 5L grade X52 dan *weld overlay* inconel 625 dapat dipengaruhi oleh temperatur dan waktu ekspos pada lingkungan oksidasi.
- d) Pada baja API 5L grade X52 akan terbentuk lapisan oksida besi kromium- Fe_2CrO_4 pada temperatur 500 dan 700 °C dan oksida besi- Fe_2O_3 pada temperatur 900 °C yang bersifat tidak protektif sedangkan pada *weld overlay* inconel 625 akan terbentuk lapisan oksida nikel-NiO dan oksida nikel kromium- NiCr_2O_4 yang stabil dan protektif.



2. Filler metal inconel 625 dapat digunakan sebagai material pelapis pada baja API 5L grade X52 melalui metode *weld overlay cladding* karena memiliki ketahanan oksidasi yang lebih tinggi daripada baja API 5L grade X52.

5.2 Saran

1. Pengujian analisa termal sebaiknya menggunakan pengukuran secara kontinyu menggunakan metode *thermogravimetri analysis* (TGA) agar didapatkan hasil yang lebih akurat.
2. Pengujian komposisi awal sebaiknya menggunakan metode *spectroscopy* yang lebih akurat misalnya *Induced Coupled Plasma (ICP)* atau *X-ray Fluorescence (XRF)*
3. Pengamatan melintang hendaknya dilakukan *mounting* terlebih dahulu agar tidak merusak lapisan oksida yang terbentuk ketika proses *grinding*.
4. Pada penggunaan sampel baja API 5L grade X52 sebaiknya mengambil dari sisi yang jauh dari daerah las agar terhindar dari daerah difusi yang dapat mempengaruhi hasil dari pembentukan senyawa oksida.



DAFTAR PUSTAKA

Adamiec, J. (2009). High temperature corrosion of power boiler components clad with nickel alloys. *Material characterization* 60, 1093-1099.

Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. New York: Elsevier Science & Technology Books.

Aji, G. I. (2010). Analisa Laju Korosi berdasarkan perbandingan hasil kupon, corrosion modelling, dan pengukuran metal loss pada sistem perpipaan minyak dan gas bumi di lapangan lepas pantai.

Allen, G. (1988). The oxidation of inconel - 690 Alloy at 600 K in Air. *Applied Surface Science* 31, 220-238.

American Petroleum Institute. (2004). *Specification for Line Pipe*. Washington, D.C: API.

American Standard and Testing Materials. (2003). *Specification for Nickel-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloys (UNS N06625) and Nickel-Chromium-Molybdenum-Silicon Alloy (UNS N06219) Pipe and Tube*. Washington: ASTM International.

American Welding Society. (1989). *Specification for Nickel and Nickel Alloy Bare Welding Electrodes and Rods*. Miami, Florida: American Welding Society.



-
- ASM International. (1992). *ASM Handbook Volume 13: Corrosion*. Chicago: ASM International.
- Babolian, R. (2005). *Corrosion Tests and Standards Application and Interpretation 2nd Edition*. Baltimore: ASM International.
- Bardal, E. (2003). *Corrosion and Protection*. London: Springer.
- Chalmers, B. (1959). *Physical Metallurgy*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Craig, B., Lane, R., & Rose, D. (2006). *Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials*. New York: Advanced Materials, Manufacturing, and Testing Information Analysis Center.
- Crook, P. (2007). *Chemical Engineering Progress*.
- Davis, J. (2001). *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. Materials Park: ASM International.
- Dupont, J. (1996). Solidification of an Alloy 625 Weld Overlay. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS Vol 27A*, 3619.
- Fontana, M. (1987). *Corrosion Engineering*. Singapore: McGraw-Hill Book Company.
- Gaskell, D. (2003). *Introduction to the Thermodynamics of Materials*. New York: Taylor & Francis.
- J. Zurek, D.J. Young, & E.Essuman. (2008). Growth and adherence of chromia based surface scales on Ni-based
-



alloys in high- and low-pO₂ gases . *Materials Science and Engineering Elsevier*, 259-270.

Jang, C., Kim, D., Kim , D., SAH, I., Ryu, W.-S., & Yoo, Y.-s. (2011). Oxidation behaviours of wrought nickel-based superalloys in various high temperature environments. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1524-1531.

Jian, L., Yuh, C., & Farooque, M. (1999). Oxidation behaviour of superalloys in oxidizing and reducing environment. *Corrosion Science* 42, 1573-1585.

Lai, G. Y. (1990). *High Temperatur Corrosion of Engineering Alloys*. Indiana, USA: ASM International.

N. Birks, G. H. Meier, & F. S. Pettit. (2006). *Introduction to the High Temperatur Oxidation of Metals*. Cambridge: Cambridge Press.

Pujilaksono, B., Johnsson , T., & Halvarsson, M. (2010). Oxidation of iron in dry and wet O₂. *Corrosion Science Elsevier*, 1560-1569.

Revie, R. (2008). *Corrosion and Corrosion Control*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Schweitzer, P. (2000). *Fundamental of Metallic Corrosion*. Chicago: CRC Press.

Uhlig, H. (1948). *Corrosion Handbook*. USA: John Wiley & Sons, Inc.



Zahrani, E., & Alfantazi, A. (2012). Molten Salt induced corrosion of inonel 625 superalloy in $PbSO_4 - Pb_3O_4 - PbCl_2 - Fe_2O_3 - ZnO$ environment. *Corrosion Science* 65, 340 - 359.

Zahrani, E., & Alfantazi, A. (2013). Hot Corrosion of Inconel 625 Overlay weld cladding in smelting off-gas environment. *Metallurgical and materials transactions volume 44A*, 4671.



LAMPIRAN A PERHITUNGAN KONSTANTA LAJU OKSIDASI

➤ Persamaan umum kinetika oksidasi

$$\left(\frac{\Delta M}{A_o}\right)^n = k t$$

$$n \log \left(\frac{\Delta M}{A_o}\right) = \log k + \log t$$

$$\log \left(\frac{\Delta M}{A_o}\right) = \frac{1}{n} \log t + \frac{1}{n} \log k$$

Dimana :

$\left(\frac{\Delta M}{A_o}\right)$: perubahan massa per satuan luas (mg/cm^2)

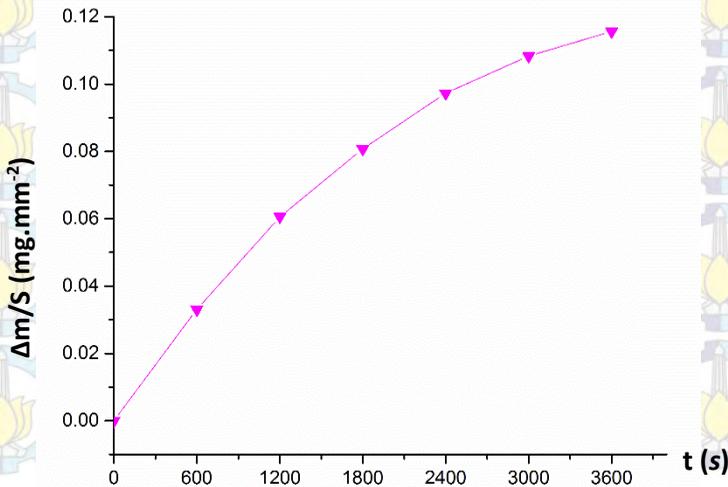
k : konstanta laju oksidasi (mg/cm^2) – min

t : waktu (menit)

n : kinetika oksidasi

1. Kinetika Baja API 5L grade X52

➤ Temperatur 500 °C



Gambar 1. Kurva oksidasi baja API 5L grade X52 pada temperatur 500 °C selama 1 jam



➤ Data Perubahan massa

	m (mg)	S (mm ²)	Δm (mg)	Δm/S (mg.mm ⁻²)
M.awal	209.9			
m0	211.6			
m1	213.4	54.48	1.8	0.033039648
m2	214.2	54.48	3.3	0.060572687
m3	215.3	54.48	4.4	0.080763583
m4	216.2	54.48	5.3	0.097283407
m5	216.8	54.48	5.9	0.108296623
m6	217.2	54.48	6.3	0.115638767

➤ Perhitungan Fungsi Log

Δm/S (mg.mm ⁻²)	log [Δm/S (mg.mm ⁻²)]	t (s)	Log t
0.033039648	-1.480964594	600	2.778151
0.060572687	-1.217723159	1200	3.079181
0.080763583	-1.092784422	1800	3.255273
0.097283407	-1.011961229	2400	3.380211
0.108296623	-0.965385087	3000	3.477121
0.115638767	-0.936896549	3600	3.556303

➤ Perhitungan nilai k

$$y = -0.936896549 - (-1.480964594) = 0.544068$$

$$x = 3.556303 - (2.778151) = 0.778151$$

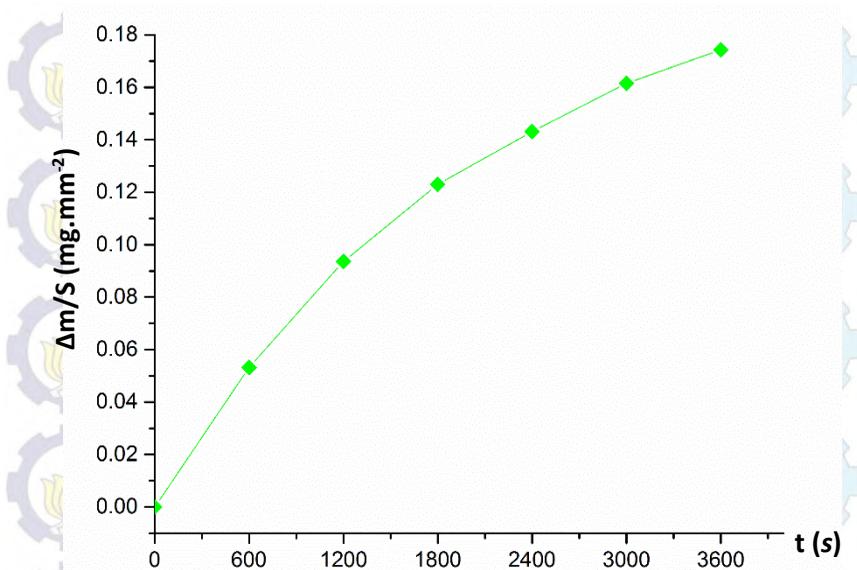
$$m = \frac{y}{x} = \frac{0.544068}{0.778151} = 0.69918$$

$$c = -0.936896549 - (3.556303 \times 0.69918) = -3.42339$$

$$k = 10^{(c/m)} = 1.27 \times 10^{-5} \text{ mg.mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



➤ Temperatur 700 °C



Gambar 2. Kurva oksidasi baja API 5L grade X52 pada temperatur 700 °C selama 1 jam

➤ Data Perubahan massa

	m (mg)	S (mm²)	Δm (mg)	Δm/S (mg.mm⁻²)
M.awal	208.5			
m0	209.6	54.48		
m1	212.5	54.48	2.9	0.053230543
m2	214.7	54.48	5.1	0.093612335
m3	216.3	54.48	6.7	0.12298091
m4	217.4	54.48	7.8	0.143171806
m5	218.4	54.48	8.8	0.161527166
m6	219.1	54.48	9.5	0.174375918



➤ Perhitungan Fungsi Log

$\Delta m/S$ ($mg \cdot mm^{-2}$)	$\log [\Delta m/S$ ($mg \cdot mm^{-2}$)]	t (s)	Log t
0.053230543	-1.273839101	600	2.778151
0.093612335	-1.028666923	1200	3.079181
0.12298091	-0.910162296	1800	3.255273
0.143171806	-0.844142496	2400	3.380211
0.161527166	-0.791754427	3000	3.477121
0.174375918	-0.758513494	3600	3.556303

➤ Perhitungan nilai k

$$y = -0.758513494 - (-1.273839101) = 0.515326$$

$$x = 3.556303 - (2.778151) = 0.778151$$

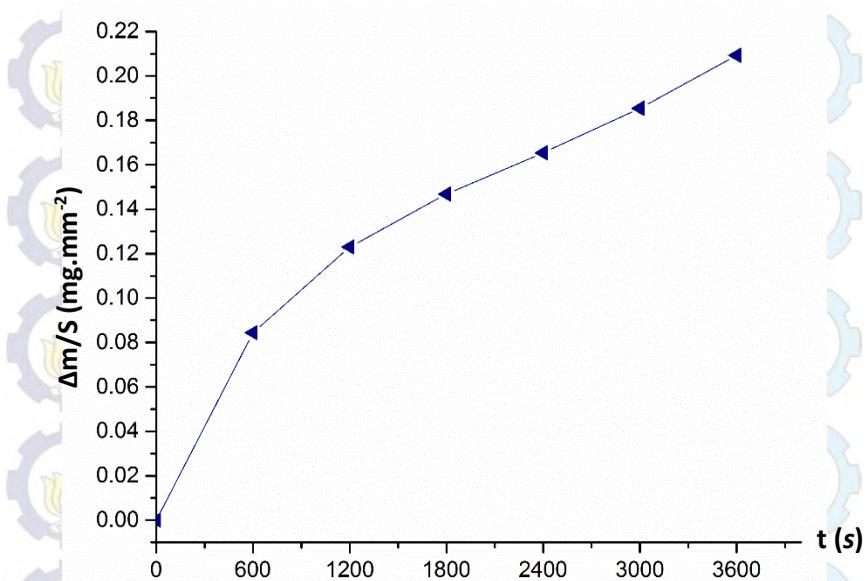
$$m = \frac{y}{x} = \frac{0.515326}{0.778151} = 0.662243$$

$$c = -0.758513494 - (3.556303 \times 0.662243) = -3.11365$$

$$k = 10^{(c/m)} = 2 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



➤ Temperatur 900 °C



Gambar 3. Kurva oksidasi baja API 5L grade X52 pada temperatur 900 °C selama 1 jam

➤ Data Perubahan massa

	m (mg)	S (mm²)	Δm (mg)	Δm/S (mg.mm⁻²)
M.awal	209.9			
m0	210.9	54.48		
m1	215.2	54.48	4.6	0.084434655
m2	217.6	54.48	6.7	0.12298091
m3	218.9	54.48	8	0.146842878
m4	219.9	54.48	9	0.165198238
m5	221	54.48	10.1	0.185389134
m6	223.8	54.48	12.9	0.236784141



➤ Perhitungan Fungsi Log

$\Delta m/S$ ($mg.mm^{-2}$)	$\log [\Delta m/S$ ($mg.mm^{-2}$)]	t (s)	Log t
0.084434655	-1.102768643	600	2.778151
0.12298091	-0.910162296	1200	3.079181
0.146842878	-0.833147112	1800	3.255273
0.165198238	-0.781994589	2400	3.380211
0.185389134	-0.731915725	3000	3.477121
0.236784141	-0.625647389	3600	3.556303

➤ Perhitungan nilai k

$$y = -0.625647389 - (-1.102768643) = 0.477121$$

$$x = 3.556303 - (2.778151) = 0.778151$$

$$m = \frac{y}{x} = \frac{0.477121}{0.778151} = 0.613147193$$

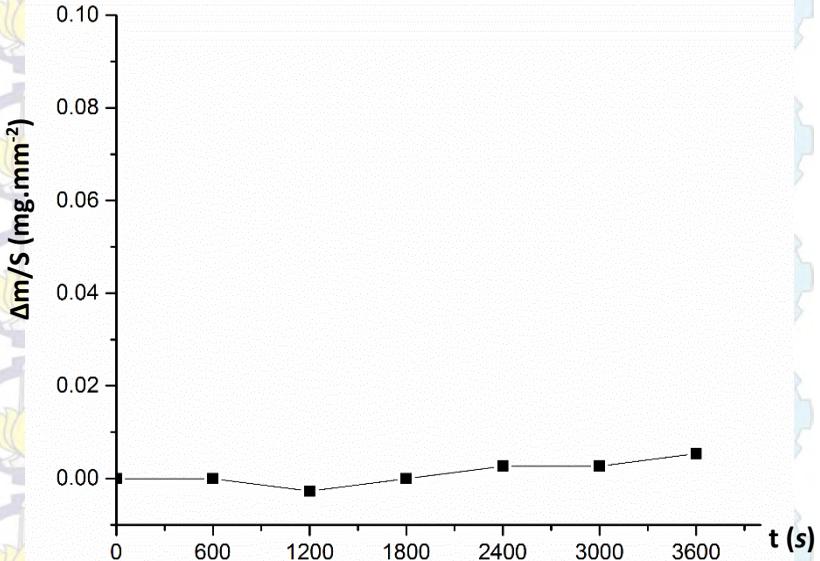
$$c = 0.613147193 - (3.556303 \times 0.613147193) = -2.806$$

$$k = 10^{(c/m)} = 2.65 \times 10^{-5} \text{ mg.mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



2. Kinetika Weld Overlay inconel 625

➤ Temperatur 500 °C



Gambar 4. Kurva oksidasi *weld overlay* inconel 625 pada temperatur 500 °C selama 1 jam

➤ Data Perubahan massa

	m (mg)	S (mm ²)	Δm (mg)	$\Delta m/S$ (mg.mm ⁻²)
M.awal	148.7			
m0	148.7	37.2	0.001	0.001
m1	148.7	37.2	0	0
m2	148.6	37.2	-0.1	-0.002688172
m3	148.7	37.2	0	0
m4	148.8	37.2	0.1	0.002688172
m5	148.8	37.2	0.1	0.002688172
m6	148.9	37.2	0.2	0.005376344



➤ Perhitungan Fungsi Log

$\Delta m/S$ ($mg \cdot mm^{-2}$)	$\log [\Delta m/S$ ($mg \cdot mm^{-2}$)]	t (s)	Log t
0.001	-3	0.1	-1
0		600	2.778151
-0.002688172		1200	3.079181
0		1800	3.255273
0.002688172	-2.57054294	2400	3.380211
0.002688172	-2.57054294	3000	3.477121
0.005376344	-2.269512944	3600	3.556303

➤ Perhitungan nilai k

$$y = -2.269512944 - (-3) = 0.730487$$

$$x = 3.556303 - (-1) = 4.556303$$

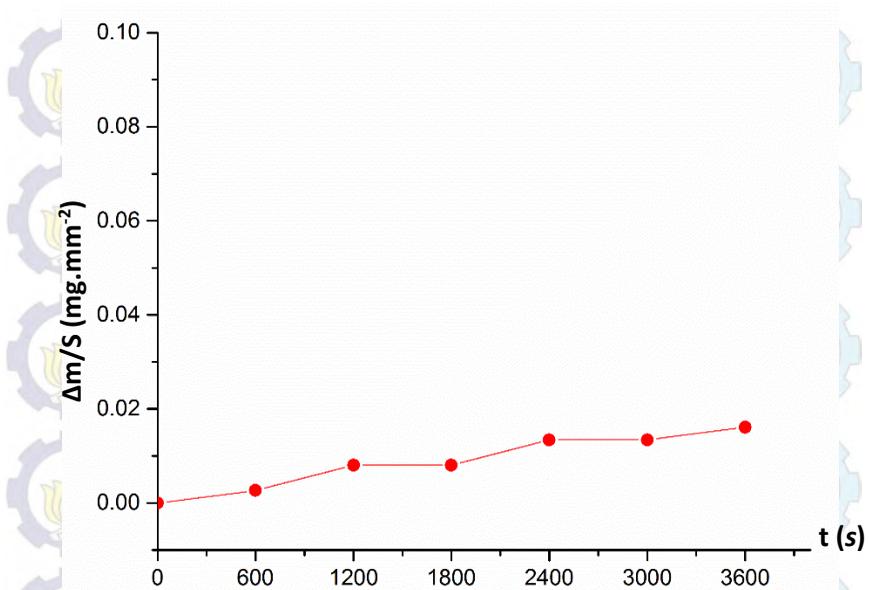
$$m = \frac{y}{x} = \frac{0.730487}{4.556303} = 0.160325$$

$$c = -2.269512944 - (3.556303 \times 0.160325) = -2.83968$$

$$k = 10^{(c/m)} = 1.9a \times 10^{-18} \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



➤ Temperatur 700 °C



Gambar 5. Kurva oksidasi *weld overlay* inconel 625 pada temperatur 700 °C selama 1 jam

➤ Data Perubahan massa

	m (mg)	S (mm ²)	Δm (mg)	Δm/S (mg.mm ⁻²)
M.awal	148.5			
m0	148.5	37.2	0.001	0.001
m1	148.6	37.2	0.1	0.002688172
m2	148.8	37.2	0.3	0.008064516
m3	148.8	37.2	0.3	0.008064516
m4	149	37.2	0.5	0.01344086
m5	149	37.2	0.5	0.01344086
m6	149.1	37.2	0.6	0.016129032



➤ Perhitungan Fungsi Log

$\Delta m/S$ ($mg \cdot mm^{-2}$)	$\log [\Delta m/S$ ($mg \cdot mm^{-2}$)]	t (s)	Log t
0.001	-3	0.1	-1
0.002688172	-2.57054294	600	2.778151
0.008064516	-2.093421685	1200	3.079181
0.008064516	-2.093421685	1800	3.255273
0.01344086	-1.871572936	2400	3.380211
0.01344086	-1.871572936	3000	3.477121
0.016129032	-1.792391689	3600	3.556303

➤ Perhitungan nilai k

$$y = -1.792391689 - (-3) = 1.207608$$

$$x = 3.556303 - (-1) = 4.556303$$

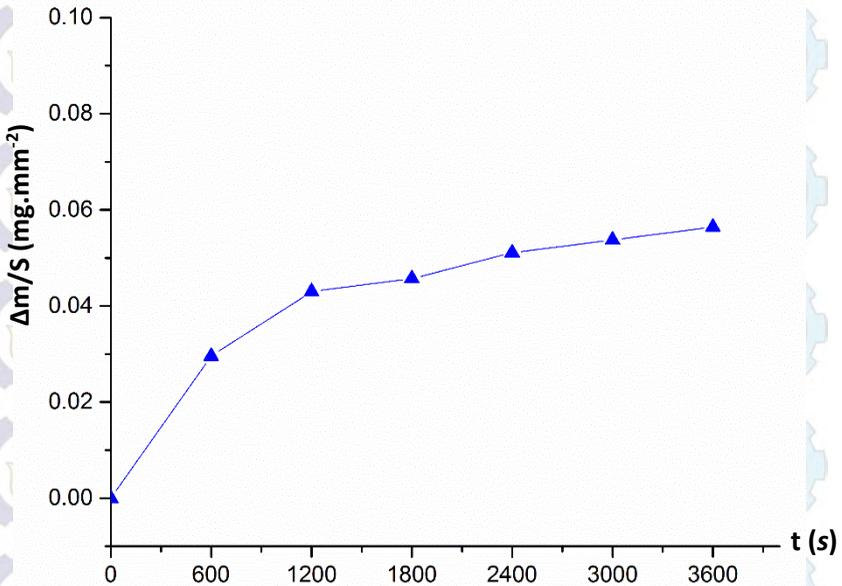
$$m = \frac{y}{x} = \frac{1.207608}{4.556303} = 0.265041$$

$$c = -1.792391689 - (3.556303 \times 0.265041) = -2.73496$$

$$k = 10^{(c/m)} = 4.8 \times 10^{-11} \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



➤ Temperatur 900 °C



Gambar 6. Kurva oksidasi *weld overlay* inconel 625 pada temperatur 900 °C selama 1 jam

➤ Data Perubahan massa

	m (mg)	S (mm²)	Δm (mg)	Δm/S (mg.mm⁻²)
M.awal	145.9			
m0	146	37.2	0	0.001
m1	147.1	37.2	1.1	0.029569892
m2	147.6	37.2	1.6	0.043010753
m3	147.7	37.2	1.7	0.045698925
m4	147.9	37.2	1.9	0.051075269
m5	148	37.2	2	0.053763441
m6	148.1	37.2	2.1	0.056451613



➤ Perhitungan Fungsi Log

$\Delta m/S$ ($mg \cdot mm^{-2}$)	$\log [\Delta m/S$ ($mg \cdot mm^{-2}$)]	T	Log t
0.001	-3	0.1	-1
0.029569892	-1.529150255	600	2.778151
0.043010753	-1.366422957	1200	3.079181
0.045698925	-1.340094019	1800	3.255273
0.051075269	-1.291789339	2400	3.380211
0.053763441	-1.269512944	3000	3.477121
0.056451613	-1.248323645	3600	3.556303

➤ Perhitungan nilai k

a) *First Stage*

$$y = -1.366422957 - (-3) = 1.633577$$

$$x = 3.079181 - (-1) = 4.079181$$

$$m = \frac{y}{x} = \frac{1.633577}{4.079181} = 0.400466894$$

$$c = -1.366422957 - (3.079181 \times 0.400466894) = -2.6$$

$$k = 10^{(c/m)} = 3.226 \times 10^{-7} \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

b) *Second Stage*

$$y = -1.248323645 - (-1.366422957) = 0.118099$$

$$x = 3.079181 - (-1) = 4.079181$$

$$m = \frac{y}{x} = \frac{0.118099}{4.079181} = 0.247524735$$

$$c = -1.248323645 - (3.556303 \times 0.247524735) = -2.129$$

$$k = 10^{(c/m)} = 2.514 \times 10^{-9} \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$



LAMPIRAN B PERHITUNGAN ENERGI AKTIVASI

- **Persamaan Arrhenius**

$$K = A e^{\frac{E_a}{RT}}$$

$$\ln K = \ln A - (E_a/RT)$$

$$\ln K = -\frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} - \ln A \quad \leftrightarrow \quad y = mx + c$$

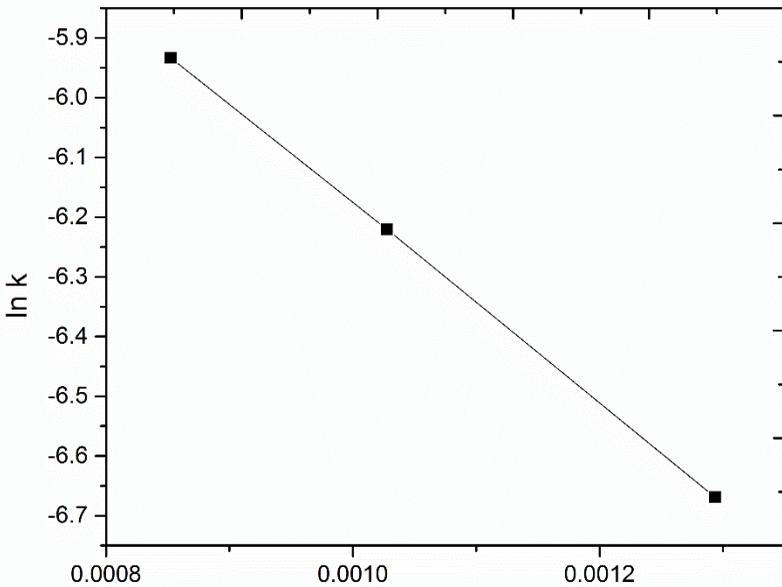
1. **Baja API 5L grade X52**

- Data perhitungan $\ln K$ dan $\frac{1}{T}$

K	$\ln K$	T	$1/T$
0.001269711	-6.668966212	773	0.001294
0.001987596	-6.220829631	973	0.001028
0.002650395	-5.933046699	1173	0.000853

- Perhitungan nilai **m**

y	x	m
0.735919514	-0.000441146	-1668.2



- Perhitungan E_a

$$m = -\frac{E_a}{R}$$

$$E_a = -(m \times R)$$

$$E_a = -(-1668,2 \times 8,314)$$

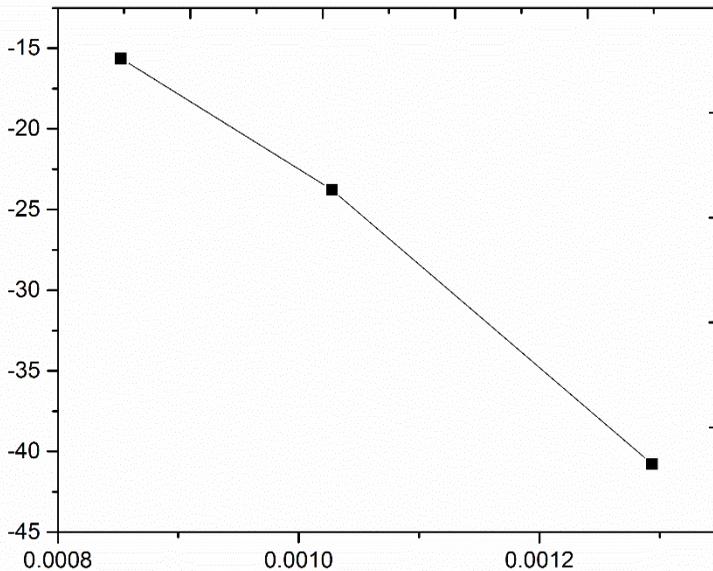
$$E_a = 13869,40575 \text{ J/mol K} = \mathbf{13,869 \text{ KJ/mol K}}$$



2. Weld Overlay inconel 625

- Data perhitungan $\ln K$ dan $\frac{1}{T}$

k	ln k	T	1/T
1.94068E-18	-40.78349344	773	0.001294
4.79743E-11	-23.76035467	973	0.001028
1.62587E-07	-15.6320532	1173	0.000853



- Perhitungan nilai m

y	x	m
25.15144024	-0.000441146	-57013.9



- Perhitungan E_a

$$m = -\frac{E_a}{R}$$

$$E_a = -(m \times R)$$

$$E_a = -(-57013,9 \times 8,314)$$

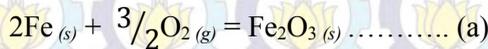
$$E_a = 474013,1543 \text{ J/mol K} = \mathbf{474,013 \text{ kJ/mol K}}$$



LAMPIRAN C

PERHITUNGAN PERUBAHAN ENERGI BEBAS GIBBS (ΔG)

1. Oksida Besi – Fe_2O_3



• **Diketahui :**

- $\Delta H^\circ_{298, \text{Fe}_2\text{O}_3(s)} = -836800 \text{ J/mol}$
- $S^\circ_{298, \text{Fe}_2\text{O}_3(s)} = 89,9 \text{ J/K mol}$
- $S^\circ_{298, \text{Fe}(s)} = 27,2 \text{ J/K mol}$
- $S^\circ_{298, \text{O}_2(g)} = 205,09 \text{ J/K mol}$
- $C_p, \text{Fe}_2\text{O}_3(s) = -155,71 \text{ J/Kmol}$
- $C_p, \text{Fe}_{\alpha(s)} = 37,12 + 6,17 \times 10^{-3} \text{ T J/K mol}$
- $C_p, \text{O}_2(g) = 29,96 + 4,18 \times 10^{-3} \text{ T} - 1,67 \times 10^5 \text{ T}^{-2} \text{ J/Kmol}$

• **Penyelesaian :**

- $\Delta H^\circ_{298, (a)} = -836800 \text{ J/mol}$
- $\Delta S^\circ_{298, (a)} = 89,9 - (2 \times 27,2) - (\frac{3}{2} \times 205,09)$
 $= -272,135 \text{ J/K mol}$
- $\Delta C_p = -155,71 - 2(37,12 + 6,17 \times 10^{-3} \text{ T}) - \frac{3}{2}(29,96 + 4,18 \times 10^{-3} \text{ T} - 1,67 \times 10^5 \text{ T}^{-2})$
- $\Delta C_p = (-275,05 - 18,71 \times 10^{-3} \text{ T} + 2,505 \times 10^5 \text{ T}^{-2}) \text{ J/K mol}$

Pada temperatur 500°C (773 K),

$$\Delta H^\circ_{773, (a)} = -836800 + \int_{298}^{773} (-275,05 - 18,71 \times 10^{-3} \text{ T} + 2,505 \times 10^5 \text{ T}^{-2}) dT$$

$$\Delta H^\circ_{773, (a)} = -972259,53 \text{ J}$$

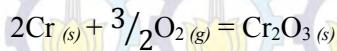


$$\Delta S^{\circ}_{773, (a)} = -272,135 + \int_{298}^{773} \frac{-275,05 - 18,71 \times 10^{-3} T + 2,505 \times 10^5 T^{-2}}{T} dT$$

$$\Delta S^{\circ}_{773, (a)} = -545,592 \text{ J/K}$$

$$\begin{aligned} \Delta G^{\circ}_{773, (a)} &= -972259,53 + (773 \times -545,592) \\ &= -1394002,2 \text{ J} = -1394,002 \text{ kJ} \end{aligned}$$

2. Oksida Kromium – Cr₂O₃



- **Diketahui :**

Berdasarkan tabel lampiran A (*Appendices A: Selected Thermodynamic and Thermochemical Data*) (Gaskell, 2003)

$$\Delta G^{\circ}, \text{Cr}_2\text{O}_{3(s)} = -1110100 + 247,3 T \text{ ..}(298 < T < 1793 \text{ K})$$

Sehingga pada temperatur 500 °C (773 K),

$$\Delta G^{\circ}_{773}, \text{Cr}_2\text{O}_{3(s)} = -1110100 + (247,3 \times 773)$$

$$\Delta G^{\circ}_{773}, \text{Cr}_2\text{O}_{3(s)} = -918937,1 \text{ J} = -918,937 \text{ kJ}$$

Dan pada temperatur 900 °C (1173 K),

$$\Delta G^{\circ}_{1173}, \text{Cr}_2\text{O}_{3(s)} = -1110100 + (247,3 \times 1173)$$

$$\Delta G^{\circ}_{1173}, \text{Cr}_2\text{O}_{3(s)} = -820017,1 \text{ J} = -820,017 \text{ kJ}$$



3. Oksida Besi Kromium – FeCr₂O₄



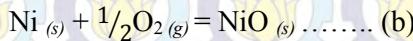
Dari data diatas maka bisa dihitung secara langsung,

$$\Delta G^{\circ}_{773}, 2\text{FeCrO}_4 (s) = \Delta G^{\circ}_{773}, \text{Fe}_2\text{O}_3 (s) + \Delta G^{\circ}_{773}, \text{Cr}_2\text{O}_3 (s)$$

$$\Delta G^{\circ}_{773}, 2\text{FeCrO}_4 (s) = -1394,002 + -918,937 \text{ kJ}$$

$$\Delta G^{\circ}_{773}, 2\text{FeCrO}_4 (s) = -2312,939 \text{ kJ}$$

4. Oksida Nikel - NiO



- **Diketahui :**

- $\Delta H^{\circ}_{298}, \text{NiO} (s) = -240580 \text{ J/mol}$

- $S^{\circ}_{298}, \text{NiO} (s) = 38,07 \text{ J/K mol}$

- $S^{\circ}_{298}, \text{Ni} (s) = 29,79 \text{ J/K mol}$

- $S^{\circ}_{298}, \text{O}_2 (g) = 205,09 \text{ J/K mol}$

- $C_p, \text{NiO} (s) = 54,01 \text{ J/Kmol}$

- $C_p, \text{Ni} (s) = 25,23 + 43,68 \times 10^{-6} T^2 - 10,46 \times 10^{-3} T$
J/K mol

- $C_p, \text{O}_2 (g) = 29,96 + 4,18 \times 10^{-3} T - 0,4 \times 10^5 T^{-2} \text{ J/Kmol}$

- **Penyelesaian :**

- $\Delta H^{\circ}_{298}, (b) = -240580 \text{ J/mol}$

- $\Delta S^{\circ}_{298}, (b) = 38,07 - 29,79 - (\frac{1}{2} \times 205,09)$
 $= -94,265 \text{ J/K mol}$

- $\Delta C_p = 54,01 - (25,23 + 43,68 \times 10^{-6} T^2 - 10,46 \times 10^{-3} T)$
 $- \frac{1}{2}(29,96 + 4,18 \times 10^{-3} T - 0,4 \times 10^5 T^{-2})$

- $\Delta C_p = (13,8 - 43,68 \times 10^{-6} T^2 + 8,37 \times 10^{-3} T + 0,2 \times 10^5 T^{-2}) \text{ J/K mol}$



Pada temperatur 900 °C (1173 K),

$$\Delta H^{\circ}_{1173, (b)} = -240580 + \int_{298}^{1173} (13,8 - 43,68 \times 10^{-6} T^2 + 8,37 \times 10^{-3} T + 0,2 \times 10^5 T^{-2}) dT$$

$$\Delta H^{\circ}_{1173, (b)} = -246182,34 \text{ J}$$

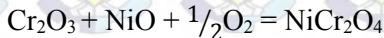
$$\Delta S^{\circ}_{1173, (b)} = -272,135 +$$

$$\int_{298}^{1173} \frac{13,8 - 43,68 \times 10^{-6} T^2 + 8,37 \times 10^{-3} T + 0,2 \times 10^5 T^{-2}}{T} dT$$

$$\Delta S^{\circ}_{1173, (b)} = -96,248 \text{ J/K}$$

$$\Delta G^{\circ}_{1173, (b)} = -246182,34 + (1173 \times -96,248)$$
$$= -133283,47 \text{ J} = -133,283 \text{ kJ}$$

5. Oksida Nikel Kromium – NiCr₂O₄



Dari data diatas maka bisa dihitung secara langsung,

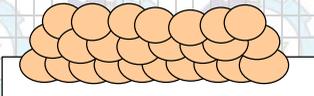
$$\Delta G^{\circ}_{1173, \text{NiCr}_2\text{O}_4 (s)} = \Delta G^{\circ}_{1173, \text{NiO} (s)} + \Delta G^{\circ}_{1173, \text{Cr}_2\text{O}_3 (s)}$$

$$\Delta G^{\circ}_{1173, \text{NiCr}_2\text{O}_4 (s)} = -133,283 + -820,017 \text{ kJ}$$

$$\Delta G^{\circ}_{1173, \text{NiCr}_2\text{O}_4 (s)} = -953,3 \text{ kJ}$$



LAMPIRAN D
WELDING PROCEDURE AND SPECIFICATIONS
(WPS) PENGELASAN OVERLAY

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)									
(MAIN PROCEDURE)									
<i>(In Accordance to API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities - Reaffirmed, April 2010)</i>									
Page 1 of 2									
Company	: PT. REKAYASA INDUSTRI								
WPS No.	: 004/WPS/API 1104/2014			Supporting PQR No.(s)	: To be welded				
Date	: May 07 th , 2014			Date	:				
Revision No.	: 0			Type	: Manual				
Welding Process(s)	: GTAW			Test Code	: API 1104				
Type of	: Fillet Weld			Test Coupon	Diameter	: 8" (219,1 mm)			
					Thickness	: 0.25 (6.35 mm)			
									
Material Spec.	: API 5L Gr. X52 to API 5L Gr. X52				Position	: Fixed (5F)			
					Weld Progression	: Horizontal			
Diameter Qualified	: All Diameter								
Material Group	: SMYS greater than 42.000 psi but less than 65.000 psi								
Thickness Qualified	: Min 3 mm								
FILLER METALS					GTAW				
AWS No.	: ERNiCrMo-3								
SFA No.	: A5.14								
Group No.	: -								
Size of Filler Metal	: Ø 2.4 - 3.2 mm								
Maximum Width of Weave	: 2x Electrode Diameter								
Trade Name	: See Attach								
Pass No.	Welding Process	Filler - Metal Class	Dia. (mm)	Class	Polarity	Amps.	Volt Range	Travel Speed mm / min.	Heat Input KJ/mm
1st	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4 / 3.2	DC	DC-SP	80 - 175	15 - 20	50 - 80	0,54 - 2,52
2nd	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4 / 3.2	DC	DC-SP	80 - 175	15 - 20	50 - 80	0,54 - 2,52
3rd	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4 / 3.2	DC	DC-SP	80 - 175	15 - 20	50 - 80	0,54 - 2,52
GAS									
Shielding Gas	: Argon 99.99%								
Flow Rate	: 7 - 15 L/min								
Gas Backing	: N/A								

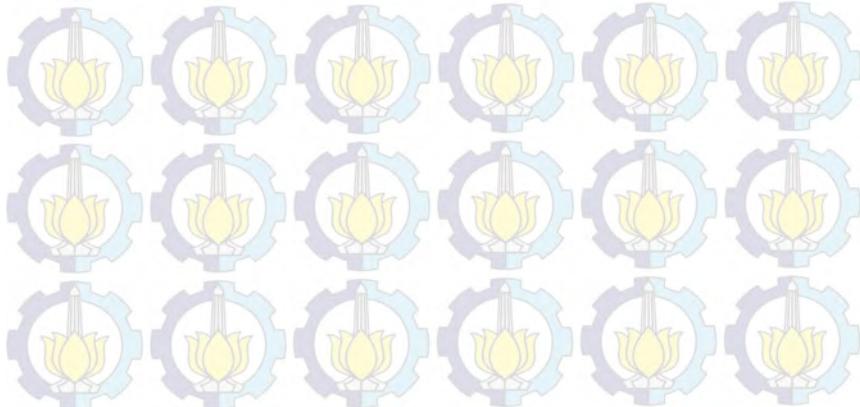


WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)

(MAIN PROCEDURE)

(In Accordance to API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities - Reaffirmed, April 2010)

WPS No. : 004/WPS/API 1104/2014		Page 2 of 2
TECHNIQUE		
No. of welder	:	1 (one)
Stringer or Weave Bead	:	Weave Multi Passes (Max. Weave Width = 2x Electrode Diameter)
No. of Beads	:	See Typical Squence of Bead
Cleaning Method	:	Power Grinder & Wire Brush
Type of Alignment Device	:	N/A
Type Removal of Clamp	:	N/A
Time Between Passes (Max)	:	N/A
Interpass Temperature (Max)	:	Max 75 deg C
Stress Relief	:	N/A
Shielding Flux	:	N/A
Travel Speed	:	50 - 80 mm/min
Methode of Defect Removal	:	Grinding
NDT Methode	:	Penetrant 100%
Other	:	N/A
PREHEAT		POST WELD HEAT TREATMENT
Preheat Temperature	:	For Moisture Removal
Method of Heating	:	N/A
Monitor Method	:	N/A
POST HEAT		Temperature Range
N/A		Time Range
		Other
		-
<i>Prepared by,</i>	<i>Reviewed by,</i>	<i>Approved by,</i>
PT. REKAYASA INDUSTRI	<i>Third Party Inspection</i> PT. PJ-TEK MANDIRI	MIGAS





LAMPIRAN E

FILLER ROD INCONEL 625 SPECIFICATIONS

Techalloy Inc.
2310 Chesapeake Ave.
Baltimore, Maryland
21222-4098
Phone: (410) 633-9300



CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT

SOLD TO:
ALLALLOY DYNAWELD PTE LTD
120 PIONEER ROAD
SINGAPORE 639597
SINGAPORE

Quality Certificate

Date
10.04.2013
Purchase order item/date
P20130371
Delivery item/date
B04543074 900007 / 05.03.2013
Order item/date
5816533 000030 / 28.02.2013
Customer number
96227

SHIP TO:
ALLALLOY DYNAWELD PTE LTD
120 PIONEER ROAD
SINGAPORE 639597
SINGAPORE

Material: TG625093638
Description: 3/32 TECHALLOY 625 30CT/10#TB
LOT (W/O): 0013309895

Quantity: 2,310.000 LB
Heat: QN964

Specifications/Spec Class: AWS A5.14, ASME SPA-5.14 ERNiCrMo-3
Certified by CWB to AWS A5.14

Country of Origin: FRANCE

Characteristic	Unit	Value	Characteristic	Unit	Value
Chemical Analysis			Mechanical Analysis		
Carbon (C)	%	0.017	TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES TENSILE: 114.5 KSI YIELD: 85.0 KSI ELONGATION: 35.0 % T.O.E. < 50%		
Manganese (Mn)	%	0.030			
Phosphorus (P)	%	0.002			
Sulfur (S)	%	0.001			
Silicon (Si)	%	0.042			
Chromium (Cr)	%	21.860			
Nickel (Ni)	%	64.760			
Molybdenum (Mo)	%	8.960			
Copper (Cu)	%	0.012			
Iron (Fe)	%	0.220			
Titanium (Ti)	%	< 0.001			
Aluminium (Al)	%	0.086			
Niobium + Tantalum (N)	%	3.645			
Cobalt (Co)	%	0.054			

* (QUALITY SYSTEM-CERTIFICATES TYPE 3.1 AS IN EN10204. MATERIAL MANUFACTURED IN ACCORDANCE WITH A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM CERTIFIED TO ISO 9001:2008, ISI MANAGEMENT SYSTEM-CERTIFICATION NO. FM 64223)

I certify the chemical analysis and physical and mechanical test results reported above are correct as contained in the records of the company.

Very truly yours,

Perry Canning
Authorized Signature

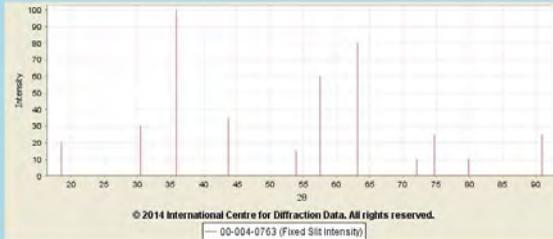


LAMPIRAN F STANDAR DATA DIFRAKSI ICDD

1. PDF Number 00-004-0763

PDF Card

PDF Number	00-004-0763	Status	Deleted	Quality Mark	Blank (B)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Ni Cr ₂ O ₄				
Structural Formula					
Empirical Formula	Cr ₂ Ni O ₄				
Weight %	Cr45.88 Ni25.89 O28.23				
Atomic %	Cr28.57 Ni14.29 O57.14				
Compound Name	Nickel Chromium Oxide				
ANX					
Mineral Name	Nichromite, syn (NR)				
Also Called					



00-004-0763 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
18.5078	4.790000	20	1	1	1				
30.4837	2.930000	30	2	2	0				
35.8910	2.500000	100	3	1	1				
43.6923	2.070000	35	4	0	0				
53.8863	1.700000	15	4	2	2				
57.5570	1.600000	60	5	1	1				
63.2019	1.470000	80	4	4	0				
72.0304	1.310000	10	6	2	0				
74.6766	1.270000	25	5	3	3				
79.8673	1.200000	10	4	4	4				
90.9954	1.080000	25	7	3	1				

© 2014 International Centre for Diffraction Data. All Rights Reserved



2. PDF Number 00-004-0835





3. PDF Number 00-002-1046

PDF Card

PDF Number	00-002-1046	Status	Deleted	Quality Mark	Indexed (I)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr ₂ O ₃ · NiO				
Structural Formula					
Empirical Formula	Cr ₂ NiO ₄				
Weight %	Cr45.88 Ni25.89 O28.23				
Atomic %	Cr28.57 Ni14.29 O57.14				
Compound Name	Chromium Nickel Oxide				
ANX					
Mineral Name	Chromite				
Also Called					

© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.
 — 00-002-1046 (Fixed Slit Intensity)

00-002-1046 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
30.3775	2.940000	80	2	2	0				
35.7431	2.510000	100	3	1	1				
43.4716	2.080000	80	4	0	0				
53.8863	1.700000	80	4	2	2				
57.5570	1.600000	100	5	1	1				
63.2019	1.470000	100	4	4	0				
71.4006	1.320000	40	6	2	0				
74.6766	1.270000	40	5	3	3				

© 2014 International Centre for Diffraction Data. All Rights Reserved

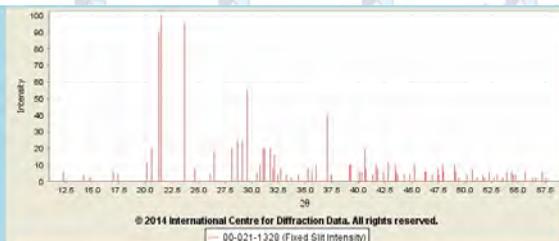


4. PDF Number 00-004-0850





5. PDF Number 00-021-1328



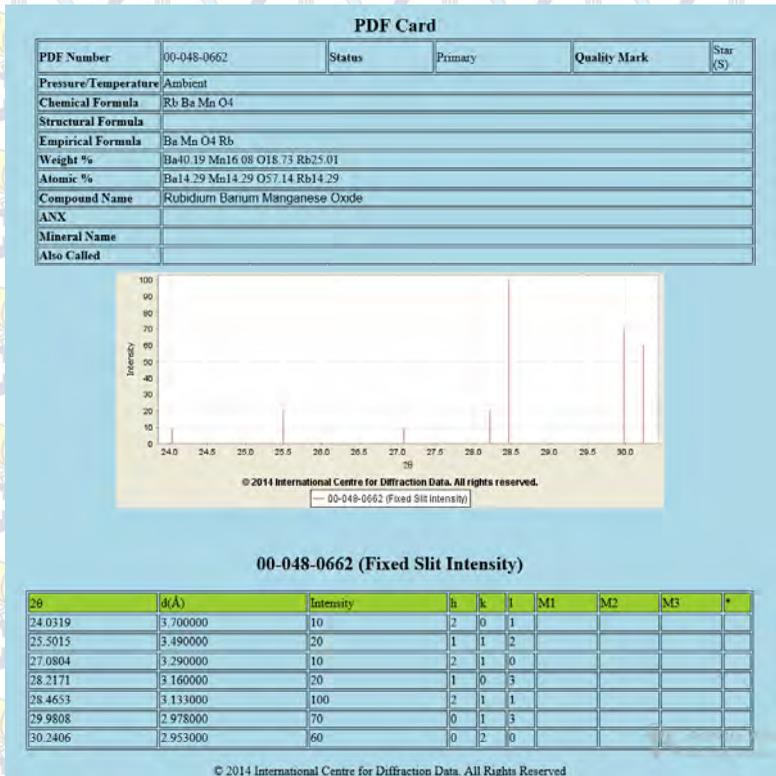
00-021-1328 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
12.2829	7.200000	6	1	1	0				
14.2045	6.230000	4	0	2	0				
14.7520	6.000000	2	0	0	1				
16.9388	5.230000	6	-1	1	1				
17.4290	5.084000	4	1	2	0				
20.0909	4.416000	12	2	0	0				
20.5518	4.318000	20	0	2	1				
21.2586	4.176000	90	1	1	1				
21.4509	4.139000	100	-2	0	1				
23.6811	3.754000	95	1	3	0				
46.9418	1.934000	4	-3	4	2				
47.4097	1.916000	8	0	5	2				
47.5413	1.911000	4	4	0	1				
47.8605	1.899000	10	3	4	1				
47.9409	1.896000	6	-3	1	3				
49.0132	1.857000	10	-1	3	3				
49.0977	1.854000	6	-2	6	1				
49.4103	1.843000	2	-4	4	1				
50.1659	1.817000	4	-5	1	1				
50.6428	1.801000	8	4	4	0				
51.1600	1.784000	2	3	2	2				
51.6256	1.769000	4	1	2	3				
51.8459	1.762000	2	-5	2	1				
52.2603	1.749000	6	5	1	0				
52.7143	1.735000	2	4	3	1				
52.9775	1.727000	4	3	5	1				
53.5459	1.710000	2	-2	4	3				
53.9205	1.699000	6	3	3	2				
54.3704	1.686000	6	1	3	3				
54.5104	1.682000	4	-2	6	2				
54.7573	1.675000	4	-4	2	3				
55.6383	1.650000	6	2	7	0				
56.2889	1.633000	2	-3	4	3				
56.5909	1.625000	2	5	3	0				
57.2053	1.609000	6	-5	3	2				
57.6358	1.598000	2	3	4	2				

© 2014 International Centre for Diffraction Data. All Rights Reserved

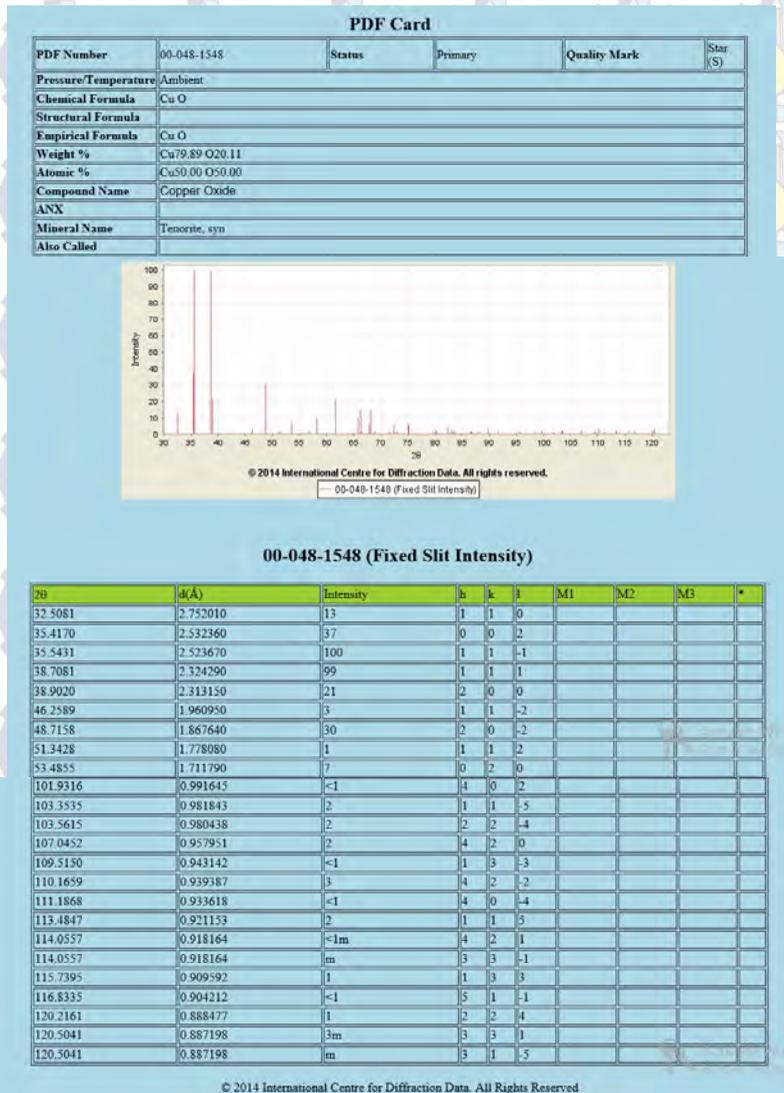


6. PDF Number 00-048-0662



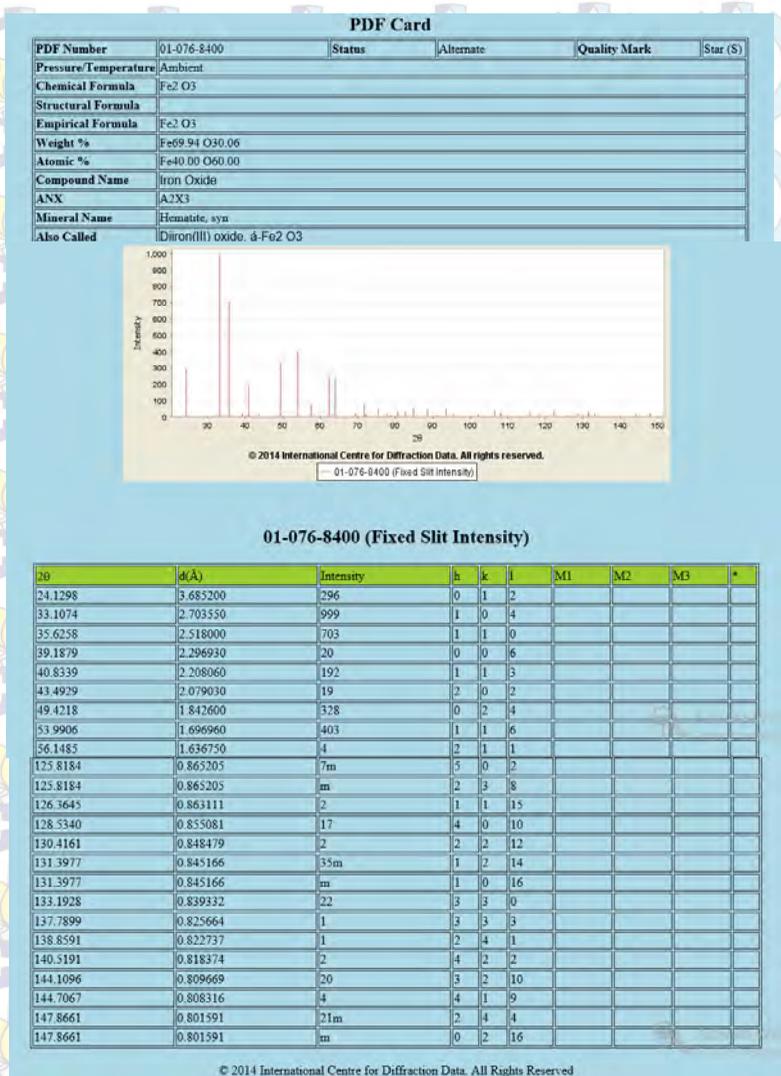


7. PDF Number 00-048-1548



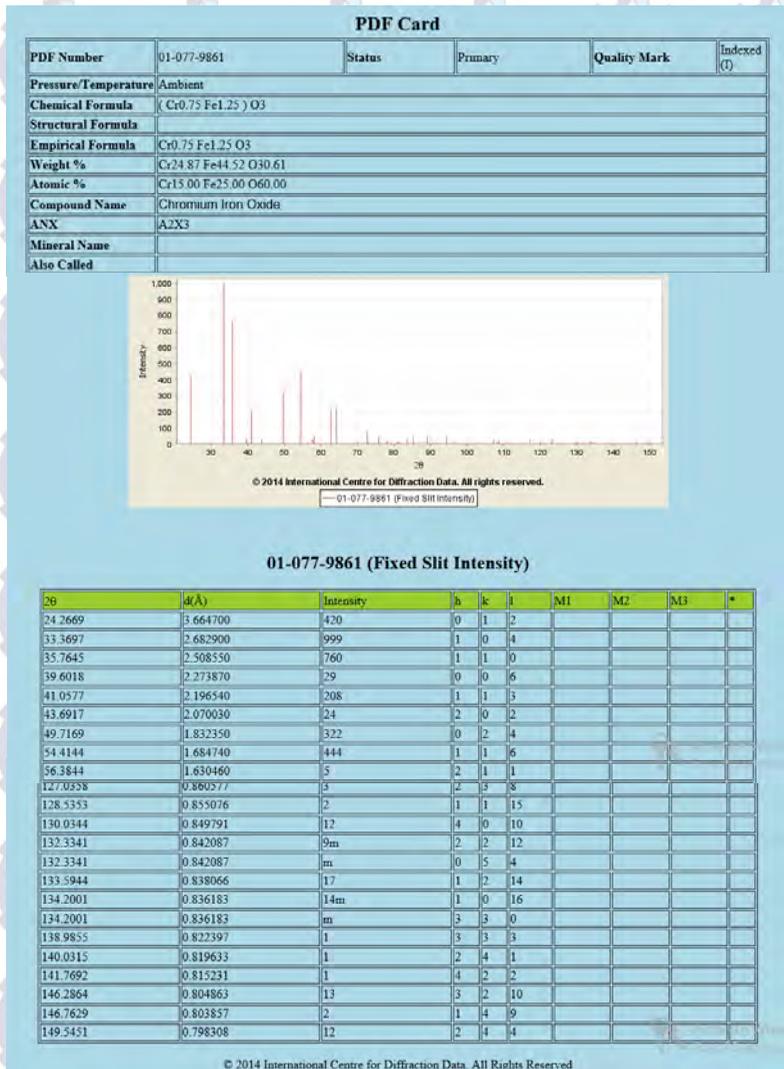


8. PDF Number 01-076-8400



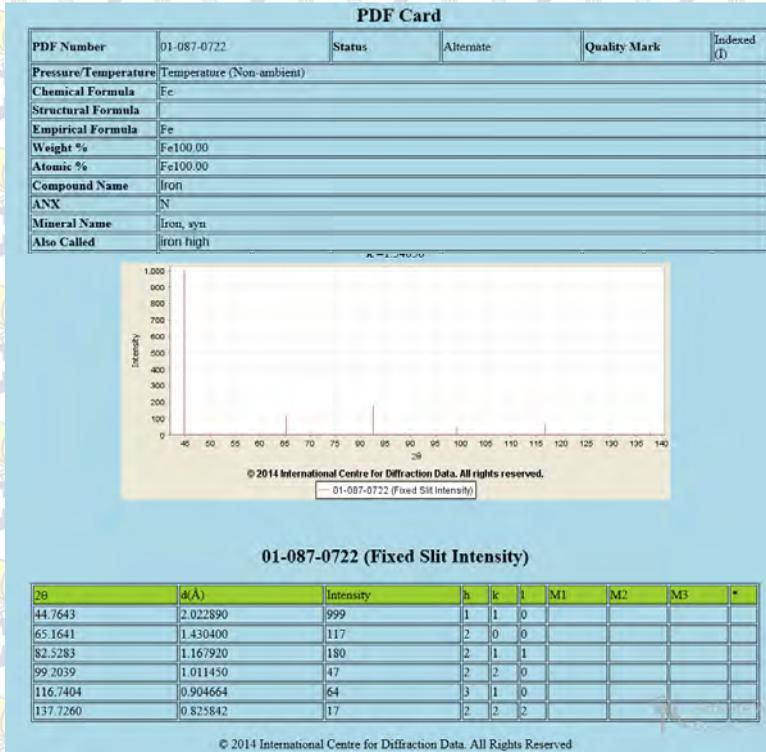


9. PDF Number 01-077-9861





10. PDF Number 01-087-0722

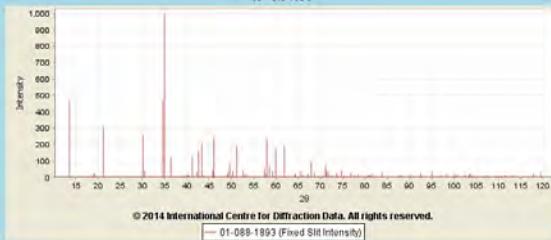




11. PDF Number 01-088-1893

PDF Card

PDF Number	01-088-1893	Status	Primary	Quality Mark	Star (S)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Mg4.76 Fe1.88 Cr.64 Al.06 Ti.66 O4 (B.985 Si.015 O3)4				
Structural Formula					
Empirical Formula	Al0.06 B3.94 Cr0.64 Fe1.88 Mg4.76 O16 Si0.06 Ti0.66				
Weight %	Al0.28 B7.25 Cr5.66 Fe17.87 Mg19.69 O43.58 Si0.29 Ti5.38				
Atomic %	Al0.21 B14.07 Cr2.29 Fe6.71 Mg17.00 O57.14 Si0.21 Ti2.36				
Compound Name	Magnesium Iron Chromium Aluminum Titanium Boron Silicon Oxide				
ANX	ABCX4				
Mineral Name	Warwickite Fe,Cr-rich				
Also Called	magnesium iron(III) chromium aluminum titanium silicoborate				



01-088-1893 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
13.4553	6.575160	470	1	0	1				
18.9244	4.685500	15	0	0	2				
19.2204	4.614000	23	2	0	0				
21.2493	4.177810	311	1	0	2				
27.1007	3.287580	2	2	0	2				
30.1804	2.958750	258	1	0	3				
30.4897	2.929440	39m	0	1	1				
30.4897	2.929440	m	3	0	1				
113.4595	0.921286	m	7	2	4				
113.8553	0.919208	2	8	2	1				
114.8123	0.914268	1	2	2	8				
116.2502	0.907062	2m	4	1	9				
116.2502	0.907062	m	5	0	9				
116.4215	0.906221	1	8	2	2				
117.4341	0.901320	4	0	3	5				
117.8708	0.899244	21m	9	0	5				
117.8708	0.899244	m	4	3	3				
118.3375	0.897051	7	1	3	5				
118.4719	0.896424	7	3	0	10				
118.9989	0.895986	3	5	3	1				
119.4242	0.892042	26m	6	1	8				
119.4242	0.892042	m	1	1	10				

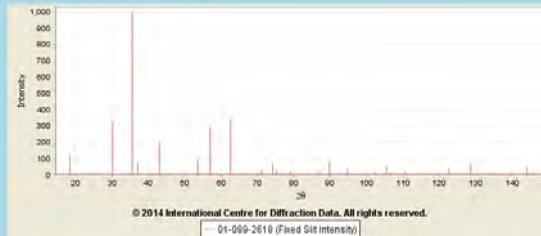
© 2014 International Centre for Diffraction Data. All Rights Reserved



12. PDF Number 01-089-2618

PDF Card

PDF Number	01-089-2618	Status	Alternate	Quality Mark	Indexed (I)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Fe Cr ₂ O ₄				
Structural Formula					
Empirical Formula	Cr ₂ Fe O ₄				
Weight %	Cr46.46 Fe24.95 O28.59				
Atomic %	Cr28.57 Fe14.29 O57.14				
Compound Name	Iron Chromium Oxide				
ANX	AB ₂ X ₄				
Mineral Name	Chromite, syn				
Also Called	iron dichromium oxide				



01-089-2618 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
18.3263	4.837040	117	1	1	1				
30.1458	2.962070	323	2	2	0				
35.5083	2.526060	999	3	1	1				
37.1435	2.418520	69	2	2	2				
43.1555	2.094500	196	4	0	0				
47.2516	1.922040	1	3	3	1				
53.5408	1.710150	87	4	2	2				
57.0755	1.612350	293	5	1	1				
106.5513	0.961022	10	6	6	2				
110.6401	0.936689	16	8	4	0				
113.7794	0.919605	2	9	1	1				
114.8423	0.914115	1	8	4	2				
119.1926	0.893098	4	6	6	4				
122.5793	0.878253	36	9	3	1				
128.5353	0.855076	64	8	4	4				
132.3544	0.842021	1	9	3	3				
139.3101	0.821530	14	8	6	2				
143.9949	0.809932	45	9	5	1				
145.6772	0.806173	11	10	2	2				

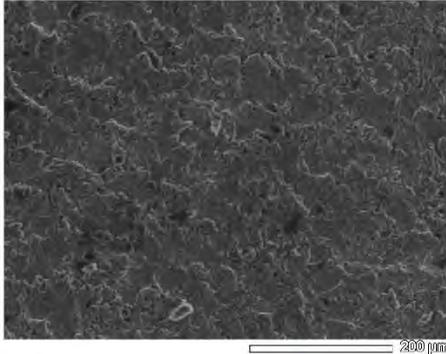
© 2014 International Centre for Diffraction Data. All Rights Reserved



LAMPIRAN G HASIL PENGUJIAN EDX

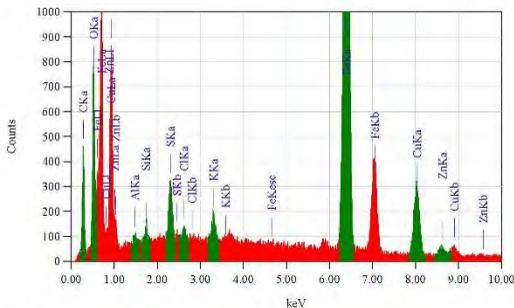
API 5L grade X52-UT

JOEL



Title : IM01

Instrument : 6510(LA)
Volt : 20,39 kV
Mag. : x 200
Date : 2014/07/19
Pixel : 512 x 384



Acquisition Parameter
Instrument : 6510(LA)
Acc. Voltage : 20,3 kV
Probe Current : 1,00000 nA
P/A mode : T3
Real Time : 51,56 sec
Live Time : 50,00 sec
Dead Time : 3 %
Counting Rate : 2951 cps
Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Element	(wt%)	Mass%	Sigma	Compound	Mass%	Cation
C K	0,277	0,27	0,28			8,3141
O F	0,525	12,76	0,21			15,0732
Al K	1,486	0,20	0,33			3,1170
Si F	1,719	0,35	0,33			3,2045
S F	2,387	1,02	0,33			1,0705
Cl K	2,621	0,25	0,32			0,3113
Fe K	3,312	0,58	0,33			9,7149
Fe K	6,398	74,24	0,35			84,5973
Cu K	8,040	3,29	0,21			10,3355
Zn F	8,630	1,12	0,10			1,2578
Total		100,00				

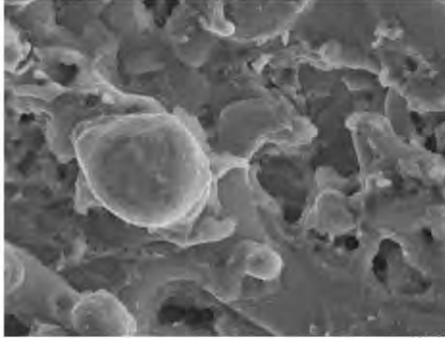
JED-2300 Analysis Station

JEOL

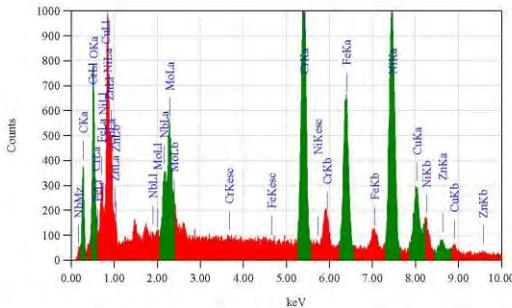


Inconel 625-UT

JOEL



Title : IMG1
 Instrument : 6510(LA)
 Volt : 20.00 kV
 Mag. : x 3,000
 Date : 2014/07/19
 Pixel : 512 x 384



Acquisition Parameter
 Instrument : 6510(LA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 51.51 sec
 Live Time : 50.00 sec
 Dead Time : 2 %
 Counting Rate : 2978 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.1291

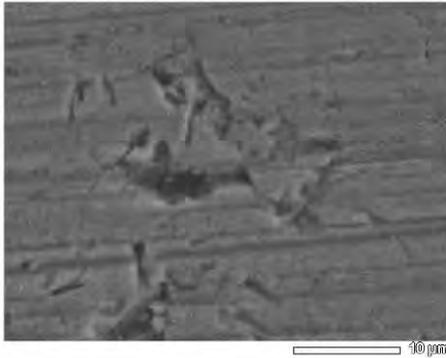
Element	(keV)	Mass%	Sigma	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	0.16	0.29				5.5019
O K	0.525	13.03	0.23				13.9458
Cr K	5.411	20.82	0.17				18.0015
Fe K	6.398	10.48	0.17				13.5805
Ni K	7.471	39.35	0.31				31.4003
Cu K	8.040	7.16	0.20				8.4365
Zn K	8.630	1.87	0.13				2.1681
Mo L	2.166	2.81	0.10				2.6651
Mo L	2.293	4.32	0.12				4.2403
Total		100.00					

JEO-2300 AnalysisStation

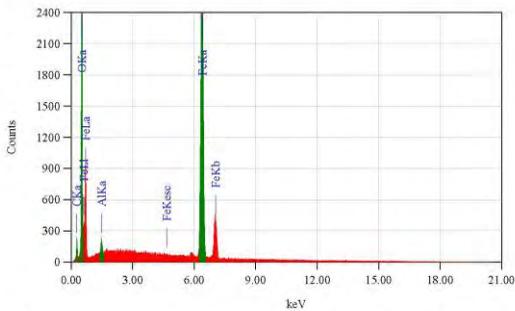
JEOL

API 5L grade X52-T

JOEL



Title : IMG1
Instrument : 6510(LA)
Volt : 20.00 kV
Mag. : x 3,000
Date : 2014/07/19
Pixel : 512 x 384



Acquisition Parameter
Instrument : 6510(LA)
Acc. Voltage : 20.0 kV
Probe Current : 1.00000 nA
PHA mode : T3
Real Time : 51.40 sec
Live Time : 50.00 sec
Dead Time : 2 %
Counting Rate : 2905 cps
Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.0927

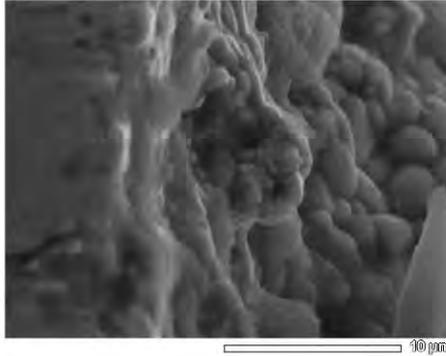
Element	(keV)	Mass%	Sigma	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	0.80	0.03				2.0710
O K	0.525	32.28	0.09				43.6750
Al K	1.486	0.78	0.03				0.3500
Fe K	6.398	64.14	0.14				53.9040
Total		100.00					

JED-2300 AnalysisStation

JEOL

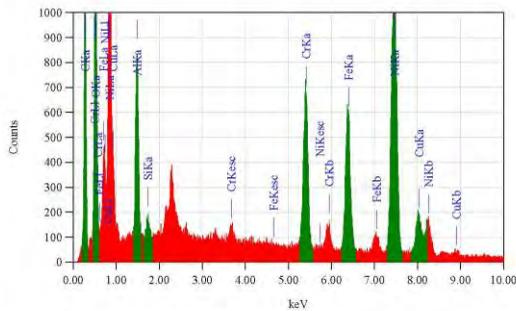


Inconel 625-T



JOEL

Title : IMG1
 -
 Instrument : 6510 (LA)
 Volt : 20.00 kV
 Mag. : x 5,000
 Date : 2014/07/19
 Pixel : 512 x 384



Acquisition Parameter
 Instrument : 6510 (LA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T3
 Real Time : 51.50 sec
 Live Time : 50.00 sec
 Dead Time : 3 %
 Counting Rate : 3269 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

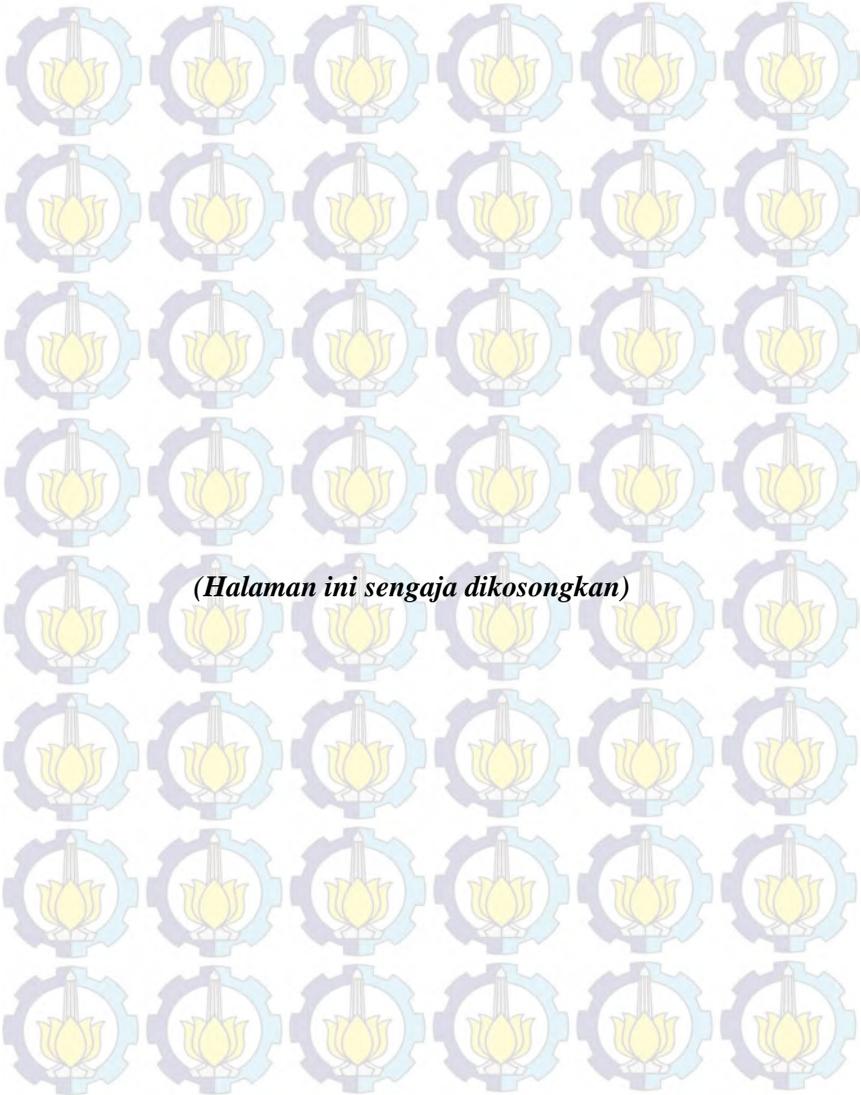
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.1052

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	0.33	0.26				16.3751
O K	0.525	38.24	0.28				30.2982
Al K	1.486	2.37	0.05				1.9801
Si K	1.739	0.20	0.02				0.2090
Cr K	5.411	16.37	0.09				8.4664
Fe K	6.398	6.34	0.10				10.0623
Ni K	7.471	31.10	0.22				28.3980
Cu K	8.040	3.05	0.11				4.3011
Total		100.00					

JED-2300 AnalysisStation

JEOL



BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Rizkiyan Ardi Nugroho dilahirkan di kota Malang pada tanggal 16 Juli 1992. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SDS Taman Muda Turen, SMP Negeri 1 Turen, dan SMA Negeri 1 Malang. Lulus SMA tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan perguruan tinggi dan diterima di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS dalam Departemen Riset dan Teknologi sebagai staff (2011-2012) dan sebagai ketua himpunan (2012-2013). Selama kuliah di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS, penulis juga pernah menjadi asisten laboratorium kimia analitik pada tahun 2012, dan Teknolo Pengelasan pada tahun 2013 serta asisten mata kuliah Termodinamika (2012). Penulis pernah melaksanakan Kerja Praktek di PT. Dirgantara Indonesia (Persero) selama 1 bulan dan penelitian tugas akhir di PT. Rekayasa Industri. Korosi dan Kegagalan Material menjadi bidang tugas akhir yang penulis ambil untuk meraih gelar sarjana teknik.

Email: ardi.ryan78@gmail.com