

**PERILAKU OKSIDASI *FERRO CAST DUCTILE* (FCD) 40 YANG  
DILAPISI Al-7wt.%Si DENGAN METODE CELUP PANAS PADA  
TEMPERATUR 750 °C**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**ALDI RIZALDI**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2018**

## ABSTRAK

### Perilaku Oksidasi *Ferro Cast Ductile* (FCD) 40 yang Dilapisi Al-7wt.%Si dengan Metode Celup Panas pada Temperatur 750 °C

Oleh

**Aldi Rizaldi**

Besi cor liat tipe 40 (*Ferro cast ductile*/FCD40) merupakan besi cor yang banyak digunakan untuk *exhaust manifold* dan blok silinder pada komponen mesin mobil. Degradasi kemampuan besi cor melalui proses oksidasi terjadi, apabila komponen mesin beroperasi pada kondisi temperatur tinggi. Untuk meningkatkan ketahanan oksidasi komponen yang berbahan dasar besi cor pada temperatur tinggi, metode yang sesuai adalah dengan cara mencelupkan besi cor ke dalam bak yang berisi Al-7%Si pada temperatur 700°C selama 2 menit. Besi cor yang dilapisi dan tidak dilapisi dioksidasi pada temperatur 750 °C dalam kondisi isothermal selama periode 1-64 jam. Fasa  $Fe_2Al_5$  dan  $FeAl_2$  dan retakan terbentuk pada lapisan intermetalik selama proses oksidasi. Meskipun retak terbentuk, namun ketahanan oksidasi besi cor lapis Al-7%Si dapat ditingkatkan secara signifikan pada temperatur 750 °C. Hasil kinetika oksidasi ( $mg/cm^2$ ) terhadap waktu oksidasi (jam) mengikuti tren kurva parabolik. Nilai konstanta laju parabolik ( $k_p$ ) FCD yang dilapisi sebesar  $3.18 \times 10^{-11} g^2 cm^{-4} s^{-1}$  dan nilai  $k_p$  FCD yang tidak dilapisi sebesar  $2.59 \times 10^{-9} g^2 cm^{-4} s^{-1}$ . Berdasarkan nilai  $k_p$  menunjukkan bahwa nilai  $k_p$  FCD yang dilapisi menurun sebesar dua orde dibandingkan nilai  $k_p$  besi cor yang tidak dilapisi. Ini menunjukkan bahwa pelapisan celup panas Al-7%Si pada FCD 40 terbukti dapat meningkatkan ketahanan oksidasi dari besi cor.

Kata Kunci: Besi cor liat tipe 40, oksidasi temperatur tinggi, pelapisan Al-7%Si celup panas, kinetika oksidasi, konstanta laju parabolic

## ABSTRACT

### Oxidation Behavior of Hot-Dip Al-7%Si Coating on Ferro Cast Ductile (FCD) 40 at 750 °C

By

Aldi Rizaldi

A ductile cast iron type 40 (FCD 40) is widely used as an engineering material for an exhaust manifold and a cylinder block on engine components of car. Degradation of the cast iron ability due to an oxidation process occurred, when the engine components subjected to a high temperature working. In order to increase the oxidation resistance of the component material of cast iron at a higher temperature, suitable method is by hot-dipping the cast iron into a molten Al-7%Si bath at 700 °C for 2 minutes. The coated- and uncoated-cast iron were oxidized at 750 °C in an isothermal conditions for a periods of 1-64 h. The  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  and  $\text{FeAl}_2$  phases and cracks were formed in the intermetallic layer during oxidation periods. Although cracks were formed but the oxidation of cast iron with an Al-7%Si coating was significantly increased at 750 °C. The oxidation kinetics ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) results with respect to the oxidation time (h) follow a parabolic trend curves. The parabolic rate constant ( $k_p$ ) of the coated-FCD was  $3.18 \times 10^{-11} \text{ g}^2 \text{ cm}^{-4} \text{ s}^{-1}$  and the value of  $k_p$  of the uncoated-FCD was  $2.59 \times 10^{-9} \text{ g}^2 \text{ cm}^{-4} \text{ s}^{-1}$ . According to the value of  $k_p$  showed the  $k_p$  of coated-FCD was decreased to two orders lower than that of the  $k_p$  of uncoated-FCD. It indicates that the hot-dip Al-7%Si coating on a FCD 40 can be experimentally proved an increasing in the oxidation resistance of the cast iron.

Keywords: ductile cast iron type 40, high temperature oxidation, hot dip Al-7%Si coating, intermetallic layer, oxidation resistance

**PERILAKU OKSIDASI *FERRO CAST DUCTILE* (FCD) 40 YANG  
DILAPISI Al-7wt.%Si DENGAN METODE CELUP PANAS PADA  
TEMPERATUR 750 °C**

Oleh

*Aldi Rizaldi*

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Lmpung



**JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDARLAMPUNG  
2018**

Judul Skripsi

: **PERILAKU OKSIDASI FERRO CAST  
DUCTILE (FCD) 40 YANG DILAPISI  
Al-7wt.%Si DENGAN METODE CELUP  
PANAS PADA TEMPERATUR 750 °C**

Nama Mahasiswa

: **Aldi Rizaldi**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1215021065

Jurusan

: Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik



**MENYETUJUI**

1. Komisi Pembimbing

**Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T.**  
NIP 19721211 199803 1 002

**Dr. Sugiyanto, M.T.**  
NIP 19570411 198610 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin

**Ahmad Su'udi, S.T., M.T.**  
NIP 19740816 200012 1 001

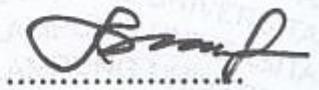
## MENGESAHKAN

### 1. Tim Penguji

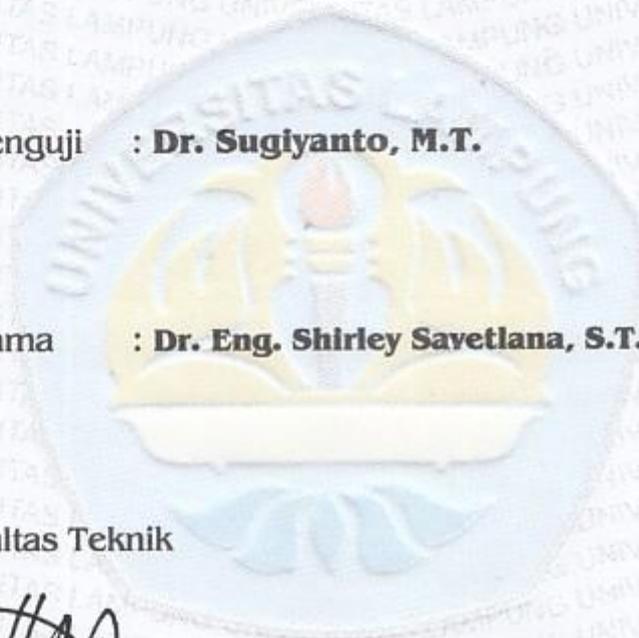
Ketua Penguji : **Dr. Moh. Badaruddin, S.T., M.T.** .....



Anggota Penguji : **Dr. Sugiyanto, M.T.** .....



Penguji Utama : **Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met.** .....



### 2. Dekan Fakultas Teknik



**Prof. Dr. Suharno, M.Sc.**

NIP 19620717 198703 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **23 Februari 2018**

## PERNYATAAN PENULIS

Tugas akhir ini dibuat oleh penulis dari hasil pikirannya sendiri tanpa melakukan plagiasi dari karya siapapun dan dapat dipertanggungjawabkan sebagaimana telah diatur dalam Pasal 27 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor No. 3187/H26/DT/2010.

Bandar Lampung, Februari 2018



**Aldi Rizaldi**  
**NPM. 1215021012**

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 3 Juni 1994 sebagai anak kedua dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Satria dan Ibu Yeni Erti. Penulis menyelesaikan pendidikan di Sekolah Dasar Negeri 07 Pademangan Timur Jakarta pada tahun 2006, Sekolah Menengah Pertama Negeri 34 Jakarta pada tahun 2009, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 80 Jakarta pada tahun 2012.

Setelah itu penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung pada tahun 2012 melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) Tertulis.

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi Pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota Divisi Hubungan Masyarakat dan pernah menjadi Ketua Pelaksana Kemah Bakti Mesin. Pada bidang akademik, penulis pernah melaksanakan Kerja Praktek (KP) di PT Daya Radar Utama Unit 3 - Lampung pada tahun 2015 dengan mengambil judul "Pengujian Kapasitas Pompa Kargo untuk Operasi Bongkar dan Muat BBM di Pelabuhan pada Kapal Tanker 3500 *Long Tonnage Dead Weight* (LTDW) di PT. Daya Radar Utama Unit 3 - Lampung". Pada tahun 2017 penulis mulai melakukan penelitian tugas akhir yang berjudul "Perilaku Oksidasi Ferro Cast Ductile (FCD) 40 yang Dilapisi Al-7wt.%Si dengan Metode Celup Panas pada Temperatur 750 C" dibawah bimbingan Bapak Dr. Mohammad Badaruddin,S.T.,M.T. dan Bapak Dr. Sugiyanto,M.T.

## *MOTTO*

*Terbentur, terbentur, terbentur, terbentuk.*

*(Tan Malaka)*

*Saya bukan apa-apa tapi saya harus menjadi segalanya.*

*(Karl marx)*

*Jika kamu tak tahan dengan lelahnya belajar, maka  
bersiaplah menanggung kebodohan.*

*(Imam syafi'i)*

*Beraniilah menjalani kehidupan yang Anda impikan untuk  
diri Anda sendiri. Bergeraklah maju dan buatlah impian  
Anda menjadi nyata.*

*(Ralph Waldo Emerson)*

*Tidak ada hal hebat yang tercipta dalam sekejap.*

*(Epictetus)*

*Jangan batasi dirimu*

*(Aldi Rizaldi)*

## *PERSEMBAHAN*

*Atas ridho Allah SWT dan segala kerendahan hati,  
kupersembahkan karya kecilku ini sebagai wujud bakti untuk  
orang-orang yang kusayangi*

*Ayah dan Mamah tercinta yang telah membesarkan,  
mendidik, dan mengusahakan yang terbaik untukku.  
Terimakasih atas semua pengorbanan yang telah dilakukan,  
doa, kesabaran, serta cinta dan kasih sayang. Semoga Allah  
SWT senantiasa melindungi dan menyayangi kalian*

*Kakak dan Adik-adikku tersayang, atas doa dan dukungan  
kalian yang selalu menjadi motivasiku*

*Kakak-Kakak dari ISCO Foundation yang selalu aku  
repotkan dan selalu men-support aku*

*Almamaterku Tercinta*

*Universitas Lampung*

## SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

*Alhamdu lillahi rabbil'alamin*, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, yang senantiasa mencurahkan nikmat, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Perilaku Oksidasi *Ferro Cast Ductile* (FCD) 40 yang Dilapisi Al-7wt.%Si dengan Metode Celup Panas pada Temperatur 750 °C” dengan sebaik-baiknya. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang selama ini telah membantu, mendukung, dan membimbing hingga selesainya skripsi ini, Oleh karena itu, sebagai wujud rasa hormat, penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak sebagai berikut:

1. Keluarga tercinta, terutama untuk dua orang terhebat dalam hidup penulis, mamah dan ayah, juga Nita, Vivi dan Imel yang telah memberikan dukungan semangat, moril maupun materil serta selalu mendoakan yang terbaik untuk penulis.
2. ISCO Foundation dan seluruh personilnya, karena tanpa dukungan semangat, baik moril ataupun materil.

3. Bapak Dr. Mohammad Badaruddin, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama dalam Tugas Akhir, yang telah banyak memberikan banyak pelajaran baru dan bimbingan dalam kelancaran skripsi ini
4. Bapak Dr. Sugiyanto, M.T. selaku dosen pembimbing pendamping atas kesediaan dan keikhlasannya untuk berbagi ilmu, memberi dukungan, membimbing, memberi kritik maupun saran yang membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya.
5. Ibu Dr. Eng. Shirley Savetlana, S.T., M.Met. selaku dosen pembahas dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini, yang telah memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
6. Bapak Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T selaku Pembimbing Akademik yang telah banyak memberikan masukan selama penulis menempuh perkuliahan.
7. Dila Oktaria yang selalu memberi dukungan, semangat dan mendoakan penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman Kuy Baxian, Purnadi, Suef, Agus, Fariz, Kiki, Faisal, Yusuf, Imam, dan Joel, yang selalu saling mendukung satu sama lain.
9. Teman seperjuangan Tugas Akhir, Bima Regi Kusuma, Purnadi Sri Kuncoro, Farid Nanda, I Komang Suariandi, dan Cristian yang bersama-sama merasakan suka dan duka dalam menyelesaikan Tugas Akhir di Lab. Material selama setahun belakangan ini, sebagai teman bertukar pikiran dan motivasi.
10. Teman-teman kontrakan taman merindu, Ryan alias Nay, Agus, Febri alias Cebong, Aji, Alef yang sudah membantu dan memberikan semangat pada penulis.

11. Rekan-rekan Teknik Mesin angkatan 2012 yang tidak bisa saya tuliskan satu persatu, terima kasih telah memberikan dukungan dan semangatnya.
12. Keluarga besar Teknik Mesin Universitas Lampung, kakak-kakak dan adik-adik yang sama-sama berjuang untuk menyelesaikan perkuliahan di Unila, salam Solidarity M Forever.
13. Mas Ruwanto asisten Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah banyak membantu selama penelitian.
14. Alexandra Elbakyan, pendiri situs Sci-Hub, yang sangat membantu penulis untuk mendapatkan referensi-referensi secara gratis.
15. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir.

Semoga Allah SWT. Membalas jasa-jasa yang telah kalian berikan kepada penulis selama ini. Pada akhirnya penulis mengharapkan agar Skripsi ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya dan dapat bermanfaat bagi ilmu pengetahuan, khususnya cabang ilmu material bahan.

Bandar Lampung, Februari 2018

Penulis,

**Aldi Rizaldi**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b> .....	iv
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	v
<b>PERNYATAAN PENULIS</b> .....	vi
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	vii
<b>MOTTO</b> .....	viii
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	ix
<b>SANWACANA</b> .....	x
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xviii
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	xix
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Sistematika Penulisan .....	4

**BAB II. TINJAUAN PUSTAKA**

2.1 Besi Cor .....	6
2.2 Jenis-Jenis Besi Cor .....	8
2.2.1 Besi Cor Kelabu ( <i>Grey cast Iron</i> ) .....	9
2.2.2 Besi Cor Liat ( <i>Ductile Cast Iron</i> ) .....	11
2.2.3 Besi Cor Putih ( <i>White Cast Iron</i> ) .....	12
2.2.4 Besi Cor Mampu Tempa ( <i>Malleable Cast Iron</i> ) .....	13
2.3 Korosi .....	15
2.4 Oksidasi Temperatur Tinggi .....	17
2.5 Kinetika Oksidasi .....	19
2.6 Pelapisan Aluminium .....	22
2.7 Pelapisan dengan Metode Pencelupan Panas ( <i>Hot-Dip Coatings</i> ) .....	23
2.8 Karakterisasi .....	24
2.8.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	24
2.8.2 <i>Optical Microscopy</i> (OM) .....	26

**BAB III. METODE PENELITIAN**

3.1 Tempat Penelitian .....	28
3.2 Bahan Penelitian dan Alat yang Digunakan .....	28
3.3 Diagram Alir Penelitian .....	30
3.4 Prosedur Penelitian .....	31
3.4.1 Proses Pembuatan Spesimen .....	31
3.4.2 Proses Pelapisan Al-7%Si .....	32
3.4.3 Pengambilan Data Sebelum Oksidasi .....	34
3.4.4 Pengujian Oksidasi .....	34
3.4.5 Pengukuran Berat Setelah Oksidasi .....	34
3.4.6 Karakterisasi Sampel .....	34

**BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Kinetika Oksidasi .....	35
4.2 Karakterisasi Sampel .....	39
4.2.1 <i>X-Ray Diffraction</i> .....	40
4.2.2 Mikroskop Optik .....	43

**BAB V. PENUTUP**

5.1 Simpulan .....	46
5.2 Saran .....	47

**DAFTAR PUSTAKA****LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1. Gambar 2.1 Diagram fasa Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	7
2. Gambar 2.2 Bentuk grafit flakes dalam besi kelabu .....	9
3. Gambar 2.3 Bentuk grafit spheroids dalam besi cor liat .....	12
4. Gambar 2.4 Kurva pertumbuhan lapisan oksida untuk kinetika linear, parabolik, logaritmik .....	22
5. Gambar 2.5 Difraktometer .....	26
6. Gambar 3.1 Dimensi spesimen uji (satuan mm) (ASTM G54, 2002) .....	29
7. Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian .....	31
8. Gambar 3.3 Skema pelapisan celup panas .....	33
9. Gambar 4.1 Kurva penambahan berat terhadap waktu oksidasi .....	36
10. Gambar 4.2 Kurva linier kuadrat penambahan berat terhadap waktu oksidasi .....	38
11. Gambar 4.3 Foto spesimen besi cor liat jenis FCD 40 setelah pengujian oksidasi .....	39
12. Gambar 4.4 Pola difraksi X-ray analisis pada besi cor liat jenis FCD 40 yang dilapisi Al-7%Si dan tidak dilapisi setelah proses oksidasi pada temperatur 750 °C dengan waktu 9 jam .....	42
13. Gambar 4.5 Hasil mikroskop optik penampang permukaan permukaan besi Cor liat jenis FCD 40 yang dioksidasi pada temperatur 750°C selama (a) 1 jam, (b) 25 jam .....	43

14. Gambar 4.6 Hasil mikroskop optik penampang permukaan lapisan Aluminida padapermukaan besi cor liat jenis FCD 40 yang dioksidasi pada temperatur 750°C selama (a) 0 jam, (b) 1 jam, (c) 25 jam, dan (d) 64 jam ..... 44

## DAFTAR TABEL

	Halaman
1. Tabel 2.1 Rentang komposisi paduan besi cor ( <i>ductile</i> ditambahkan 0,04 – 0,1 % Mg) dalam wt.% .....	7
2. Tabel 2.2 Jenis grafit dan matriks besi cor .....	8
3. Tabel 2.3 Sifat mekanis besi cor kelabu .....	11
4. Tabel 4.1 Data hasil FCD 40 dioksidasi pada temperatur 750 °C .....	35

## DAFTAR SIMBOL

$x$	Ketebalan lapisan ( $\text{g}^2 \text{cm}^{-4}$ )
$V_{ox}$	Volume molar oksida ( $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ )
$\gamma$	Jumlah stokiometrik oksigen dalam oksida $\text{M}_x\text{O}_y$
$V_m$	Volume molar dari logam ( $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$ )
$\Delta W$	Penambahan berat ( $\text{mg cm}^{-2}$ )
$k_p$	Konstanta pertumbuhan oksida
$k_o$	Konstanta yang merupakan fungsi dari komposisi oksida dan tekanan gas
$Q$	Energi aktivasi untuk pertumbuhan lapisan oksida
$k_l$	Laju linear konstan
$t$	Waktu (s)
$A$	Luas permukaan ( $\text{cm}^2$ )

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Besi cor liat (*ferro cast ductile*) adalah paduan besi yang mengandung 2–4 wt.% karbon (C), bersama dengan jumlah silikon (Si) and mangan (Mn) yang bervariasi dalam persen berat (wt.%), dan unsur-unsur pengotor seperti; sulfur (S) and fosfor (P) (Encyclopaedia Britannica, 2008). Besi cor liat merupakan logam yang unik dan memiliki kombinasi sifat mekanik yang sangat baik ditinjau dari sisi kekuatan, keuletan, ketangguhan, kekuatan kelelahan, dan ketahanan aus tinggi (Chaengkham and Srichandr, 2011).

Berdasarkan sifat mekaniknya, besi cor liat banyak digunakan untuk pembuatan komponen-komponen teknik seperti; *burner*, blok mesin kendaraan, *exhaust manifolds*, *turbocharger housings*, rumah pompa karena kemampuan besi cor liat untuk komponen-komponen yang kompleks lebih mudah dilakukan dengan biaya relatif lebih murah dan proses pengecorannya lebih efektif dari sisi waktu yang dibutuhkan dibandingkan dengan besi cor mampu tempa (*malleable cast iron*) (Martinez et al., 2017).

Sebagaimana dijelaskan di atas, komponen-komponen tersebut banyak diaplikasikan pada kondisi kerja dalam lingkungan temperatur tinggi seperti pada industri petrokimia, otomotif dan industri lainnya. Sehingga, pada temperatur tinggi besi cor liat akan mengalami degradasi baik ketahanan oksidasinya (Lin and Wang. 2010, Ceschini et al., 2016) maupun kekuatan tarik dan *fatigue* (Andriollo and Hattel. 2016, Rourke. 2001).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Zhou dan Song (2011), proses oksidasi pada logam lebih cepat apabila logam diaplikasikan pada lingkungan temperatur tinggi. Peristiwa tersebut terjadi apabila unsur logam kontak dengan oksigen secara langsung. Oleh karena itu, perlu dilakukan pelapisan pada permukaan besi cor liat untuk melindungi substratnya dari serangan oksidasi temperatur tinggi, agar usia pakai komponen-komponen yang terbuat dari besi cor liat dapat diperlama. Untuk memperlambat laju oksidasi pada logam ada beberapa metode yang digunakan, salah satunya yaitu pelapisan aluminium celup panas. Pelapisan aluminium celup panas merupakan proses pelapisan logam/besi dengan menggunakan aluminium yang berfungsi sebagai pelapis dan dengan cara mencelupkan logam yang akan dilapisi ke dalam aluminium yang sudah dicairkan (Smith and Goodwin, 2010).

Penelitian sebelumnya pernah dilakukan oleh Wang dan Chen (2006) dengan menggunakan baja karbon rendah yang dilapisi Al-10wt.% Si celup panas pada temperatur 750, 850 dan 950 °C. Selain itu juga pernah dilakukan oleh Lin dan Wang (2010) dengan menggunakan *high silicon ductile iron* yang dilapisi Al celup panas pada temperatur 750 °C. Dalam penelitian ini, *ferro cast ductile*

(FCD) 40 digunakan sebagai objek penelitian dan proses pelapisan aluminium celup panas dilakukan dengan mencelupkan FCD 40 ke dalam bak Al-7wt.% Si cair selama 2 menit. Performansi kedua paduan diuji dengan mengoksidasinya pada kondisi isothermal (*steady state*) temperatur 750 °C selama 64 jam.

Berdasarkan uraian diatas maka penulis akan melakukan penelitian dengan judul **“PERILAKU OKSIDASI *FERRO CAST DUCTILE* (FCD) 40 YANG DILAPISI Al-7wt.% Si DENGAN METODE CELUP PANAS PADA TEMPERATUR 750 °C”**.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui ketahanan oksidasi besi cor FCD 40 pelapisan Al-7wt.% Si celup panas pada temperatur 750 °C.
2. Menentukan laju kinetika pertumbuhan oksida pada permukaan setiap paduan setelah dioksidasi.
3. Menganalisis fasa-fasa intermetalik yang terbentuk untuk menjelaskan mekanisme proses oksidasi yang terjadi pada kedua paduan.

## **1.3 Batasan Masalah**

Berdasarkan latar belakang dan tujuan penelitian diatas, agar proses yang dilakukan dapat berjalan sesuai dengan yang diharapkan maka peneliti membatasi masalah penelitian ini pada:

1. Bahan pelapis yang digunakan yaitu Al-7wt.% Si.

2. Temperatur pelapis yang digunakan untuk proses celup panas 700 °C.
3. Lama pencelupan logam substrat ke dalam bak Al-7% wt. Si cair adalah 2 menit.
4. Proses oksidasi dilakukan pada temperatur 750 °C selama 1-64 jam dalam *furnace* dengan kondisi atmosfer udara diam.

#### **1.4 Sistematika Penulisan**

Laporan penulisan tugas akhir ini disusun menjadi lima bab. Adapun sistematika pada penulisan ini adalah sebagai berikut:

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bab ini menguraikan latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan

#### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini menguraikan kajian-kajian yang dijadikan rujukan dalam membahas permasalahan-permasalahan yang terkait dengan perilaku besi cor untuk mendukung penelitian ini.

#### **BAB III METODE PENELITIAN**

Pada bab ini dijelaskan metode, bahan dan alat yang akan digunakan untuk mencapai hasil yang diharapkan dalam penelitian ini.

#### **BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini penulis menyajikan data hasil penelitian yang kemudian dibahas dalam penelitian ini sehingga diperoleh hasil yang diharapkan.

## **BAB V PENUTUP**

Pada bab ini menyimpulkan dari hasil akhir dan pembahasan sekaligus memberikan saran yang dapat menyempurnakan penelitian ini.

## **DAFTAR PUSTAKA**

Berisikan rujukan yang berupa buku atau jurnal yang diperoleh penulis untuk mendukung dalam penyusunan tugas akhir ini.

## **LAMPIRAN**

Berisikan hal-hal yang mendukung penelitian.

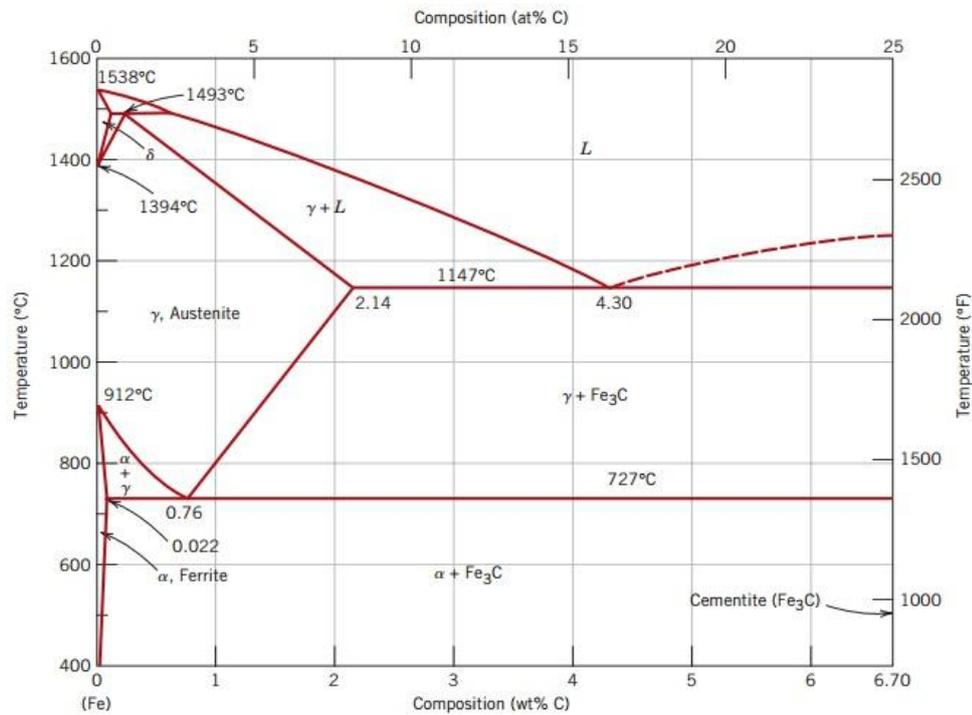
## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Besi Cor**

Besi cor (*cast iron*) merupakan paduan dari besi (Fe) dan karbon (C) yang mengandung unsur penting lainnya seperti silikon (Si), mangan (Mn), sulfur (S), dan fosfor (P), yang mengubah sifat dan struktur dari paduan yang dihasilkan (Angus, 1976). Besi cor merupakan istilah yang diterapkan untuk jenis besi paduan, dimana yang membedakannya adalah kadar karbonnya yang lebih dari 1,7% (Reynaud, 2010). Kandungan karbon yang terdapat pada besi cor lebih tinggi daripada kandungan karbon yang terdapat pada baja, karena itu strukturnya berlawanan dengan baja. Karena perbedaan kadar karbon tersebut menyebabkan titik lebur besi cor lebih rendah dari baja. Selain itu besi cor juga memiliki ketahanan oksidasi yang cukup pada temperatur tinggi. Karena titik leburnya rendah dan ketahanan oksidanya pada temperatur tinggi, besi cor banyak dimanfaatkan pada industri petrokimia, otomotif dan industri lainnya yang menggunakan logam pada temperatur tinggi. Contoh penggunaan logam ini yaitu pada bagian dari *burner*, blok mesin kendaraan, *exhaust manifolds*, *turbocharger housings*, rumah pompa dan lain sebagainya yang membutuhkan

kekuatan mekanik yang baik serta ketahanan terhadap oksidasi yang baik pula (Lin and Wang, 2010).



**Gambar 2.1** Diagram fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C (Callister and Rethwisch, 2009: 319)

**Tabel 2.1** Rentang komposisi paduan besi cor (*ductile* ditambahkan 0,04 – 0,1 % Mg) dalam wt.% (Reynaud, 2010)

Type	C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)
<i>Gray</i>	2.7-4.0	0.5-3.3	0,3–1,0	< 0.15	< 1.4
<i>Ductile</i>	3.3–3.9	1.6–2.5	0,4	< 0.01	< 0.1
<i>White</i>	1.7–3.0	0.8–1.3	0,4	< 0.15	< 0.5
<i>Malleable (blackheart)</i>	2.0–2.7	0.8–1.2	0,1 – 0,6	< 0.15	< 0.2
<i>Malleable (whiteheart)</i>	3.3–3.9	0.3–0.8	0,1 – 0,5	< 0.4	< 0.1

Berdasarkan gambar 2.1, besi cor dapat mencair pada temperatur 1150-1300°C atau 2100-2350 °F jauh lebih rendah daripada baja, karenanya besi cor lebih

mudah dicairkan, maka umumnya product besi cor dibentuk dengan proses pengecoran.

Berdasarkan tabel 2.1, unsur-unsur paduan utama pada besi cor yaitu karbon dan silikon dengan nilai kandungan karbon antara 1.7–4.0% dan silikon antara 0.5–3.3 %. Kandungan karbon dan silikon berpengaruh terhadap jenis besi cor yang dihasilkan. Hal ini dapat terjadi karena karbon dan silikon mempengaruhi bentuk grafit dalam besi cor apabila kandungannya ditingkatkan. Apabila besi dalam fase cair unsur karbon akan berikatan dengan besi sehingga membentuk karbida besi. Serta unsur silikon yang terkandung dalam besi cor akan menyebabkan sementit menjadi kurang stabil sehingga membentuk grafit. Selain itu jenis besi cor juga dipengaruhi oleh unsur matriks yang terkandung, apakah *ferrite*, *pearlite* atau *austenite* (Reynaud, 2010).

**Tabel 2.2** Jenis grafit dan matriks besi cor (Rundman, 2001)

Type	Microstructure	
	Graphite	Matrix
<i>Gray</i>	<i>Flakes (Platelets)</i>	<i>Ferrite, pearlite</i>
<i>Ductile</i>	<i>Spheres (Nodular)</i>	<i>Ferrite, pearlite, or austenite</i>
<i>White</i>	<i>None</i>	<i>Ferrite, pearlite</i>
<i>Malleable (blackheart)</i>	<i>“Popcorn” (Nodular)</i>	<i>Ferrite, pearlite</i>
<i>Malleable (whiteheart)</i>	<i>“Popcorn” (Nodular)</i>	<i>Ferrite, pearlite</i>

## 2.2 Jenis-Jenis Besi Cor

Jenis-jenis dari besi cor dapat ditentukan berdasarkan kandungan karbon dan silikon yang terkandung didalamnya. Selain itu besi cor juga dapat dibedakan berdasarkan warna patahan dari besi cor tersebut. Berikut ini merupakan 4 jenis besi cor yang umum digunakan, yaitu:

### 2.2.1 Besi cor kelabu (*gray cast iron*)

Besi cor kelabu merupakan jenis tertua dan yang paling umum dari besi cor. Akibatnya dianggap oleh banyak orang sebagai satu-satunya jenis besi cor. Sayangnya sifat umum diketahui dari besi cor kelabu (kerapuhan) juga dianggap sebagai sifat dari semua besi cor. Dinamakan demikian juga karena fraktur karakteristik permukaan yang berwarna kelabu.

Besi cor kelabu merupakan istilah yang banyak digunakan untuk besi cor yang memiliki mikrostruktur grafit berbentuk serpihan (*flakes*) dalam matriks besi. Jenis ini merupakan salah satu paduan yang paling banyak digunakan dari besi. Kekuatan besi cor kelabu tergantung pada matriks dimana terdapat grafit. Matriks dapat berkisar antara ferit ke perlit dan berbagai kombinasi dari dua fasa tersebut. *Flakes graphite* yang besar mengurangi kekuatan dan keuletan, jadi *inoculants* digunakan untuk mengembangkan serpihan yang halus (*fine flakes*) (Sings, 2012).



**Gambar 2.2** Bentuk grafit *flakes* dalam besi kelabu (Reynaud, 2010)

*Flakes graphite* memiliki kepadatan yang rendah dan karena itu mengalami penyusutan pada saat pendinginan sehingga memberikan hasil *castings* yang baik yang bebas dari porositas. Grafit berbentuk serpihan memiliki karakteristik redaman yang baik dan *machinability* yang baik, karena grafit bertindak sebagai *chip-breaker* dan melumasi alat pemotong. Dalam aplikasi yang dapat menyebabkan keausan, grafit bermanfaat karena membantu proses pelumasan. Bagaimanapun, *flakes graphite* juga berkonsentrasi pada tegangan sehingga kurang dalam ketangguhan. Karena itu direkomendasikan penerapan penggunaan tegangan tarik hanya seperempat dari kekuatan tarik yang sebenarnya.

Bentuk *flakes* seperti pada besi cor kelabu memberikan pengaruh yang dominan terhadap sifat mekaniknya. *Flakes graphite* bertindak sebagai *stress raisers* yang menyebabkan aliran plastis lokal pada tegangan rendah dan akan terjadi patahan pada tegangan tinggi. Akibatnya besi cor kelabu menunjukkan tidak ada perilaku elastis dan gagal dalam keadaan tegang tanpa ada deformasi plastis yang signifikan (Singh, 2012).

Densitas besi cor kelabu pada temperatur ambien yaitu antara 7.1-7.3 gr/cm<sup>3</sup> dan dipengaruhi oleh kandungan grafit. Sedangkan pada keadaan cair, densitas besi cor kelabu berkisar antara 6.78-6.95 gr/cm<sup>3</sup>. Pada keadaan padat, penurunan densitas berbanding lurus dengan kenaikan temperatur. Berikut ini merupakan tabel ASTM A-48 yang berisi informasi mengenai beberapa kelas besi cor kelabu berdasarkan kekuatan tariknya:

**Tabel 2.3** Sifat mekanis besi cor kelabu (ASM volume 1, 2005: 44)

ASTM A 48 Class	Uji Tarik		Tegangan Geser		Uji Kekerasan
	MPa	Ksi	MPa	Ksi	HB
20	152	22	179	26	156
25	179	26	220	32	174
30	214	31	276	40	210
35	252	36.5	334	48.5	212
40	293	42.5	393	57	235
50	362	52.5	503	73	262
60	431	62.5	610	88.5	302

### 2.2.2 Besi cor liat (*ductile cast iron*)

Besi cor liat dikenal juga sebagai besi cor nodular (*nodular iron*), besi grafit bulat (*spheroidal graphite iron*), atau besi sferulitik (*spherulitic iron*). Besi cor liat mirip dengan besi cor kelabu tetapi memiliki sedikit paduan lain seperti magnesium yang membuat pembentukan karbon yang tadinya berbentuk *flakes* menjadi berbentuk bulat (*spheroids*) (Reynaud, 2010). Perbedaan antara besi cor liat dengan besi cor kelabu adalah bentuk grafitnya. Besi cor kelabu biasa memiliki pola grafit *flakes* acak dalam logam. Sedangkan dalam besi cor liat akibat dari penambahan beberapa persen magnesium atau sesium menyebabkan grafit untuk membentuk di *spheroids* kecil. Pembentukan *spheroids* terjadi ketika *eutectic graphite* berpisah dari besi cair selama pembekuan. Pemisahan grafit dalam bentuk nodular mirip dengan pemisahan grafit besi cor kelabu, kecuali bahwa aditif memfasilitasi grafit berbentuk nodular ini. *Spheroids graphite* pada besi cor liat membuat jenis besi cor ini memiliki ketangguhan yang sangat baik dan keuletan yang tinggi

sehingga digunakan secara luas, misalnya dalam poros engkol (Singh, 2012).



**Gambar 2.3** Bentuk grafit *spheroids* dalam besi cor liat (Reynaud, 2010)

Matriks pada besi cor liat dapat berupa, *ferrite*, *pearlite* atau *austenite*. Tetapi dalam terobosan terbaru besi cor, matriks dapat berupa *bainite*. Komposisi kimia dari besi cor liat mirip dengan yang dari besi cor abu-abu, tetapi dengan tambahan 0.05% magnesium. Hal ini menyebabkan peningkatan besar dalam ketangguhan dan kekuatan. Penggunaan peralatan yang menggunakan besi cor liat, maka keamanan dan ketahanan proses peralatan akan meningkat. Peningkatan kekuatan mekanik yang baik meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan dari beban fisik atau mekanik, dan *thermal shock* jauh di atas dari besi cor kelabu. Ketahanan korosi besi cor liat bisa sama atau lebih unggul dibanding besi cor kelabu (Singh, 2012).

### 2.2.3 Besi cor putih (*white cast iron*)

Besi cor putih merupakan satu-satunya jenis besi cor yang dimana karbon yang terkandung didalamnya membentuk besi karbida. Jumlah karbida

yang ada di dalam besi cor ini tergantung unsur karbon yang terkandung, sehingga besi cor ini memiliki sifat sangat keras dan tahan abrasi, tetapi sangat rapuh. Besi cor ini memiliki kekuatan tekan yang tinggi, dapat mempertahankan kekerasan dan kekuatan yang baik pada temperatur tinggi.

Besi cor putih terbentuk ketika karbon yang terkandung dalam besi cor cair tidak mampu membentuk grafit pada saat pemadatan. Karena tidak mengandung grafit, maka tampilan besi cor ini berwarna putih mengkilap. Selain itu besi cor ini dinamakan besi cor putih karena warna permukaannya pada saat patah berwarna putih. Besi cor putih banyak digunakan untuk membuat komponen yang memiliki ketahanan aus akibat abrasi, seperti liner pompa, komponen mesin yang bergesekan, atau penggiling pasir. Selain itu besi cor ini juga merupakan bahan baku untuk pembuatan besi cor mampu tempa (*malleable cast iron*) (Singh, 2012).

#### **2.2.4 Besi cor mampu tempa (*malleable cast iron*)**

Besi cor mampu tempa merupakan besi cor putih yang sudah dilakukan perlakuan panas untuk mengubah karbida menjadi grafit. Grafit yang terbentuk pada besi cor ini disebut *temper carbon* karena dibentuk pada keadaan padat selama proses perlakuan panas (Singh, 2012). Proses pemanasan ini dilakukan di dalam tungku (*malleabilizing furnace*) dengan temperatur sekitar 940 °C (1720 °F). Besi cor mampu tempa memiliki sifat yang mirip dengan besi cor liat, keras dan ulet. Besi ini

biasa digunakan untuk membuat benda-benda yang memerlukan ketahanan bentur yang kuat, seperti rantai, *sprockets*, *connecting rods*, dan suspensi pegas (Tutu, 2015).

Besi cor mampu tempa diklasifikasikan menjadi tiga kelas, yaitu (Singh, 2012):

1. *Ferritic malleable cast iron*

*Ferritic malleable cast iron* dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

a. *White heart cast iron*

Jenis ini merupakan dasar cor dari besi cor putih dan dibuat *malleable* dengan *annealing* dalam media oksidasi. Selama perlakuan panas terjadi dekarburasi dan karbon yang tersisa diendapkan sampai terbentuk *graphite nodules*. Jenis besi ini biasanya mengandung sekitar 0,6 sampai 1,3% silikon. *White heart cast iron* dibuat dengan diberi perlakuan panas pada temperatur 900 °C (1650 °F) dalam keadaan teroksidasi untuk menghilangkan karbon dari permukaan besi cor putih.

b. *Black heart cast iron*

*Black heart cast iron* memiliki matriks ferit dengan nodul diselingi temper carbon. Di Amerika Serikat jenis ini dikenal dengan istilah “*cupola malleable iron*”, karena tampilannya yang mirip dengan yang dihasilkan dari tungku Cupola. Kekuatan dan kauletan jenis ini sangat rendah, karena itu jarang digunakan sebagai bahan struktural.

## 2. *Pearlite malleable cast iron*

*Pearlite malleable cast iron* sudah mengombinasikan karbon dalam matriks, sehingga menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi daripada *ferritic cast iron*. Proses produksi memerlukan pengendalian karbon dan siklus perlakuan panas. Beberapa karbon dapat dipertahankan sebagai pendistribusi karbida karbon yang baik. Gabungan dari karbon ini dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan dari besi cor.

## 3. *Martensitic malleable cast iron*

*Martensitic malleable cast iron* awalnya diproduksi untuk *pearlitic cast iron*. Setelah itu dilakukan proses *quenching* dan *tempered* untuk membuat *martensitic malleable cast iron*.

## 2.3 Korosi

Korosi berasal dari bahasa latin yaitu “*Corrodere*” yang berarti sebuah perusakan logam atau berkarat. Korosi merupakan suatu proses perusakan/degradasi logam yang ditimbulkan dari reaksi kimia antara sebuah logam dengan lingkungannya. Korosi disebut juga suatu penyakit dalam industri keteknikan, walaupun secara tidak langsung termasuk produk teknik. Dalam industri keteknikan, material yang sering mengalami korosi yaitu korosi pada logam.

Korosi dapat berjalan secara cepat ataupun lambat, tergantung faktor yang memengaruhinya, misalnya material bahan, lingkungan, temperatur, dan lain

sebagainya. Korosi tidak dapat dihindari akan tetapi banyak studi yang berusaha mengendalikan korosi agar serangan korosi yang terjadi pada logam dapat serendah mungkin dan dapat melampaui nilai ekonomisnya, atau agar logam tidak rusak sebelum waktunya. Dengan pengenalan secara preventif akan lebih ekonomis daripada memperbaiki secara represif.

Korosi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu korosi basah dan korosi kering. Berikut ini merupakan penjelasan mengenai korosi basah dan korosi kering (Burstein, 1994: 17-18):

#### 1. Korosi basah

Dalam korosi basah, oksidasi logam dan reduksi logam di dalam larutan terjadi pada daerah yang berbeda pada permukaan logam dengan proses transfer elektron melalui logam dari anoda (logam teroksidasi) ke katoda. Fasa termodinamika yang stabil terbentuk pada logam/*interface* yang padat atau ion terhidrasi (kation atau anion) yang mungkin dipindahkan dari *interface* dengan proses seperti migrasi, difusi dan konveksi (alami atau dipaksa). Contoh korosi basah misalnya logam yang terendam dalam larutan asam klorida (HCl). Korosi basah yang terjadi secara terlokalisasi dapat berbentuk makrokopis, misalnya korosi erosi, korosi retakan, korosi lubang, korosi pengelupasan, serta korosi pelumeran. Sedangkan yang berbentuk mikrokopis misalnya korosi tegangan, korosi patahan, dan korosi antar butir.

## 2. Korosi kering

Korosi kering merupakan proses korosi yang terjadi melalui reaksi kimia secara murni yang terjadi tanpa adanya air dengan segala bentuknya. Korosi kering biasanya terjadi pada kondisi temperatur tinggi atau dalam keadaan kering yang melibatkan logam dengan oksigen, halogen, hidrogen sulfida, uap belerang, dan lain sebagainya. Penyebab korosi kering yaitu oksidasi, karburasi dan *metal dusting*, nitridasi, korosi oleh halogen, sulfidasi, korosi deposit abu dan garam, dan korosi pada logam cair.

### 2.4 Oksidasi Temperatur Tinggi

Oksidasi merupakan peristiwa yang dapat terjadi apabila logam bersentuhan dengan oksigen. Di dalam reaksi kimia dimana oksigen bercampur atau menempel pada unsur lain disebut oksidasi dan unsur yang menyebabkan terjadinya oksidasi disebut unsur pengoksidasi. Sedangkan setiap reaksi dimana oksigen dilepaskan dari suatu senyawa merupakan reaksi reduksi dan unsur yang menyebabkan terjadinya reduksi disebut unsur pereduksi.

Oksidasi merupakan salah satu jenis proses korosi pada temperatur tinggi. Dalam pemilihan bahan konstruksi seperti untuk turbin gas dan tungku pemanas, korosi temperatur tinggi merupakan salah satu kriteria yang harus dipertimbangkan. Reaksi oksidasi pada temperatur tinggi memiliki kesamaan mekanisme dengan korosi yang terjadi pada lingkungan basah (*wet corrosion*), dimana kedua proses tersebut dipengaruhi oleh proses elektrokimia. Namun proses tersebut tidak sederhana kombinasi kimiawi antara logam dan oksigen pada setiap molekul permukaan (Nurbanasari, 2014).

Proses oksidasi pada temperatur tinggi dimulai dengan absorpsi oksigen yang kemudian membentuk lapisan oksida pada permukaan bahan. Selanjutnya, terjadi proses nukleasi oksida dan pertumbuhan lapisan untuk membentuk proteksi pada permukaan bahan. Persyaratan lapisan proteksi adalah homogen, daya lekat tinggi, tidak ada kerusakan mikro ataupun makro, baik yang berupa retak atau terkelupas. Laju oksida dalam logam pada temperatur tinggi dipengaruhi oleh sifat dan karakter oksida dan ditentukan oleh pertumbuhan lapisan oksida yang terbentuk. Pada umumnya, laju oksida bergantung pada tiga faktor penting yaitu, laju difusi reaktan melalui lapisan oksida, laju pemasokkan oksigen ke permukaan luar oksida, dan nisbah volume molar terhadap logam.

Temperatur tinggi memberikan pengaruh ganda terhadap degradasi logam yang ditimbulkan. Pertama, kenaikan temperatur akan memengaruhi aspek termodinamika dan kinetika reaksi. Artinya, degradasi akan semakin cepat pada temperatur yang lebih tinggi. Kedua, kenaikan temperatur akan mempengaruhi perubahan struktur dan perilaku logam. Jika struktur berubah, maka secara umum kekuatan dan perilaku logam juga akan berubah. Jadi selain terjadi degradasi yang berupa kerusakan fisik pada permukaan atau kerusakan eksternal, juga terjadi degradasi penurunan sifat mekanik, dan logam menjadi rapuh (Fontana, 1986: 174-176).

## 2.5 Kinetika Oksidasi

Reaksi logam dengan oksida akan membentuk lapisan bersamaan dengan kenaikan berat yang terjadi pada logam. Dengan demikian, tingkat lapisan dapat dihitung dengan perubahan ketebalan lapisan,  $x$  (cm) atau dengan penambahan berat,  $\Delta W$  ( $\text{mg cm}^{-2}$ ). Dalam kasus oksidasi, dua parameter ini secara langsung berkaitan dengan:

$$x = \frac{V_{ox}}{\gamma M_o} \Delta W \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana  $V_{ox}$  adalah volume molar oksida ( $\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ ),  $\gamma$  adalah jumlah stokiometrik oksigen dalam oksida  $M_xO_y$ , dan  $M_o$  adalah berat atom oksigen. Pembentukan lapisan oksida juga dipengaruhi oleh pemakaian logam, dan hubungan antara  $\Delta W$  dan ketebalan logam yang dipakai ( $X$ ) dirumuskan dengan:

$$x = \frac{V_m}{Y M_o} \Delta W \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana  $V_m$  adalah volume molar dari logam ( $\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ ), dan  $Y$  adalah faktor stokiometrik untuk lapisan oksida yang terbentuk (yaitu  $Y = \frac{y}{x}$  untuk  $M_xO_y$ ). Penambahan berat merupakan penambahan berat spesimen setelah dilakukan perlakuan oksidasi yang dapat dihitung dengan:

$$\text{Penambahan berat} = \frac{\Delta W}{A} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana  $\Delta W$  merupakan berat sampel sesudah oksidasi dikurang berat sampel sebelum oksidasi (mg), dan  $A$  merupakan luas permukaan sampel ( $\text{mm}^2$ ).

Kebanyakan dari logam tingkat oksidasinya mengikuti satu atau lebih dari tiga buah kemungkinan hukum kinetika, yaitu linear, logaritma, dan parabola (Gleeson, 2010).

### 1. Kinetika parabolik

Pada temperatur tinggi pertumbuhan lapisan awal biasanya sangat cepat namun pada akhirnya laju reaksi akan menurun ketika ketebalan lapisan mencapai 0.5 mm dan reaksi berpindah pada lapisan melalui tingkat pengendalian. Ketika tingkat pengendalian pada proses oksidasi adalah difusi reaktan (s) dengan lapisan oksida dan dengan kondisi batas untuk difusi waktu yang independen, lapisan kinetika akan mengikuti laju hukum parabola. Kinetika parabola akan menunjukkan bahwa ketebalan lapisan (x) meningkat dengan waktu (t), dan karena ini sesuai dengan peningkatan jarak difusi dan penurunan tingkat oksidasi. Dengan demikian tingkat oksidasi sesaat adalah cukup sederhana berbanding terbalik dengan ketebalan oksida, yaitu:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k'_p}{x} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana  $k'_p$  adalah proporsionalitas konstan. Dan integral dari persamaan (2.3) adalah:

$$x^2 = k_p t \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana  $k_p$  diambil menjadi konstanta laju parabolik ( $k_p = 2k'_p$ ) dengan satuan  $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . Selain itu konstanta laju parabolik juga dapat ditentukan dengan penambahan berat:

$$\Delta W^2 = k_p t \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana satuan  $k_p$  pada perhitungan ini adalah  $\text{g}^2 \text{cm}^{-4} \text{s}^{-1}$ .

Hukum laju parabolik adalah analisa standar oksidasi pada temperatur tinggi, dimana difusi melalui tingkat reaksi pengendalian ketebalan relatif. Pengendalian difusi pada proses penebalan lapisan secara termal diaktifkan, yang berarti bahwa kenaikan harga secara eksponensial dengan temperatur, dimana dijelaskan dengan persamaan Arrhenius:

$$k_p = k_o \text{EXP} \left( \frac{-Q}{RT} \right) \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana  $k_o$  adalah konstanta yang merupakan fungsi dari komposisi oksida dan tekanan gas, dan  $Q$  adalah energi aktivasi untuk pertumbuhan lapisan oksida (Gleeson, 2010).

## 2. Kinetika linear

Pada kondisi tertentu, hasil oksidasi dari logam pada laju konstan menurut hukum laju linear, yaitu:

$$x = k_1 t \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana  $x$  adalah ketebalan lapisan,  $k_1$  adalah laju linear konstan. Hukum laju linear dapat terjadi ketika reaksi fasa-kendali reaksi batas kinetika daripada proses perpindahan. Contohnya disosiasi  $\text{CO}_2$  pada pengendalian lapisan permukaan kinetika oksidasi dari baja dalam atmosfer yang banyak mengandung  $\text{CO}_2$  (Gleeson, 2010).

### 3. Kinetika logaritmik

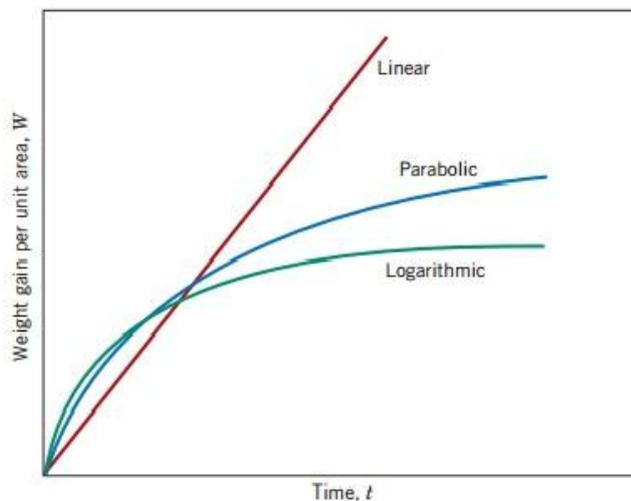
Pada temperatur rendah (misalnya 300-400 °C) tingkat oksidasi sering berbanding terbalik dengan waktu, yaitu:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{t} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana k konstan. Integral dari persamaan (2.8) mengarah ke hukum laju logaritmik:

$$x = k_a \log(k_b t + 1) \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana  $k_a$  dan  $k_b$  konstan. Oksidasi logaritmik biasanya ditaati untuk lapisan yang relatif tipis pada temperatur rendah.



**Gambar 2.4** Kurva pertumbuhan lapisan oksida untuk kinetika linear, parabolik, logaritmik (Callister and Rethwisch 2009: 706)

## 2.6 Pelapisan Aluminium

Aluminium digunakan sebagai lapisan pelindung untuk besi dan baja dan juga untuk beberapa jenis paduan tinggi dan menengah, dalam beberapa kondisi perlindungan maksimal diperoleh dengan menggunakan paduan aluminium

sebagai lapisan pelindung. Juga aluminium digunakan sebagai lapisan dekoratif pada permukaan logam dan non-logam. Ada beberapa metode yang dapat diterapkan untuk pelapisan aluminium, dan metode yang akan digunakan sangat tergantung pada aspek pelindung atau dekoratif yang lebih penting (Harris and Skerrey, 1994: 19-35).

Metode yang dapat digunakan digunakan untuk pelapisan logam dengan aluminium yaitu:

1. *Sprayed coatings*
2. *Spray-aluminised coatings*
3. *Hot-dipped coatings*
4. *Calorised coatings*
5. *Vacuum deposited coatings*
6. *Electroplated coatings*
7. *Electrophoretic coatings*
8. *Chemical deposition, gas or vapour plating*
9. *Cladding (mechanical bonding)*

## **2.7 Pelapisan dengan Metode Pencelupan Panas (*Hot-Dip Coatings*)**

Pelapisan celup panas merupakan salah satu metode pelapisan logam dengan cara mencelupkan pada sebuah material yang telah dilelehkan terlebih dahulu dari bentuk padat menjadi bentuk cair pada sebuah wadah menggunakan energi dari gas pembakaran atau menggunakan energi alternatif seperti panas listrik. Pelapisan celup panas dilakukan dengan membersihkan logam substrat terlebih

dahulu, kemudian logam substrat dicelupkan/direndam ke dalam bak yang berisi logam dengan titik lebur yang lebih rendah.

Dalam metode celup panas ini, struktur material yang akan dilapisi dicelupkan ke dalam wadah yang berisi lelehan logam pelapis. Antara logam pelapis dan logam yang akan dilapisi terbentuk ikatan metalurgi yang baik karena terjadi perpaduan proses antarmuka (*Interface Alloying*). Reaksi metalurgi yang terjadi pada hasil pelapisan celup panas memiliki dua komponen: lapisan reaksi senyawa intermetalik yang terbentuk pada dasar substrat, dan lapisan yang berada di atas pelapis yang membeku.

Pengaturan tebal lapisan dalam proses ini sulit ditentukan, lapisan cenderung tidak merata, yaitu tebal pada permukaan bagian bawah tetapi tipis pada permukaan bagian atas. Meskipun demikian, seluruh permukaan yang terkena lelehan logam itu akan terlapis. Logam pelapis pada proses celup panas terbatas untuk logam-logam yang memiliki titik lebur rendah, misalnya: aluminium, seng dan timah (Smith and Goodwin, 2010).

## **2.8 Karakterisasi**

Karakterisasi merupakan proses pengujian untuk mengetahui sifat-sifat dari sampel yang akan diuji. Berikut ini merupakan beberapa jenis pengujian karakterisasi, antara lain:

### **2.8.1 X-Ray Diffraction (XRD)**

XRD merupakan suatu teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi adanya fasa kristalin di dalam material-material benda dan serbuk, dan

untuk menganalisis sifat-sifat struktur (seperti *stress*, ukuran butir, fasa komposisi orientasi kristal, dan cacat kristal) dari tiap fasa. Metode ini menggunakan sebuah sinar-X yang terdifraksi seperti sinar yang direfleksikan dari setiap bidang, berturut-turut dibentuk oleh atom-atom kristal dari material tersebut. Dengan berbagai sudut timbul, pola difraksi yang terbentuk menyatakan karakteristik dari sampel. Susunan ini diidentifikasi dengan membandingkannya dengan sebuah data base internasional.

Sinar-X dihasilkan dari penembakan target (logam anoda) oleh elektron berenergi tinggi yang berasal dari hasil pemanasan filamen dari tabung sinar-X (Rontgen). Tabung sinar-X tersebut terdiri atas empat komponen utama, yakni filamen (katoda) yang berperan sebagai sumber elektron, ruang vakum sebagai pembebas hambatan, target sebagai anoda, dan sumber tegangan listrik.

Sinar-X dapat pula terbentuk melalui proses perpindahan elektron suatu atom dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah. Adanya tingkat-tingkat energi dalam atom dapat digunakan untuk menerangkan terjadinya spektrum sinar-X dari suatu atom. Sinar-X yang terbentuk melalui proses ini mempunyai energi yang sama dengan selisih energi antara kedua tingkat energi elektron tersebut. Karena setiap jenis atom memiliki tingkat-tingkat energi elektron yang berbeda-beda maka sinar-X yang terbentuk dari proses ini disebut karakteristik Sinar-X (Zakaria, 2003).



**Gambar 2.5** Difraktometer (Sartono, 2006)

Sebelum sinar-X sampai ke detektor melalui proses optik. Sinar-X yang panjang gelombangnya  $\lambda$  dengan intensitas  $I$  mengalami refleksi dan menghasilkan sudut difraksi  $2\theta$ . Jalannya sinar-X diperlihatkan oleh gambar 5 berturut-turut sebagai berikut: (1) Sumber sinar-X (2) Celah soller (3) Celah penyebar (4) Spesimen (5) Celah anti menyebarkan (6) Celah penerima (7) Celah soller dan (8) Detektor (Sartono, 2006).

### 2.8.2 *Optical Microscopy* (OM)

*Optical Microscopy* merupakan pemeriksaan bahan dengan menggunakan cahaya untuk memberikan gambar yang diperbesar dari struktur mikro dan makro. Karena struktur makro dan mikro pada logam dan paduan dapat menentukan perilaku material, karakterisasi pengaruh komposisi, pengolahan, kondisi pelayanan, dan variabel lain seperti pada makro dan mikro sering diperlukan. Mikrostruktur logam dan paduan ditentukan oleh komposisi, proses pembekuan, dan pengobatan termomekanis. Oleh karena itu, variabel proses ini menentukan respon dari logam dan paduan ke laboratorium dan layanan lingkungan. Karena

hubungan antara struktur dan sifat, karakterisasi metalografi digunakan dalam bahan spesifikasi, kontrol kualitas, jaminan kualitas, pengendalian proses, dan analisis kegagalan. metalografi optik berlaku untuk studi mulai dari penelitian mendasar ke evaluasi produksi (ASM Handbook volume 9, 1985: 1438-1453).

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Tempat Penelitian**

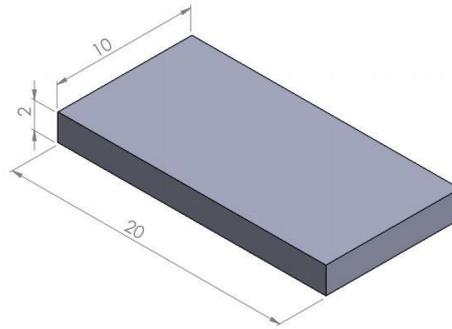
Penelitian dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung. Pengujian karakterisasi sampel dilakukan di Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) – BATAN dan Balai Penelitian Teknologi Mineral - LIPI.

#### **3.2 Bahan Penelitian dan Alat yang Digunakan**

Alat dan bahan yang digunakan adalah sebagai berikut:

##### **1. Bahan**

Bahan substrat adalah besi cor liat (FCD 40) yang sudah dipotong, grinding, dan dibuat sesuai standar ASTM G54 sebagai spesimen. Spesimen dengan pelapisan dilubangi dengan diameter 1 mm pada bagian atas untuk menggantungnya pada saat proses pelapisan celup panas. Bahan pelapis adalah Al-7Si (wt.%) (ASTM A356)



**Gambar 3.1** Dimensi spesimen uji (satuan mm) (ASTM G54, 2002)

2. Mesin *cutting*

Mesin *cutting* digunakan untuk memotong bahan FCD 40 dengan pendingin air dan bromous (*coolant*). Mesin *cutting* digunakan merk METKON tipe META CUT 12" tegangan 3×380 V.

3. Mesin *polisher*

Mesin *polisher* digunakan untuk meratakan (*grinding*) dan menghaluskan (*polishing*) permukaan spesimen dengan menggunakan kertas amplas *grade* 80-1000. Mesin *polisher* yang digunakan merk METKON tipe DIGISET – 2V tegangan 220 V.

4. Tungku pemanas (*furnace*)

Tungku pemanas digunakan untuk melakukan pengujian oksidasi dan juga untuk proses pencelupan spesimen yang dilapisi. Tungku pemanas yang digunakan merk Nabertherm tipe L 64/14 dengan daya 13.0 kW dan temperatur maksimal 1400 °C.

5. Jangka sorong digital (CD-6"CX)

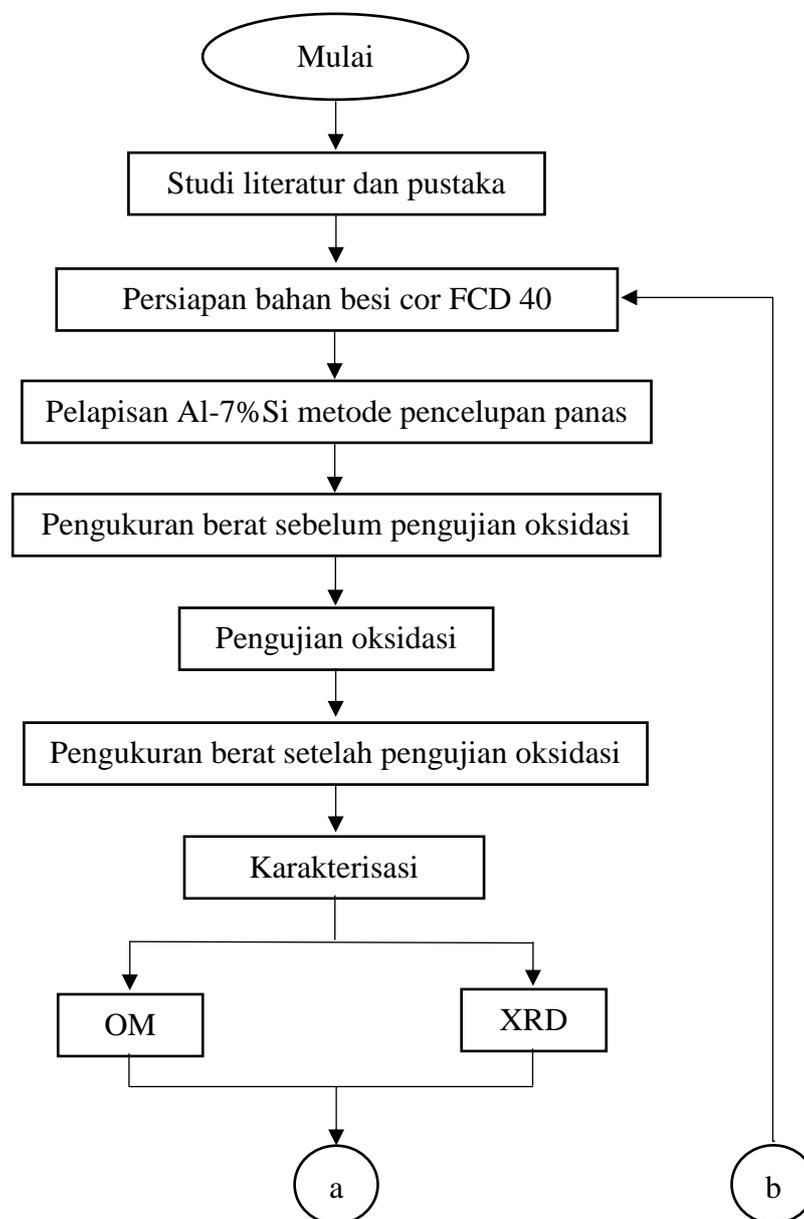
Jangka sorong digital digunakan untuk mengukur dimensi spesimen dengan satuan milimeter dengan ketelitian  $\pm \mu\text{m}$ .

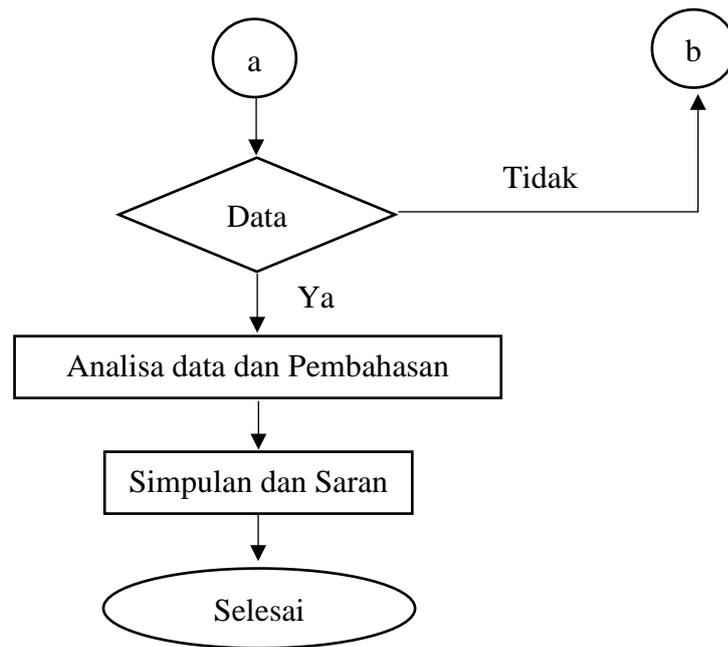
## 6. Timbangan analitik digital

Untuk menghitung berat spesimen sebelum pengujian dan setelah setelah pengujian. Timbangan yang digunakan merk ADAM tipe PW 254 dengan ketelitian 0.0001 gr.

### 3.3 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini:





**Gambar 3.2** Diagram Alir Penelitian

### 3.4 Prosedur Penelitian

Berikut ini adalah prosedur yang harus dilaksanakan pada proses penelitian untuk mencapai hasil yang optimal.

#### 3.4.1 Proses pembuatan spesimen

Besi cor FCD 40 dibuat spesimen sesuai dengan Gambar 3.1. Bahan dipotong dengan mesin potong sesuai ukuran  $20 \times 10 \times 2$  mm sebanyak 30 spesimen dan kemudian dihaluskan sampai menggunakan amplas 1000. Masing-masing 15 spesimen tanpa pelapisan dan 15 spesimen untuk pelapisan digunakan untuk pengujian oksidasi. Setiap parameter waktu oksidasi yang digunakan paling sedikit 3 spesimen digunakan.

### 3.4.2 Proses pelapisan Al-7wt.% Si celup panas

Pada proses pelapisan celup panas, ada beberapa tahapan yang harus dilakukan. Berikut ini merupakan tahapan-tahapan yang harus dilakukan, yaitu:

1. *Cleaning*

*Cleaning* yaitu pembersihan permukaan logam dengan pembersih ultrasonic dengan menggunakan acetone dan ethanol selama beberapa menit, bertujuan menghilangkan kotoran dan bentuk struktur permukaan spesimen yang baik.

2. *Pickling*

Proses *pickling* adalah proses pembersihan spesimen menggunakan larutan kimia NaOH dan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> selama beberapa detik.

3. Netralisasi

Spesimen yang telah dibersihkan dengan larutan kimia kemudian dinetralisasi dengan mencelupkan ke dalam aquades selama beberapa menit sambil spesimen diputar-putar.

4. Fluksasi

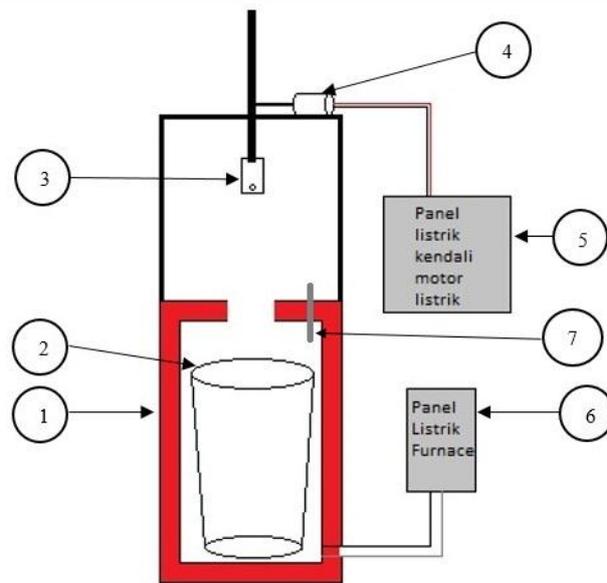
Fluksasi merupakan proses pencelupan logam substrat ke dalam larutan fluks aluminium selama beberapa menit.

5. Pengeringan

Proses pengeringan dilakukan dengan menggunakan *hair dryer* agar logam substrat yang telah dilapisi fluks lebih cepat mengering.

## 6. Pencelupan

Proses pencelupan merupakan tahap akhir dari proses pelapisan Al-7%Si celup panas. Proses ini dilakukan dengan cara mencelupkan besi cor ke dalam aluminium cair. Proses pencelupan dilakukan pada temperatur 700 °C dengan lamanya waktu tahan 2 menit.



**Gambar 3.3** Skema pelapisan celup panas

**Sumber:** Laboraturium Material Teknik Universitas Lampung

Keterangan:

1. *Furnace* dengan elemen pemanas tipe spiral kanthal, beroperasi pada tegangan 220 V dengan daya 2000 – 2300 W.
2. Bak pencelupan yang berisi Al-7%Si.
3. *Crane* / tempat untuk menggantung specimen yang akan dilapisi Al-7%Si.
4. Motor listrik yang berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan *crane*.
5. Panel untuk mengatur waktu pencelupan.
6. Panel untuk mengatur temperatur kerja furnace pada 750 °C konstan.
7. *Thermocouple* untuk mengukur temperature dalam *furnace*.

### 3.4.3 Pengambilan data sebelum oksidasi.

Pengumpulan data-data yang dibutuhkan untuk menunjang penelitian yang akan dilakukan ialah melakukan perhitungan berat dari spesimen sebelum teroksidasi ( $w_0$ ), serta menghitung luas permukaan benda uji sebelum teroksidasi.

### 3.4.4 Pengujian Oksidasi

Pada proses ini besi cor yang telah melewati tahapan perlakuan diatas, akan diuji pada lingkungan kering dengan temperatur konstan 750 °C, dan interval waktu pengujian yaitu selama 1 jam, 4 jam, 9 jam, 25 jam, dan 64 jam.

### 3.4.5 Penambahan Berat

Untuk menghitung penambahan berat per satuan luas permukaan specimen ( $\text{mg.cm}^{-2}$ ) akibat oksidasi maka digunakan persamaan:

### 3.4.6 Karakterisasi Sampel

Dalam penelitian ini diperlukan beberapa pengujian karakterisasi, pengujian karakterisasi yang akan dilakukan yaitu *Optical Microscopy* (OM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD).

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Simpulan**

Hasil pengujian oksidasi besi cor FCD 40 pada temperatur 750°C selama periode 64 jam, dapat diambil beberapa kesimpulan, sebagai berikut:

1. Penambahan berat terbesar ditemukan pada besi cor liat yang tidak dilapisi yaitu sebesar 24.4206 mg/cm<sup>2</sup>, ketahanan oksidasi temperatur tinggi besi cor FCD 40 dapat ditingkatkan melalui pelapisan Al-7wt.% Si celup panas, dimana penambahan berat turun samapi 9 kali lebih rendah.
2. Nilai konstanta laju kinetika oksidasi  $k_p$  untuk besi cor liat FCD 40 yang tidak dilapisi adalah  $2.59 \times 10^{-9} \text{ g}^2 \text{ cm}^{-4} \text{ s}^{-1}$  dan nilai  $k_p$  besi cor liat FCD 40 dilapisi Al-7%Si adalah  $3.18 \times 10^{-11} \text{ g}^2 \text{ cm}^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Order untuk nilai  $k_p$  besi cor liat FCD 40 dilapisi lebih rendah dua order dibandingkan nilai  $k_p$  besi cor liat FCD 40 tanpa dilapisi. Hal ini berarti lapisan protektif Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada permukaan substrat besi cor liat FCD 40 sangat signifikan sekali dalam mengontrol proses oksidasi besi cor FCD 40.
3. Fasa yang terbentuk pada lapisan intermetalik pada besi cor liat FCD 40 yang dilapisi yaitu FeAl, FeAl<sub>2</sub>, Fe<sub>5</sub>Al<sub>2</sub>. Pembentukan lapisan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> disuplai oleh atom-atom Al dari fasa FeAl<sub>2</sub> dan Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>.

## 5.2 Saran

Berdasarkan pembahasan dan hasil yang diperoleh dari pengujian, perlu beberapa saran diberikan yaitu:

1. Ketahanan oksidasi tergantung pada temperatur operasi dan substratnya, sehingga pengaruh perlakuan panas pada besi cor FCD terhadap ketahanan oksidasinya perlu dilakukan untuk pengujian berikutnya.
2. Analisis SEM dan EDS untuk komposisi persen atomik pada lapisan intermetalik perlu dilakukan untuk mengklarifikasi senyawa-senyawa yang terbentuk dari hasil difraksi sinar X (XRD).
3. Perhitungan umur lapisan Al/masa efektif pelapisan Al melindungi logam substrat perlu dilakukan guna mengetahui keefektifan dari pelapis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Andriollo, T and Hattel, J. 2016. On The Isotropic Elastic Constants of Graphite Nodules In Ductile Cast Iron: Analytical and Numerical Micromechanical Investigations. *Mechanics of Materials Pages* 138–150
- Angus, H.T., 1976. *Cast Iron: Physical and Engineering Properties*. Butterworths. London. 552 Pages.
- ASM Handbook. 1985. *Metal Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*. 1627 Pages. ASM International.
- ASM Metals Handbook. 2005. *Metal Handbook Volume 1: Properties and Selection Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. 2521 Pages ASM International.
- Burstein, G.T., Shreir, L.L., and Jarman, R.A. 1994. *Corrosion (Third Edition): Metal/Environment Reactions*. Plenta Tree.
- Callister Jr., W. D. and Rethwisch, D. G., 2009. *Materials Science and Engineering An Introduction (Eight Editioin)*. John Wiley & Sons, Inc. United States of America. 1000 Pages.
- Ceschini, L., Campana, G., Pagano, N., and Angelini, V. 2016. Effect of Laser Surface Treatment On The Dry Sliding Behaviour of The ENGJS400-12 Ductile Cast Iron. *Tribology International Volume 104 Pages* 342–351
- Chaengkham, P. dan Srichandr P. 2011. Continuously Cast Ductile Iron: Processing, Structures, and Properties. *Journal of Materials Processing Technology Volume 211 Pages* 1372–1378

- Chen S.M., dan Wang C.J., 2006. The High-Temperature Oxidation Behavior of Hot-Dipping Al-Si Coating On Low Carbon Steel. *Surface & Coatings Technology Volume 200 pages 6601–6605*
- Encyclopaedia Britannica, 4 Agustus 2016. Cast Iron. Diakses pada tanggal 18 Januari 2017. <https://www.britannica.com/technology/cast-iron>.
- Fontana, Mars Guy. 1986. *Corrosion Engineering*. McGraw Hill Book Company. Singapore
- Gleeson, B. 2010. Thermodynamics and Theory of External and Internal Oxidation of Alloys. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. *Shreir's Corrosion Volume 1 Pages 180–194*.
- Lin, M. B. and Wang, C. J. 2010. Microstructure and High Temperature Oxidation Behavior of Hot-Dip Aluminized Coating on High Silicon Ductile Iron. *Surface & Coatings Technology* 205 PP 1220–1224.
- Martinez, I., Tanaka, R., Yamane, Y., Sekiya, K., Yamada, K., Ishihara, T., and Furuya, S. 2017. Wear mechanism of coated tools in the turning of ductile cast iron having wide range of tensile strength. *Precision Engineering Pages 46–53*
- Nurbanasari, M., Prajitno, D.H., Chany, H. 2014. Perilaku Oksidasi Paduan Ti-6Al-4V pada Temperatur Tinggi. Fakultas Teknologi Industri ITENAS. Bandung
- Pieraggi B. 1987 Calculations of parabolic reaction rate constants. *Oxidation Metals Volume 27 Pages 177-185*.
- Tutu, R., Subaer, S., dan Usman, U. 2015. Studi Analisis Karakterisasi dan Mikrostruktur Mineral Sedimen Sumber Air Panas Sulili di Kabupaten Pinrang. Jurusan Fisika Fakultas MIPA, Universitas Negeri Makassar
- Reynaud, A. 2010. Corrosion of Cast Irons. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. *Shreir's Corrosion Volume 3 Pages 1737–1788*.
- Rourke, R., 2001. Cast iron: The engineered metal. *Advanced Materials & Processes Volume 159 Pages 65-68*.
- Sartono, A.A., 2006. Difraksi sinar-X (X-RD). Tugas Akhir Mata kuliah proyek Laboratorium. Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

<https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/xray-diffraction/index.php>. Di akses pada tanggal 20 Januari 2017

- Singh, Ramesh. 2012. *Applied Welding Engineering (Second Edition): Processes, Codes, and Standards*. Butterworth-Heinemann. 415 Pages.
- Smith W.J. dan Goodwin F.E., 2010. Hot Dipped Coatings. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. *Shreir's Corrosion Volume 4 Pages 2556–2576*.
- Wang, C.J. dan Badaruddin, M. 2010. The dependence of high temperatur resistance of aluminized steel exposed to water-vapour oxidation. *Surface and Coating Technology Volume 205 Pages 1200-1205*.
- Zakaria, 2003. Analisis Kandungan Mineral Magnetik pada Batuan Beku dari Daerah Istimewe Yogyakarta dengan Metode *X-Ray Diffraction*. Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Haluoleo: Kendari.
- Zhou, C. G. dan Song, Y. X. 2011. Oxidation and Hot Corrosion of Thermal Barrier Coatings (TBCs). *Thermal Barrier Coatings. A volume in Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, Pages 193–214*