

## TESIS

### **STUDI PENGARUH PENAMBAHAN MAGNESIUM (Mg), TEMBAGA (Cu), SENG (Zn) TERHADAP KETAHANAN KOROSI EROSI DAN SIFAT MEKANIK PADA PADUAN ALUMINIUM A383**

*A Study of the Effect of Additional Magnesium (Mg), Copper (Cu), Zinc (Zn) on Erosion-Corrosion Resistance and Mechanical Properties in Aluminum A383 Alloy*

**ARYA AHMAD AMIRUDDIN  
D022192002**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**



## **PENGAJUAN TESIS**

# **STUDI PENGARUH PENAMBAHAN MAGNESIUM (Mg), TEMBAGA (Cu), SENG (Zn) TERHADAP KETAHANAN KOROSI EROSI DAN SIFAT MEKANIK PADA PADUAN ALUMINIUM A383**

Tesis  
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

ARYA AHMAD AMIRUDDIN  
D022192002

Kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2023**



# LEMBAR PENGESAHAN

## STUDI PENGARUH PENAMBAHAN MAGNESIUM (Mg), TEMBAGA (Cu), SENG(Zn) TERHADAP KETAHANAN KOROSI EROSI DAN SIFAT MEKANIK PADA PADUAN ALUMINIUM A383

Disusun dan diajukan oleh

**ARYA AHMAD AMIRUDDIN**

**D022192002**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 13 Oktober 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui  
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama



**Dr.Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT.**

NIP. 19740415 199903 1 001

Pembimbing Pendamping



**Dr. Ir. Hairul Arsyad, ST., MT.**

NIP. 19750322 200212 1 00

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin



**Ir. Muhammad Isran Ramli,**  
**IPM., ASEAN. Eng**

NIP. 197926 200012 1 002

**Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST, MT**

NIP. 1979111220081220002

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Arya Ahmad Amiruddin  
Nomor mahasiswa : D022192002  
Program studi : Magister Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Studi Pengaruh Penambahan Magnesium (Mg), Tembaga (Cu), Seng (Zn) terhadap Ketahanan Korosi Erosi dan Sifat Mekanik pada Paduan Aluminium A383” adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing Dr.Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT. dan Dr. Ir. Hairul Arsyad, ST., MT. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal/Prosiding (Nama, Volume, Halaman, dan DOI) sebagai artikel dengan judul “Studi Pengaruh Penambahan Magnesium (Mg) terhadap Ketahanan Korosi Erosi dan Kekuatan Bending pada Paduan Aluminium A383”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 13 Oktober 2023

Yang menyatakan



Arya Ahmad Amiruddin



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmat, hidayah, taufik dan pertolongan-Nya dalam menyelesaikan tesis yang berjudul “*Studi Pengaruh Penambahan Magnesium (Mg), Tembaga (Cu), Seng (Zn) terhadap Ketahanan Korosi Erosi dan Sifat Mekanik pada Paduan Aluminium A383*” sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) di Program Pascasarjana Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Shalawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu ‘alaihi Wa Sallam, beserta keluarga dan para sahabatnya yang telah membimbing kita dari jalan kegelapan menuju jalan yang terang benderang.

Penyusunan tesis ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr.Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT. sebagai pembimbing utama, dan Hairul Arsyad, ST., MT. sebagai pembimbing pendamping.
2. Prof. Dr. Ir. Onny Sutresman, MT., Dr. Ir. Ahmad Yusran Aminy, MT., Dr. Ir. Muhammad Syahid, ST., MT. sebagai tim penguji.
3. Rektor universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program magister sertapara dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
4. Para pimpinan PT DSSP Power Kendari yang telah mengizinkan kami untuk menggunakan peralatan dan melaksanakan penelitian di lapangan.
5. Kepala Laboratorium Metalurgi Fisik dan Kepala Laboratorium Pengecoran Universitas Hasanuddin.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada istri, mertua, kakak/adik dan teman-teman atas motivasi dan dukungan yang tak

Penulis

Arya Ahmad Amiruddin



## ABSTRAK

**ARYA AHMAD AMIRUDDIN.** *Studi Pengaruh Penambahan Magnesium (Mg), Tembaga (Cu), Seng (Zn) terhadap Ketahanan Korosi Erosi dan Sifat Mekanik pada Paduan Aluminium A383* (dibimbing oleh **Lukmanul Hakim Arma, Hairul Arsyad**)

Pada penelitian ini dilakukan evaluasi ketahanan korosi erosi dan sifat mekanik paduan aluminium A383 dengan variasi penambahan 4%, 6%, dan 9% magnesium, tembaga, dan seng dengan variasi kecepatan (45l/h, 60l/h, dan 75l/h), dan variasi sudut (30°, 40°, dan 50°) menggunakan larutan natrium hipoklorit 12%. Alat uji yang digunakan adalah pompa diafragma injeksi pada sistem resirkulasi selama 4 jam per sampel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketahanan korosi erosi paduan A383 lebih baik dengan adanya penambahan magnesium 9% yaitu 9,96 ipy dibandingkan dengan penambahan tembaga 9% yaitu 17,89 ipy dan seng 9% yaitu 16,99 ipy pada paduan A383. Laju korosi maksimum paduan terjadi pada material A383 4%Zn dengan sudut impact 30° dengan kecepatan 75 l/jam yaitu 32,93 ipy dimana sudut impact dipengaruhi oleh mekanisme *cutting wear* dan kecepatan aliran diakibatkan oleh mekanisme *wall shear stress*. Degradasi sedikit menurun dengan meningkatnya sudut impact dan penurunan kecepatan. Analisis mekanisme erosi-korosi menunjukkan bahwa proses korosi mendominasi kerusakan material daripada erosi. Hasil pengujian sifat mekanik dengan pengujian bending menunjukkan kekuatan tertinggi secara berurutan adalah A383 9%Zn yaitu 476,44 MPa, A383 9%Cu yaitu 464,39 MPa, A383 9%Mg yaitu 366,09 MPa, dan kekuatan bending terendah adalah raw material A383 yaitu 261,80 MPa. Dari hasil tersebut, penambahan unsur magnesium (Mg), tembaga (Cu), dan seng (Zn) pada paduan aluminium dapat memperbaiki batas butir sehingga mempersulit pergerakan dislokasi sehingga meningkatkan kekuatan dan ketahanan korosi.

**Kata kunci:** Korosi erosi, Laju korosi, Magnesium, Tembaga, Seng



## ABSTRACT

**ARYA AHMAD AMIRUDDIN.** *A Study of the Effect of Additional Magnesium (Mg), Copper (Cu), Zinc (Zn) on Erosion-Corrosion Resistance and Mechanical Properties in Aluminum A383 Alloy* (Supervised by **Lukmanul Hakim Arma, Hairul Arsyad**)

In this research, evaluation of erosion-corrosion resistance and mechanical properties of aluminum alloy A383 was carried out with various additions of 4%, 6%, and 9% magnesium, copper, and zinc with variations in flow velocity (45l/h, 60l/h, and 75l/h). and angle variations (30°, 40°, and 50°) using 12% sodium hypochlorite solution. The test equipment used is an injection diaphragm pump in a recirculation system for 4 hours per sample. The results showed that the erosion-corrosion resistance of A383 alloy was better with the addition of 9% magnesium, namely 9.96 ipy compared to the addition of 9% copper, namely 17.89 ipy, and 9% zinc, namely 16.99 ipy in A383 alloy. The maximum corrosion rate of the alloy occurred in 4%Zn A383 material with an impact angle of 30° with a flow velocity of 75 l/hour, namely 32.93 ipy where the impact angle was affected by the cutting wear mechanism and flow velocity caused by the wall shear stress mechanism. Degradation decreased slightly with increasing impact angle and decreasing velocity. Analysis of the erosion-corrosion mechanism shows that the corrosion process dominates the material damage rather than erosion. The results of the mechanical properties test by bending test showed that the highest strength sequentially was A383 9%Zn which is 476.44 MPa, A383 9%Cu which is 464.39 MPa, A383 9%Mg which is 366.09 MPa, and the lowest bending strength was raw material A383 is 261.80 MPa. From these results, the addition of elements of magnesium (Mg), copper (Cu), and zinc (Zn) to aluminum alloys can improve grain boundaries making dislocation movement difficult thereby increasing strength and corrosion resistance.

**Kata kunci:** Erosion - corrosion, Corrosion rate, Magnesium, Copper, Zinc



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN TESIS.....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Ruang Lingkup Penelitian .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Pengecoran Logam .....	7
2.1.1 Pengertian pengecoran logam .....	7
2.1.2 Klasifikasi proses pengecoran logam .....	8
2.1.3 Pengecoran dengan cetakan logam .....	9
2.2 Aluminium dan Paduan Aluminium .....	11
2.2.1 Sifat – sifat paduan aluminium .....	13
2.2 Paduan aluminium tuang .....	14
2.3 Paduan aluminium – silikon – tembaga .....	15
2.4 Efek unsur paduan .....	18



2.2.5 Pengaruh struktur mikro terhadap sifat mekanis paduan Al-Si .....	22
2.2.6 Fasa intermetalik .....	22
2.2.7 Paduan aluminium A383 .....	23
2.3 Korosi .....	24
2.3.1 Korosi pada aluminium .....	25
2.3.2 Korosi erosi .....	26
2.3.3 Pengaruh kecepatan aliran terhadap sinergisme korosi dan erosi .....	28
2.3.4 Pengaruh aliran laminar dan turbulen .....	30
2.3.5 Pengaruh sudut impak .....	32
2.3.6 Mekanisme sinergi .....	34
2.4 Laju Korosi (Corrosion Rate) .....	36
2.5 Natrium Hipoklorit .....	37
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>39</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	39
3.2 Bahan dan Alat Penelitian .....	41
3.3 Alat Simulasi Pengujian Korosi Erosi .....	46
3.3.1 Instalasi alat uji korosi erosi .....	46
3.3.2 Cara kerja alat uji korosi erosi .....	47
3.4 Pelaksanaan Penelitian .....	47
3.4.1 Persiapan bahan .....	47
3.4.2 Persiapan larutan kimia .....	49
3.4.3 Proses pengujian .....	49
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>56</b>
4.1 Data Hasil Pengujian Uji Komposisi .....	56
4.2 Analisa Hasil Pengujian Korosi dengan Variasi Kecepatan Aliran .....	57
4.3 Analisa Hasil Pengujian Korosi dengan Variasi Sudut Impak .....	64
4.4 Pengaruh Penambahan Magnesium (Mg), Tembaga (Cu), dan Seng (Zn) pada Material A383 terhadap Ketahanan Korosi .....	70
Pengamatan Berdasarkan SEM .....	72
Data Hasil Pengujian Bending .....	81
Pengujian Kekerasan Material A383 .....	85



4.8 Pengaruh Natrium Hipoklorit terhadap Korosi Aluminium.....	88
4.9 Hasil Foto Makro .....	89
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>95</b>
5.1 Kesimpulan.....	95
5.2 Saran.....	97
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>98</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>104</b>



## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Sifat mekanik aluminium pada suhu kamar .....	12
<b>Tabel 2.2</b> Sifat fisik aluminium murni .....	13
<b>Tabel 2.3</b> Tatanama paduan aluminium tuang .....	15
<b>Tabel 2.4</b> Komposisi kimia paduan aluminium A383.....	24
<b>Tabel 2.5</b> Sifat fisik dari paduan aluminium A383 .....	24
<b>Tabel 2.6</b> Peringkat laju korosi.....	37
<b>Tabel 3.1</b> Bahan yang digunakan pada penelitian .....	41
<b>Tabel 3.2</b> Alat yang digunakan pada penelitian .....	43
<b>Tabel 3.3</b> Komposisi kimia paduan aluminium A383.....	49
<b>Tabel 3.4</b> Analisis kimia natrium hipoklorit .....	49
<b>Tabel 4.1</b> Data hasil pengujian komposisi raw material A383.....	56
<b>Tabel 4.2</b> Data hasil pengujian komposisi kimia unsur Cu setelah proses pengecoran (raw material A383 + Cu) menggunakan XRF.....	56
<b>Tabel 4.3</b> Data hasil pengujian komposisi kimia unsur Mg setelah proses pengecoran (raw material A383 + Mg) menggunakan XRF.....	57
<b>Tabel 4.4</b> Data hasil pengujian komposisi kimia unsur Zn setelah proses pengecoran (raw material A383 + Zn) menggunakan XRF .....	57
<b>Tabel 4.5</b> Bilangan reynold pada tiap kecepatan aliran.....	62
<b>Tabel 4.6</b> Nilai <i>wall shear stress</i> pada pengujian dengan variasi kecepatan aliran .....	63
<b>Tabel 4.7</b> Hubungan kecepatan, sudut impak, dan tekanan kerja .....	70
<b>Tabel 4.8</b> Hasil pengujian kekerasan.....	85



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Aliran proses Pembuatan Coran .....	8
<b>Gambar 2.2</b> Contoh cetakan permanen untuk pengecoran logam.....	10
<b>Gambar 2.3</b> (a) Diagram kesetimbangan Al-Si, (b) mikrostruktur Al-Si hipoeutektik, (c) mikrostruktur Al-Si eutektik, (d). mikrostruktur Al-Si hipereutektik .....	17
<b>Gambar 2. 4</b> Korosi erosi pada impeller pompa air .....	28
<b>Gambar 2. 5</b> Korosi erosi pada pipa kondenser.....	28
<b>Gambar 2.6</b> (a) Tegangan geser aliran laminer oleh gerakan acak molekul, (b) Aliran turbulen sebagai rangkaian eddies tiga dimensi yang acak . .....	31
<b>Gambar 2.7</b> Mekanisme pengrusakan oleh gaya normal .....	32
<b>Gambar 2.8</b> Mekanisme pengrusakan oleh gaya tangensial.....	33
<b>Gambar 2.9</b> Kurva pengaruh sudut impak pada erosi untuk material ulet dan material getas.....	34
<b>Gambar 2.10</b> Pengaruh sudut impak terhadap kerusakan material .....	34
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian .....	40
<b>Gambar 3.2</b> (a) Desain instalasi alat uji korosi erosi, (b) Desain instalasi alat uji korosi erosi dilapangan.....	46
<b>Gambar 3.3</b> (a) Dimensi spesimen, (b) Keadaan awal spesimen .....	48
<b>Gambar 3.4</b> Posisi sudut impak (a) 30 <sup>0</sup> , (b) 40 <sup>0</sup> , dan (c) 50 <sup>0</sup> pemasangan sampel di dalam rangkaian instalasi pengujian.....	50
<b>Gambar 3.5</b> Dua komponen utama pada SEM .....	51
<b>Gambar 3.6</b> Skema dasar pengujian SEM-EDS .....	52
<b>Gambar 3.7</b> Tipe-tipe lekukan piramid intan: (a) lekukan yang sempurna, (b) lekukan bantal jarum, (c) lekukan berbetuk tong .....	54
<b>Gambar 3.8</b> Mekanisme pengujian <i>Three point bending</i> .....	55
<b>4.1</b> Laju korosi pada beberapa komposisi tembaga (Cu) akibat variasi kecepatan aliran pada sudut impak (a) 30 <sup>0</sup> , (b) 40 <sup>0</sup> , dan (c) 50 <sup>0</sup> ...	58



<b>Gambar 4.2</b>	Laju korosi pada beberapa komposisi magnesium (Mg) akibat variasi kecepatan aliran pada sudut impak (a) 30 <sup>0</sup> , (b) 40 <sup>0</sup> , dan (c) 50 <sup>0</sup> .....	60
<b>Gambar 4.3</b>	Laju korosi pada beberapa komposisi seng (Zn) akibat variasi kecepatan aliran pada sudut impak (a) 30 <sup>0</sup> , (b) 40 <sup>0</sup> , dan (c) 50 <sup>0</sup> ...	61
<b>Gambar 4.4</b>	Laju korosi pada beberapa komposisi tembaga (Cu) akibat variasi sudut impak pada kecepatan aliran (a) 45 l/h, (b) 60 l/h, dan (c) 75 l/h.....	65
<b>Gambar 4.5</b>	Laju korosi pada beberapa komposisi magnesium (Mg) akibat variasi sudut impak pada kecepatan aliran (a) 45 l/h, (b) 60 l/h, dan (c) 75 l/h .....	66
<b>Gambar 4.6</b>	Laju korosi pada beberapa komposisi seng (Zn) akibat variasi sudut impak pada kecepatan aliran (a) 45 l/h, (b) 60 l/h, dan (c) 75 l/h .	67
<b>Gambar 4.7</b>	Analisis SEM-EDS menunjukkan analisis pemetaan unsur paduan aluminium A383 .....	77
<b>Gambar 4.8</b>	Analisis SEM-EDS menunjukkan analisis pemetaan unsur paduan aluminium A383 dengan penambahan Tembaga (Cu) 6%.....	78
<b>Gambar 4.9</b>	Analisis SEM-EDS menunjukkan analisis pemetaan unsur paduan aluminium A383 dengan penambahan Magnesium (Mg) 6% .....	79
<b>Gambar 4.10</b>	Analisis SEM-EDS menunjukkan analisis pemetaan unsur paduan aluminium A383 dengan penambahan Seng (Zn) 6% .....	80
<b>Gambar 4.11</b>	Tegangan bending pada aluminium A383 dan aluminium A383 dengan variasi penambahan tembaga (Cu).....	81
<b>Gambar 4.12</b>	Tegangan bending pada aluminium A383 dan aluminium A383 dengan variasi penambahan magnesium (Mg).....	82
<b>Gambar 4.13</b>	Tegangan bending pada aluminium A383 dan aluminium A383 dengan variasi penambahan seng (Zn).....	84
<b>Gambar 4.14</b>	Pengaruh penambahan unsur Mg, Cu, dan Zn pada material aluminium paduan A383 terhadap nilai kekerasan .....	86
<b>4.15</b>	Foto makro sebelum dan sesudah korosi permukaan paduan A383 .....	90



<b>Gambar 4.16</b> Foto makro sebelum dan sesudah korosi permukaan paduan A383 Cu4%, Cu6%, dan Cu9% .....	91
<b>Gambar 4.17</b> Foto mikro sebelum dan sesudah korosi permukaan paduan A383 Mg4%, Mg6%, dan Mg9% .....	93
<b>Gambar 4.18</b> Foto makro sebelum dan sesudah korosi permukaan paduan A383 Zn4%, Zn6%, dan Zn9% .....	94



## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> Perencanaan cetakan dan penambahan unsur .....	104
<b>Lampiran 2</b> Hasil pengujian laju korosi .....	106
<b>Lampiran 3</b> Perhitungan bilangan Reynold dan <i>Wall Shear Stress</i> .....	112
<b>Lampiran 4</b> Hasil pengujian bending .....	114
<b>Lampiran 5</b> Hasil pengujian kekerasan .....	115



## DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
A383	= Paduan aluminium cor (Al-Si-Cu)
Re	= Reynold
V	= Kecepatan rata-rata dalam (m/s)
d	= Diameter dalam pipa dalam (m)
$\nu$	= Viskositas kinematik fluida dalam ( $m^2/s$ )
$\rho$	= Densitas massa fluida ( $kg/m^3$ )
$\mu$	= Viskositas dinamik fluida ( $kg/m.s$ )
q	= Debit ( $m^3/s$ )
$\tau_w$	= Tegangan geser pada dinding dalam pipa ( $N/m^2$ )
$\tau$	= Tegangan geser yang bekerja pada titik pada fluida ( $N/m^2$ )
du	= Kecepatan cairan sepanjang batasan ( $kg/m.s$ )
d $\gamma$	= Ketinggian diatas batasan (m)
Cr	= Laju korosi dalam satuan mpy (mils per year)(mm/y)
W	= Massa yang hilang (mg)
A	= Luas sampel yang terendam ( $in^2$ )
D	= Density logam ( $g/cm^3$ )
Ipy	= Inch per year
NaOCl	= Natrium hipoklorit
SEM	= <i>Scanning electron microscope</i>
XRF	= <i>X-ray fluorescence</i>
EDS	= <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>
VHN	= <i>Vickers hardness number</i>
P	= Beban yang digunakan (kg)
d	= Panjang diagonal rata-rata (mm)
$\theta$	= Sudut antara permukaan intan yang berhadapan : $136^\circ$
$\sigma_f$	= Tegangan Bending/lengkung ( $Kg/mm^2$ )
P	= Beban atau Gaya yang terjadi (kgf)
	= Jarak <i>point</i> (mm)
	= Lebar benda uji (mm)
	= Ketebalan benda uji (mm)



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Korosi merupakan peristiwa kerusakan atau kehancuran pada material akibat adanya reaksi kimia pada sekitar lingkungannya. Korosi merupakan degradasi yang dialami oleh serangan terhadap bahan logam akibat terjadinya reaksi reduksi-oksidasi antara logam dengan lingkungannya (Bardal, 2003). Salah satu bentuk korosi yang sering kita temui di suatu industri ialah korosi erosi.

Erosi-korosi umum terjadi di pabrik pengolahan minyak dan gas di mana ada interaksi antara partikel padat, cairan korosif dan sasaran material (Islam dan Farhat, 2017). Perpaduan antara erosi dan korosi, disebut erosi-korosi, mempercepat laju inefisiensi material, menyebabkan masalah besar pada komponen teknik seperti : pompa, katup, agitator, kondensor dan tabung penukar panas, peralatan penyuplai bensin, dan jaringan pipa bersentuhan dengan lumpur berair selama operasi dan dapat terkena degradasi erosi-korosi (Abedini dan Ghasemi, 2016). Selama fenomena erosi-korosi, kehilangan berat yang diamati lebih besar daripada penjumlahan kehilangan berat akibat erosi murni dan korosi murni yang terjadi secara terpisah (Kermani dan Morshed, 2003).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengetahui faktor apa saja yang berpengaruh terhadap fenomena tersebut. Fenomena ini terjadi pada kecepatan aliran tinggi di mana material mengalami keausan karena aliran fluida yang cepat yang mendukung korosi dan diperburuk oleh suhu tinggi dan partikel abrasif yang menyebabkan keausan (Roy dkk., 2018); (Karlsdottir dkk., 2014); (Rosa dkk., 2017), sedangkan sudut impact juga menjadi suatu faktor sangat besar dalam perilaku erosi-korosi kuningan dan laju erosi-korosi tertinggi diperoleh pada sudut impact dengan dengan nilai yang rendah dibandingkan sudut impact dengan nilai yang sedang atau tinggi (Ouassir dkk., 2019). Penelitian yang lain telah dilakukan untuk memahami pengaruh perilaku erosi-korosi material untuk material ulet telah

dan bahwa erosi-korosi memiliki laju maksimum pada sudut pelampiasan mulai dari 15° hingga 30° (Stachowiak dan Batchelor, 2005). (Azarian 15) menyelidiki perilaku erosi-korosi dari beberapa material dan



menunjukkan bahwa untuk paduan aluminium murni, laju erosi-korosi maksimum terjadi pada sudut impak  $30^\circ$  dan minimum laju ini terjadi pada sudut impak  $90^\circ$ . Perpaduan antara keduanya dapat mengakibatkan material tersebut mengalami kerusakan akibat proses erosi korosi. Namun erosi korosi dapat terjadi dengan cepat karena adanya fluida berupa natrium hipoklorit.

Larutan natrium hipoklorit suatu pengoksidasi yang kuat dengan reaksi oksidasi bersifat korosif, ditambah dengan adanya kecepatan aliran dari larutan tersebut sehingga terjadilah fenomena korosi erosi. Fluida berupa natrium hipoklorit dipakai untuk melumpuhkan mikroorganisme yang terdiri dari bakteri, archaea, jamur, alga, dan protozoa agar tidak bersarang dan merusak peralatan dengan konsentrasi yang diinginkan. Natrium hipoklorit merupakan larutan yang bersifat basa dibagi menjadi asam klorida (HCl) dan Oksigen (O) (Qin dkk., 2014). Atom oksigen adalah oksidator yang sangat kuat. Terbentuknya produk korosi dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya faktor fluida berupa natrium hipoklorit yang merupakan oksidator yang sangat kuat (Somani dkk., 2011).

Peralatan yang biasa digunakan dalam industri modern seperti peralatan ruang angkasa, dan ruangan transit kereta api kereta api menggunakan material aluminium yang merupakan salah satu jenis logam *non ferrous* yang sangat ringan. Namun, teknologi persediaan material paduan aluminium secara keseluruhan masih perlu terus ditingkatkan (Xu dkk., 2020). Kekuatan logam aluminium murni memang tidak sebaik logam lainnya, namun untuk meningkatkan kekuatan logam aluminium dikombinasikan dengan unsur lain seperti Cu, Si, Mg, Zn, Mn, dan Ni. Paduan aluminium ini biasa disebut paduan aluminium (Prabudiyanto dan Sudarman, 2020); (Mizhar dkk., 2016).

Salah satu paduan dan unsur paduan yang digunakan pada penelitian ini adalah paduan aluminium A383 (Al-Si-Cu) dengan variasi penambahan Tembaga (Cu), Magnesium (Mg), dan Seng (Zn), yang mana dalam hal ini paduan aluminium A383 (Al-Si-Cu) merupakan paduan aluminium cor yang banyak digunakan karena sifat materialnya yang sangat baik, yaitu kemampuan cor yang



terapatan rendah, produktivitas tinggi, tingkat penyusutan rendah, relatif tinggi, ketahanan korosi yang baik, dan kemampuan mesin yang mana tingkat silikon yang lebih tinggi dan tingkat tembaga yang lebih

rendah (Okayasu dkk., 2012). Tembaga (Cu) ditambahkan ke paduan Al untuk meningkatkan kekuatan material. Semakin tinggi kandungan tembaga, semakin banyak fase yang terbentuk, meningkatkan kekerasan dan kekuatan paduan. Sifat lain yang meningkat dengan adanya tembaga dalam paduan Al-Si-Cu adalah ketahanan korosi dan ketahanan aus (Svenningsen dkk., 2006). Magnesium (Mg) memungkinkan pembuatan bentuk yang baik dengan metode produktivitas tinggi seperti die casting bertekanan tinggi untuk paduan aluminium dalam pembuatan komponen secara nyata meningkatkan kekuatan aluminium tanpa mengurangi keuletannya. Ketahanan korosi dengan kekuatan yang lebih tinggi (Esmaily dkk., 2017); (*ASM Metals Handbook*, 2001). Seng (Zn) secara efektif dapat meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosinya relatif lebih baik terutama diaplikasikan pada paduan aluminium (Xu dkk., 2020).

Dalam penerapannya, produk yang diproduksi oleh industri logam memenuhi persyaratan bahwa produk yang diproduksi harus memiliki sifat-sifat tertentu yang menunjukkan kinerja dari produk tersebut. Sifat ini termasuk kekuatan bending dan ketahanan korosi. Banyak hal yang mempengaruhi sifat mekanik aluminium. Proses pemesinan, metode pembentukan dan kandungan paduan semuanya mempengaruhi kekuatan aluminium.

Menambahkan unsur paduan merupakan salah satu cara untuk mencapai sifat ketahanan korosi dan meningkatkan sifat mekaniknya. Ketahanan korosi sangat penting ketika material diaplikasikan pada lingkungan dan fluida yang dapat memicu terjadinya korosi. manajemen fungsi dan kekuatan material yang disebabkan oleh korosi menyebabkan penyusutan, pengurangan ketebalan volume material, yang juga mengurangi kekuatan, dan juga mempengaruhi nilai ketahanan bending.

Sehubungan dengan penelitian, maka penelitian ini bertujuan untuk mengamati pengaruh penambahan tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn) pada paduan aluminium A383 terhadap ketahanan korosi dan kekuatan mekanik. Metode pengujian menggunakan instalasi simulasi sirkulasi tertutup.

anik duji berdasarkan kekuatan bending dengan metode *three point bend* rasan *vickers*. Pengujian struktur mikro menggunakan *scanning electron*



*microscope* (SEM). Kerusakan permukaan hasil pengujian diamati menggunakan foto makro.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas dapat dibuat rumusan masalah dari penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh sudut impak terhadap kerusakan akibat korosi erosi pada material paduan aluminium A383 dengan penambahan tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn) ?
2. Bagaimana pengaruh kecepatan aliran terhadap kerusakan akibat korosi erosi pada material paduan aluminium A383 dengan penambahan tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn) ?
3. Bagaimana pengaruh penambahan tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn) pada paduan aluminium A383 terhadap struktur mikro, kekuatan bending, dan kekerasan ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis pengaruh sudut impak terhadap kerusakan akibat korosi erosi pada material paduan aluminium A383 dengan penambahan tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn).
2. Menganalisis pengaruh kecepatan aliran terhadap kerusakan akibat korosi erosi pada material paduan aluminium A383 dengan penambahan tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn).
3. Menganalisis pengaruh penambahan tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn) pada paduan aluminium A383 terhadap struktur mikro, kekuatan bending, dan kekerasan.

## 1.4 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang timbul lebih mengarah pada permasalahan semula, maka dalam penelitian ini perlu adanya batasan-batasan berupa variabel, baik tetap maupun tidak tetap. Adapun variabelnya adalah sebagai berikut :



abel tetap

aterial yang digunakan (paduan aluminium A383).

arutan elektrolit (natrium hipoklorit 12%).

- c. Waktu pengujian selama 4 jam per sampel.
  - d. Temperatur selama pengujian dianggap konstan.
  - e. Distribusi paduan dianggap homogen .
  - f. pH larutan = 11-12.
  - g. Temperatur peleburan dianggap homogen.
  - h. Pemaduan dianggap homogen.
  - i. Pengaruh dari kelembapan dan oksigen dianggap tidak ada.
2. Variabel tidak tetap
    - a. Kecepatan aliran (45 l/h, 60 l/h, dan 75 l/h).
    - b. Sudut impak ( $35^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ , dan  $65^{\circ}$ ).
    - c. Penambahan unsur Cu, Mg, dan Zn dengan total penambahan masing-masing 4%, 6%, dan 9%.

### 1.5 Manfaat Penelitian

1. Sebagai bahan referensi terutama pada bidang pengecoran logam dalam hal mengetahui kekuatan bending dan ketahanan korosi dengan penambahan tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn) pada paduan aluminium A383.
2. Mengetahui pengaruh penambahan tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn) terhadap kekerasan dan strukturmikro pada paduan aluminium A383.
3. Mampu mengaplikasikan ilmu dan teori yang telah didapatkan selama proses belajar diperkuliahan.
4. Sebagai bahan pembanding dan dasar pendekatan untuk penelitian selanjutnya.

### 1.6 Ruang Lingkup

Pada penelitian ini, material yang digunakan berupa paduan aluminium A383, A383 Cu4%, A383 Cu6%, A383 Cu9%, A383 Mg4%, A383 Mg6%, A383 Mg9%, A383 Zn 4%, A383 Zn6%, dan A383 Zn9% yang berbentuk plat. Larutan elektrolit yang digunakan adalah larutan natrium hipoklorit dengan konsentrasi 12%. Untuk pengujian korosi menggunakan sistem simulasi sirkulasi tertutup. Untuk pengujian struktur mikro akan *scanning electron microscope* + *EDS mapping*. Untuk pengujian bending menggunakan metode *three point bend*. Untuk pengujian



kekerasan menggunakan metode kekerasan *vickers*. Untuk mengetahui kerusakan permukaan menggunakan *usb microscope* sebagai foto makro.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pengecoran Logam

##### 2.1.1 Pengertian pengecoran logam

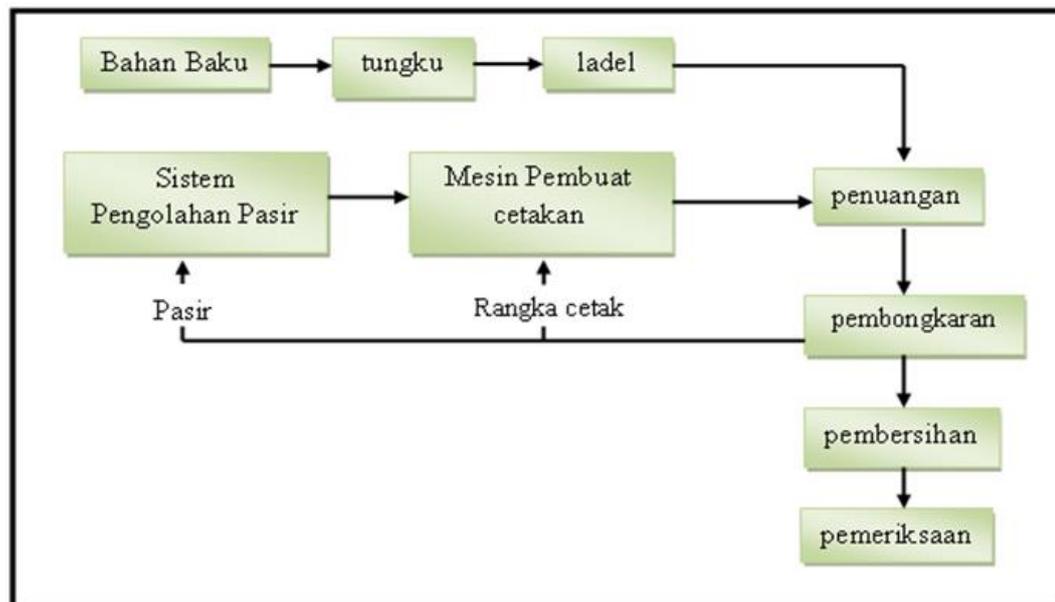
Pengecoran (*casting*) adalah suatu proses pembuatan bahan standar atau bahan benda kerja terbilang cukup mahal dimana pengendalian kualitas benda kerja dimulai semenjak bahan masih pada kondisi mentah. Proses pengecoran merupakan suatu teknik pembentukan produk dimana logam dilebur didalam tungku peleburan selanjutnya dituangkan ke dalam cetakan agar menyerupai bentuk asli dari suatu produk pengecoran yang akan diproduksi. Pengecoran dapat menghasilkan produk yang sangat tahan lama dan tahan terhadap gesekan karena mengalami perubahan fasa disaat logam meleleh dan saat logam mendingin. Adapun keuntungan dari proses pengecoran yaitu dapat membuat bentuk yang amat sangat rumit, dapat menggunakan berbagai macam logam, dan metodenya dapat dipabrikasi secara massal. Proses pengecoran terdapat bahan cetakan yang berbeda-beda, antaranya yaitu terbuat dari pasir, logam, dan keramik. Tiap-tiap dari semua bahan cetakan ini dapat mempengaruhi kualitas logam cair. Keunggulan ini terutama terkait dengan karakteristik mekanik dan cacatnya yang terbentuk selama proses pengecoran hingga pembekuan.

Pengecoran logam adalah proses pembuatan benda dengan cara melebur logam dan menuangkannya ke dalam cetakan. Teknik ini dapat digunakan untuk membuat objek dengan bentuk yang kompleks. Benda berongga yang sangat besar yang terlalu sulit atau terlalu mahal untuk diproduksi dengan metode lain dapat diproduksi secara massal menggunakan teknik pengecoran yang layak secara komersial.

Pengecoran logam dapat digunakan untuk berbagai logam seperti besi, baja, paduan tembaga, perunggu, kuningan, aluminium perunggu, dan lain-lain. Paduan ringan seperti paduan aluminium, paduan magnesium, dan lain-lain. innya seperti paduan sen, monel (paduan nikel dengan sedikit tembaga), (paduan yang mengandung molibdenum, kromium dan silikon) dan lain-



Pengecoran logam merupakan suatu proses manufaktur yang dibentuk berdasarkan logam yang dicairkan, kemudian dituang ke dalam cetakan, lalu ditunggu sampai mendingin dan membeku untuk membentuk suatu geometri akhir produk. Proses pengecoran logam adalah proses pembentukan produk didahului dengan mencairkan logam menuju tungku peleburan lalu dituang menuju cetakan yang sebelumnya dibentuk pola sampai logam cair tadi membeku dan selanjutnya dipindahkan dari cetakan. Kebanyakan pengecoran perusahaan kecil tidak semuanya mempergunakan aluminium murni tetapi menggunakan *scrap* atau hasil dari peleburan yang sebelumnya dan pengecoran menggunakan aluminium mentah yang telah mengalami proses pengecoran yang disebut dengan *remelting*. Pengecoran dipakai untuk menciptakan logam pada syarat panas sinkron menggunakan bentuk cetakan yang sudah dibuat. Metode pengecoran ini merupakan metode yang menaruh kelentukan dan kemampuan yang tinggi sebagai akibatnya adalah proses dasar yang krusial pada pengembangan suatu industri. Pengecoran dapat mengurangi bahan baku supaya tidak adanya material yang terbuang sia-sia, maka dari itu dapat menghemat biaya dalam produksi.



**Gambar 2.1** Aliran proses pembuatan Coran (Surdia dan Chijiiwa, 1976)

### 2.1.2 Klasifikasi proses pengecoran logam



Proses pengecoran logam pada dasarnya terbagi menjadi dua yaitu:

*expendable-mould casting*

dan  *expendable-mould casting*, cetakan yang dipakai harus dihancurkan

dengantujuan untuk mengambil benda cornya. Selain itu proses pengecoran seperti ini sering kali digunakan untuk benda dengan geometri rumit.

## 2. *Permanent-mould casting*

Pada *permanent mould casting*, cetakan dapat dipakai berulang kali untuk menghasilkan benda cor yang banyak, sehingga dengan proses pengecoran seperti ini dapat lebih ekonomis pada produksi secara massal.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam proses penuangan agar diperoleh hasil yang baik meliputi seperti pada **Gambar 2.1** (Surdia dan Chijiwa, 1976):

### 1. Pengeringan ladel

Pengeringan ladel yang tidak sempurna akan menyebabkan turunnya temperatur logam cair, oksidasi dari cairan, dan cacat coran seperti rongga udara.

### 2. Pembuangan Terak

Sebelum penuangan, terak diatas cairan harus dibuang. Terak terjadi karena erosi dan lapisan. Untuk memudahkan pembuangan terak, abu jerami atau tepung gelas ditaburkan diatas permukaan logam. Mereka menutupi permukaan cairan dan mencegah penurunan temperatur.

### 3. Temperatur penuangan yang tepat

Temperatur penuangan banyak mempengaruhi kualitas coran. Jika temperatur rendah akan menyebabkan pembekuan yang pendek, pencairan yang buruk dan akan menyebabkan cacat coran seperti rongga penyusutan, rongga udara, mampat alir dan sebagainya.

### 4. Waktu penuangan yang baik

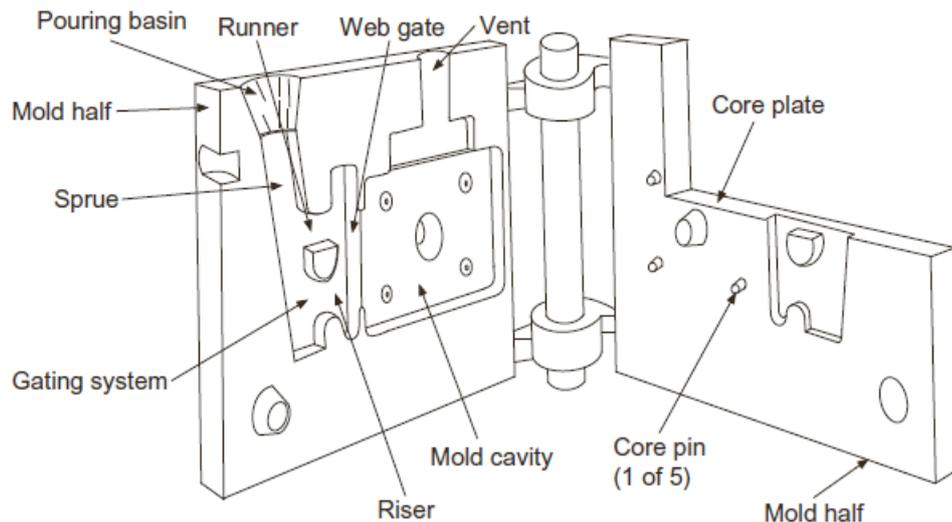
Dalam menuang logam, penting dilakukan dengan tepat dan cepat. Selain penuangan cawan tuang perlu terisi dengan logam cair. Waktu penuangan yang cocok perlu ditentukan dengan mempertimbangkan tebal dan berat coran, sifat cetakan dan sebagainya.

## 2.1.3 Pengecoran dengan cetakan logam



Pengecoran cetakan permanen adalah proses pengecoran bentuk logam yang gan pengecoran pasir, tetapi proses ini menggunakan cetakan permanen onduktivitas termal yang tinggi. Misalnya, **Gambar 2.2** menunjukkan esain cetakan logam. Fitur-fiturnya memiliki beberapa kesamaan dengan

cetakan pasir, tetapi cetakan itu sendiri harus terbuat dari bahan yang tahan lama yang mampu menahan penggunaan berulang kali, terutama siklus termal. Bahan umum untuk cetakan permanen termasuk baja, besi, dan perunggu. Cetakan logam itu sendiri sering disebut "permanen". Lapisan pada permukaan cetakan interior diterapkan untuk mencegah adhesi dan membantu pelepasan bagian (Francis dkk., 2016).



**Gambar 2.2** Cetakan permanen untuk pengecoran logam (Francis dkk., 2016)

Biasanya logam yang di cor adalah logam *non-ferrous*. Saat menggunakan cetakan logam yang digunakan harus memiliki titik leleh yang lebih tinggi dari logam cair atau cor. Pengecoran logam dilakukan dengan cara menuangkan logam cair ke dalam cetakan, sehingga pengecoran yang dilakukan mengikuti cetakan karena adanya gaya gravitasi. Dalam hal ini, metode ini cocok untuk pengecoran sederhana, karena prosesnya mudah. Untuk mendapatkan kualitas cetakan yang baik, perlu ditentukan cetakan dan proses penuangannya.

Selama proses pengecoran, logam cair mengalir melalui kedalam pintu cetakan, tidak menggunakan tekanan terkecuali tekanan itu berasal dari ketinggian logam cair dalam cetakan. Secara umum, logam cair dituangkan dengan kekuatan besar meskipun sering kali diperlukan tekanan pada logam cair atau setelah penuangan. Metode ini dapat menghasilkan coran yang berkualitas tinggi dan lebih presisi. Namun, biaya pembuatan cetakannya tinggi, sehingga jika umur cetakannya dapat diproduksi secara ekonomis.

etakan logam adalah cetakan yang dapat memberikan coran dengan tingkat mensi coran cukup dibilang sangat baik bila dibandingkan dengan cetakan mempunyai permukaan coran terbilang cukup halus, memberikan tekstur



dan sifat mekanik yang rapat dan daya ketahanan yang sangat baik dibawah tekanan. Disisi lain logam, efek pendinginan dari cetakan logam akan menghasilkan coran logam berbutir halus, sehingga membuat kekuatan maksimum karena semakin cepat laju pembekuannya akan menjadi semakin besar kekerasan dan kekuatan tarik yang sangat kuat. Selain itu, ada juga kelemahan dari suatu cetakan logam yaitu tidak cocok untuk jumlah produksi kecil dikarenakan biaya produksi yang tinggi. Kompleks pengecoran yang terbilang cukup sulit membuat cetakan logam sulit dan mahal untuk diproduksi dan memiliki ukuran detailnya yang terbatas.

Keuntungan yang didapat pada pengecoran dengan menggunakan cetakan logam adalah:

1. Ketelitian dimensi hasil coran lebih baik dibandingkan dengan cetakan pasir sehingga tambahan ukuran untuk penyelesaian dapat dikurangi.
2. Struktur yang rapat dapat dihasilkan dengan cara ini, oleh karena itu sifat-sifat mekanik dan sifat tahan tekanan sangat baik bila dibandingkan dengan coran yang dibuat pada cetakan pasir.
3. Luas lantai untuk pengecoran sedikit dan suasana kerja baik.
4. Mekanisasi dari proses lebih mudah dan produktifitas tinggi terutama untuk produksi massal.

Sedangkan beberapa kerugian dari pengecoran dengan menggunakan cetakan logam adalah:

1. Tidak sesuai jika digunakan untuk produksi kecil atau sedikit karena biayapembuatan cetakan logam mahal.
2. Sulit untuk membuat cetakan dengan pola yang rumit.
3. Pembentukan cetakan logam sulit dan mahal.

## 2.2 Aluminium dan Paduan Aluminium

Kekuatan mekanik pada aluminium dapat ditingkatkan dengan penambahan unsur paduan seperti Cu, Mg, Zn, Mn, dan Ni. Unsur Cu pada paduan Al akan meningkatkan sifat mekanik, yaitu kekerasan maupun kekuatan tariknya namun menurunkan kemampuan coranya. Paduan dengan silikon akan meningkatkan tingkat kecairan (*fluidity*) dan menurunkan cacat penyusutan (*shrinkage*) yang berpengaruh baik terhadap sifat kemampuan cor (*castability*) dan kemampuan las (*weldability*) (Okayasu dkk., 2012).



Aluminium adalah logam *non-ferrous* yang paling banyak digunakan di dunia, dengan penggunaan tahunan sekitar 24 juta ton. Aluminium dengan berat jenis ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) sekitar sepertiga kepadatan baja ( $8,83 \text{ g/cm}^3$ ), tembaga ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ), atau kuningan ( $8,53 \text{ g/cm}^3$ ), memiliki sifat unik, yaitu: ringan, kuat, dan tahan terhadap korosi di berbagai lingkungan termasuk udara, air (termasuk air garam), petrokimia, dan beberapa sistem kimia. Aluminium memiliki struktur kristal *Face Centered Cubic* (FCC) dengan kubus kisi satuan untuk aluminium murni adalah  $4,049 596 \times 10^{-10} \text{ m}$  pada 298 K.

Aluminium merupakan logam yang reaktif sehingga mudah teroksidasi dengan oksigen membentuk lapisan aluminium oksida, alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan membuatnya tahan korosi yang baik. Lapisan oksida ini melekat pada permukaan dengan kuat dan rapat serta sangat stabil. Namun bila kadar Fe, Cu dan Ni ditambahkan akan menurunkan sifat tahan korosi karena kadar aluminya menurun. Penambahan Mg, Mn tidak mempengaruhi sifat tahan korosinya. Aluminium bersifat ulet, mudah dimesin dan dibentuk dengan kekuatan tarik untuk aluminium murni sekitar  $4\text{-}5 \text{ kgf/mm}^2$ . Bila diproses penguatan regangan seperti dirol dingin kekuatan bisa mencapai  $\pm 15 \text{ kgf/mm}^2$ . Adapun Sifat-sifat penting yang dimiliki aluminium sehingga banyak digunakan sebagai material teknik:

- Berat jenisnya ringan (hanya  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , sedangkan besi  $\pm 8,1 \text{ g/cm}^3$ ).
- Tahan korosi.
- Penghantar listrik dan panas yang baik.
- Mudah di fabrikasi/di bentuk.
- Kekuatannya rendah tetapi pepaduan (*alloying*) kekuatannya bisa ditingkatkan.

**Tabel 2.1** Sifat mekanik aluminium pada suhu kamar (Hatch dan John, 1988)

Kandungan (%)	Tensile yield strength (0.2% offset)		Tensile strength		Elongation di 50 mm (%)	
	MPa	ksi	MPa	ksi	(a)	(b)
99.99	10	1.4	45	6.5	50	65
99.8	20	2.9	60	8.7	45	55
99.6	30	4.4	70	10.2	43	-



### 2.2.1 Sifat – sifat paduan aluminium

Aluminium mempunyai sifat-sifat yang lebih baik dibandingkan dengan keadaan murninya, terutama peningkatan kekuatannya. Sementara bila dibandingkan dengan logam lainnya aluminium paduan mempunyai berbagai kelebihan seperti ketahanan korosi, kemampuan daya hantar panas dan daya hantar listrik yang baik, sifat mampu bentuk dan sifat-sifat mekanis lainnya.

**Tabel 2.2** Sifat fisik aluminium murni (Hatch dan John, 1988)

Sifat - sifat	Nilai
Massa jenis (padat)	2698.72 $kg/m^3$
Massa jenis (cair)	2357 $kg/m^3$ pada 973 K
Koefisien muai	23 X 10 <sup>-6</sup> /K pada 293 K
Titik lebur	933,5 K
Titik didih	2767 K
Konduktivitas termal	2,37 W cm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> pada 298 K
Resistivitas volume	2,655 X 10 <sup>-8</sup> Ω m
Kekentalan	0.012 seimbang pada titik lebur

Hal ini dibuktikan dengan digunakannya aluminium paduan sebagai bahan pembuatan peralatan rumah tangga sampai dengan komponen pesawat terbang. Ini menandakan aluminium paduan sangat kuat dan ringan. Berikut ini dijelaskan lebih rinci tentang sifat-sifat yang dipunyai oleh paduan aluminium paduan antara lain :

#### 1. Kekerasan

Aluminium murni mempunyai kandungan sebesar 99,99% mempunyai kekerasan 17 BHN. Dengan penambahan unsur paduan dan perlakuan panas dapat diperoleh paduan aluminium dengan komposisi unsurnya 4,5% Cu, 1,5% Mg, 0,5% Mn yang biasa disebut dengan paduan 2024 mempunyai kekerasan 120 BHN.

#### 2. Kekuatan Tarik

Harga kekuatan Tarik suatu material diperoleh dengan membandingkan antara beban maksimum selama tes dengan luas penampang awal material diuji. Untuk aluminium dengan kemurnian 99,99% kekuatan tariknya adalah 4,9 kg/mm<sup>2</sup>. Dengan memadukan aluminium murni dengan unsur an (Cu, Si, Mg, Mn) ditambahkan dengan melakukan pengerjaan panas atau an maka kekuatan tariknya dapat ditingkatkan.



3. Mampu bentuk

kekuatan aluminium yang berkisar antara 83 – 310 MPa dapat dilipatkan melalui pengerjaan dingin atau pengerjaan panas. Dengan menambahkan unsur paduan, pengerjaan panas atau dingin dan perlakuan panas dapat diperoleh paduan dengan kekuatan melebihi 700 MPa. Paduan aluminium dapat ditempa, diekstrusi, dilengkungkan, diregang dan sebagainya.

4. Berat jenis

Aluminium mempunyai berat jenis yang rendah, untuk aluminium dengan kemurnian 99,99% mempunyai berat jenis  $2,699 \text{ g/cm}^3$  pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  berubah dengan adanya penambahan unsur-unsur pada paduan, contohnya unsur paduan magnesium dan tembaga apabila ditambahkan sebagai paduan aluminium akan turun berat jenisnya.

5. Ketahanan korosi

Daya tahan korosi udara dan air dari aluminium adalah pertimbangan untuk memilih aluminium sebagai bahan yang bekerja di air dan udara. Ketahanan terhadap korosi ini diperoleh karena terbentuknya lapisan tipis namun kuat pada permukaan aluminium yang dikenal dengan aluminium oksida. Lapisan ini terbentuk seketika pada permukaan metal terkontaminasi dengan udara serta sangat stabil.

6. Konduktifitas termal

Aluminium merupakan salah satu logam *non-ferrous* yang diketahui mempunyai daya hantar listrik yang sangat tinggi, biasanya dipakai sebagai bahan untuk konduktifitas listrik, selain tembaga. Konduktifitas listrik berubah menurut kemurnian, pada umumnya untuk 99,0% atau di atasnya dapat dipergunakan di udara tahan dalam waktu bertahun-tahun. Hantaran listrik aluminium, kira-kira 65% dari hantaran listrik tembaga, tetapi massa jenisnya kira-kira sepertiganya sehingga memungkinkan untuk memperluas penampangannya.

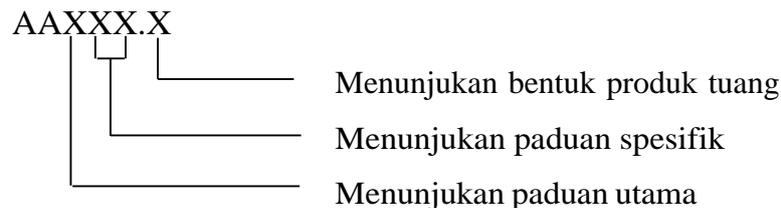


### Paduan aluminium tuang

lebih dari 100 komposisi paduan aluminium telah terdaftar pada *Iron Association*, dan lebih dari 300 jenis paduan aluminium telah dikenal di seluruh dunia. Paduan aluminium dikarakterisasikan memiliki

berat jenis yang rendah yang nilainya bisa sedikit di atas atau di bawah dari aluminium murni tergantung dari elemen utama paduan. Keuntungan lainnya dari paduan aluminium tuang yaitu relatif memiliki temperatur lebur yang rendah, kelarutan gas lain bisa diabaikan kecuali gas hidrogen, mampu cor yang sangat baik terutama di dekat komposisi eutektik, kemampuan permesinan dan penyelesaian permukaan yang baik, ketahanan korosi yang baik, dan juga konduktifitas panas dan listrik yang baik. Paduan aluminium tuang mengalami penyusutan volume antara 3,5 % - 8,5 % pada proses pembekuan, keadaan inilah yang menjadikan kerugian utama dari aluminium tuang.

Secara luas di Amerika, tatanama dari aluminium tuang menggunakan standar dari AA (*Aluminum Association*) walaupun tatanama ini tidak digunakan secara universal. Pada sistem tatanama ini terdapat 4 kode angka, dengan masing -masing kode angka menunjukkan:



Meskipun jenis paduan aluminium tuang jumlahnya sangat banyak, menurut tatanama ini dibagi menjadi 7 kelompok utama. **Tabel 2.3** adalah sistem tatanama aluminium paduan berdasarkan unsur paduannya :

**Tabel 2.3** Tatanama paduan aluminium tuang (Hatch dan John, 1988)

Seri	Jenis Paduan
1XX.X	Aluminium murni (99,00 % atau lebih besar)
2XX.X	Al-Cu
3XX.X	Al-Si + Cu, Al-Si + Mg
4XX.X	Al-Si
5XX.X	Al-Mg
7XX.X	Al-Zn
8XX.X	Al-Sn



### aduan aluminium – silikon - tembaga

ari sekian banyak jenis paduan aluminium tuang yang digunakan

salah satunya adalah aluminium dengan paduan utama silikon dan tembaga. Jumlah kandungan keduanya cukup banyak dalam paduan aluminium-silikon-tembaga. Unsur tembaga memberi kontribusi dalam meningkatkan kekuatan dan kemampuan permesinan, sedangkan unsur silikon meningkatkan kemampuan cor dan mengurangi *hot shortness*. Sistem paduan yang mengandung konsentrasi hipoeutektik silikon yang cukup tinggi secara normal cocok untuk pengecoran menggunakan cetakan permanen dan proses *die casting*. Paduan aluminium-silikon-tembaga dengan kandungan Cu kurang dari 5,6 % dapat diproses dengan perlakuan panas. Selain itu adanya unsur Mg juga penting pengaruhnya pada jenis paduan ini.

Dari jenis paduan ini banyak diantaranya yang mengandung hipereutektik silikon (12 – 30 % Si) yang membentuk fasa silikon primer. Fasa silikon primer memberikan ketahanan aus yang sangat tinggi dan Cu memberikan kontribusi sebagai matriks penguat dan meningkatkan kekuatan temperatur tinggi. **Gambar 2.3** di bawah ini menunjukkan diagram fasa *binary* dari Al-Si dan juga mikrostrukturnya. Sesuai diagram *binary* tersebut fasa eutektik 100 % terletak pada kandungan Si 12 %, sedangkan untuk fasa hipereutektik akan terbentuk silikon primer.

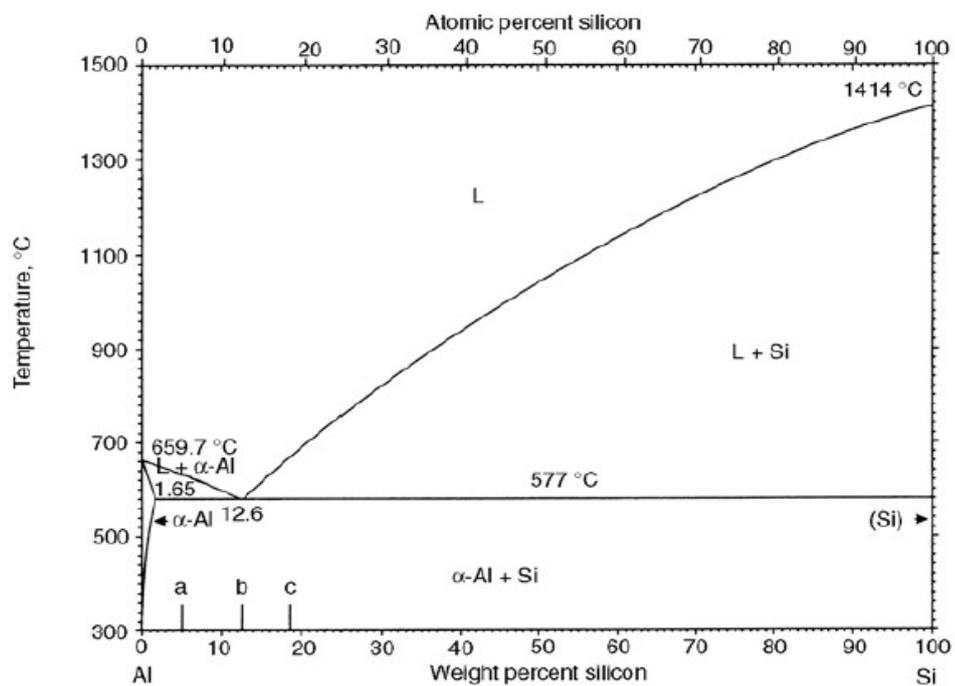
Kandungan silikon pada diagram fase Al-Si ini terdiri dari 3 macam seperti pada **Gambar 2.3** yaitu:

- a. *Hipoeutectic* adalah kandungan silikon <11.7% bisa dilihat struktur akhir yang terbentuk pada fasa ini adalah struktur ferrite ( $\alpha$ ) kaya aluminium.
- b. *Eutectic* adalah kandungan silikon kisaran 11.7% - 12.2%. Pada kandungan ini paduan Al-Si dapat membeku secara langsung (dari fasa cair ke padat).
- c. *Hypereutectic* adalah kandungan silikon diatas 12.2% pada kandungan ini terlihat struktur kristal silikon, karakteristiknya yaitu :
  - Tahan terhadap keausan meningkat.
  - Ekspansi termal cukup rendah.
  - Tahan retak terhadap panas (*hot tearing*) yang baik.

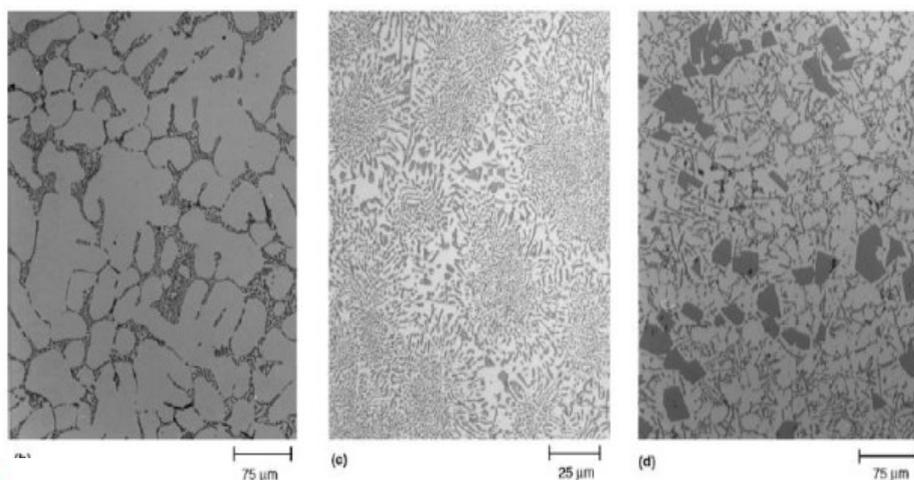


zesmi dkk. (2001) menambahkan bahwa struktur utama dari ketiga ini (hipoeutektik, eutektik, dan hipereutektik) variasi perpaduan ini berupa

fasa  $\alpha$ -Al, yang kaya akan kandungan aluminium. Struktur ini akan tetap muncul walaupun pada komposisi hipereutektik, karena bentuk struktur ini akan selalu terpisah pada fasa padatnya baik dalam paduan hipoeutektik, eutektik, maupun hipereutektik. Selain fasa  $\alpha$ -Al, juga terdapat fasa  $\beta$  yang merupakan partikel-partikel silikon yang tidak larut dalam fasa  $\alpha$ -Al. Pada paduan hipereutektik, fasa tersebut menghasilkan silikon primer yang bentuknya relatif kasar. Terkadang bentuk silikon yang kasar ini juga dapat ditemui pada paduan eutektik



(a)



2.3 (a) Diagram kesetimbangan Al-Si, (b) mikrostruktur Al-Si hipereutektik, (c) mikrostruktur Al-Si eutektik, (d). mikrostruktur Al-Si hipoeutektik



### 2.2.4 Efek unsur paduan

Unsur paduan yang digunakan dalam paduan aluminium sangat berpengaruh pada sifat-sifat yang dimiliki oleh aluminium tersebut. Di bawah ini uraian singkat tentang macam unsur paduan dan pengaruhnya terhadap sifat aluminium.

#### a. Tembaga

Tembaga secara substansial meningkatkan kekuatan dan kekerasan dalam kondisi pengecoran dan perlakuan panas. Paduan yang mengandung 4 hingga 5,5% Cu merespon paling kuat terhadap perlakuan panas dan menampilkan sifat pengecoran yang relatif lebih baik. Tembaga umumnya mengurangi ketahanan terhadap korosi umum dan dalam komposisi dan kondisi material tertentu meningkatkan kerentanan stres-korosi. Sebaliknya, konsentrasi tembaga yang rendah dalam paduan aluminium-seng menghambat korosi tegangan. Tembaga mengurangi ketahanan cacat retak (*hot tear*) dan meningkatkan potensi penyusutan interdendritik (Kaufman dan Rooy, 2004).

#### b. Magnesium

Logam magnesium pertama kali diproduksi oleh Sir Humphrey Davy di Inggris pada tahun 1808 ketika ia mencoba mereduksi magnesium oksida dengan potasium. Produksi industri magnesium pertama kali dicoba oleh Deville dan Caron di Prancis pada tahun 1863 ketika mereka menggunakan natrium untuk mereduksi campuran magnesium klorida dan kalsium fluorida. Namun puluhan tahun sebelumnya, pada tahun 1833, Michael Faraday memperoleh magnesium dari magnesium klorida melalui elektrolisis, dan pada tahun 1852 Robert Bunsen mengembangkan sel elektrolisis untuk tujuan ini. Produksi magnesium untuk tujuan komersial pertama kali dimulai di Jerman pada tahun 1886 oleh Greisheim Electron dan di Amerika pada tahun 1919 oleh General Electric (Kramer, 2000).

Magnesium menempati urutan kedelapan elemen terbanyak berdasarkan massa di muka bumi. Namun di alam tidak pernah ditemui magnesium dalam bentuk logam murni. Magnesium dapat ditemui di alam dalam magnesit sebagai senyawa magnesium karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ), *brucite* sebagai senyawa magnesium

a ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), *carnalite* sebagai senyawa garam magnesium klorida *enstatite* sebagai senyawa magnesium silikat ( $\text{MgSiO}_3$ ), dan pada air sebagai senyawa magnesium klorida (Zinszer, 2016).



Magnesium merupakan unsur kimia yang memiliki simbol Mg, nomor atom 12 dan massa atom 24,31. Pada tabel periodik, magnesium termasuk golongan alkali tanah. Magnesium murni mempunyai ciri fisik berwarna putih keperakan, termasuk logam dengan berat ringan yang hanya 2/3 dari berat logam aluminium. Magnesium mempunyai densitas sebesar  $1.738 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , titik lebur sekitar 923 K (650 °C, 1202 °F), titik didih 1363 K (1090 °C, 1994 °F). Struktur kristal magnesium termasuk kelas holohedral dari sistem hexagonal, dengan axial ratio 1.624. Susunan atom-atomnya membentuk *hexagonal close packing* (HCP).

Magnesium terkorosi jika ditempatkan pada udara terbuka. Meskipun tidak seperti golongan logam alkali, penyimpanan logam magnesium pada wadah bebas oksigen tidak diperlukan. Logam magnesium akan membentuk lapisan magnesium oksida pada permukaannya yang akan mencegah oksidasi lapisan di bawahnya. Lapisan oksida ini cukup *impermeable* dan sulit untuk dihilangkan. Magnesium bereaksi dengan air pada suhu ruang, meskipun bereaksi sangat lambat apabila dibandingkan dengan kalsium. Magnesium bereaksi dengan asam hidroklorida berupa klorida menghasilkan gas hidrogen yang disertai dengan pelepasan panas.

Logam magnesium merupakan logam ketiga yang banyak digunakan setelah besi dan aluminium. Pencampuran magnesium dengan aluminium sebagai alloy meningkatkan *strength to weight ratio*. Sehingga campuran magnesium-aluminium banyak digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan komponen dengan massa yang ringan tetapi memiliki kekuatan yang bagus. Pencampuran magnesium dengan mangan, thorium, seng atau zirkon juga mampu meningkatkan *strength to weight ratio* (Kulekci, 2008).

Magnesium merupakan dasar untuk pengembangan kekuatan dan kekerasan dalam paduan aluminium-silikon yang diberi perlakuan panas dan umumnya digunakan dalam paduan aluminium-silikon yang lebih kompleks yang mengandung tembaga, nikel, dan elemen lain untuk tujuan yang sama. Fase

an  $\text{Mg}_2\text{Si}$  menampilkan batas kelarutan yang baik sekitar 0,70% Mg, di tidak ada penguatan lebih lanjut atau pelunakan matriks terjadi. Komposisi n-silikon kekuatan tinggi umum menentukan magnesium dalam kisaran



0,40 hingga 0,070%.

Paduan aluminium-magnesium biner banyak digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan penyelesaian permukaan yang cerah, respons yang sangat baik terhadap penyelesaian kimiawi, ketahanan terhadap korosi, dan kombinasi kekuatan dan keuletan yang menarik. Komposisi umum berkisar dari 4 sampai 10% Mg, dan komposisi yang mengandung lebih dari 7% Mg dapat diberi perlakuan panas. Ketidakstabilan dan penuaan suhu kamar jangka panjang pada konsentrasi magnesium yang lebih tinggi dapat dihindari dengan perlakuan panas (Kaufman dan Rooy, 2004). Penambahan magnesium memungkinkan pembuatan bentuk kompleks dengan metode produktivitas tinggi seperti die casting bertekanan tinggi untuk paduan aluminium dalam pembuatan komponen secara nyata meningkatkan kekuatan aluminium tanpa mengurangi keuletannya. Ketahanan korosi dengan keuletan yang lebih tinggi (Esmaily dkk., 2017); (*ASM Metals Handbook*, 2001). Paduan aluminium yang mengandung magnesium kisaran 4 % hingga 10 % mempunyai ketahanan korosi dan sifat-sifat mekanis yang baik (Surdia dan Chijjiwa, 1976).

### c. Seng

Seng termasuk unsur logam. Di alam, seng ditemukan tidak dalam keadaan murni namun terikat dengan unsur lain. Mineral yang utama adalah *sphalerit* ( $ZnS$  67% Seng), *Smithsonite* ( $ZnCO_3$  52% Seng), *Willemite* ( $Zn_2SiO_4$  59% Seng), *hemimorphite* ( $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$  54% Seng). Seng sudah digunakan sejak zaman romawi dan china dalam bentuk kuningan (paduan Seng-Tembaga). Dalam pengolahannya, seng dibuat dalam bentuk bijih-bijih seng. Yang terpenting dari bijih-bijih tersebut diantaranya adalah seng karbonat ( $ZnCO_3$ ) dan seng sulfid ( $ZnS$ ). Pada seng karbonat umumnya tercampur dengan silika ( $Zn_2SiO_4 \cdot H_2O$ ). Banyak metode pengolahan untuk mendapatkan seng murni yang terikat dengan unsur-unsur lain antara lain dengan metode *froth flotation* dan destilasi dimana dalam metode akan didapatkan seng dengan kemurnian 99,75% Seng. (Zn) memiliki karakteristik putih kebiru-biruan, mengkilat, berat titik leburnya  $419,53^{\circ}C$ , titik didih  $907^{\circ}C$ , massa atom relatif 65,39 dan nomor atomnya 30, bentuk kristalnya *hexagonal closed packet* (HCP), dan dapat digunakan sebagai bahan baku untuk pengecoran dan pelapisan. Untuk ketahanan



korosi diudara terbuka, seng sangat baik karena adanya lapisan oksida seng yang melindungi dari korosi. Seng (Zn) pada pengecoran berfungsi memperbaiki kekuatan dan menghaluskan kristal, juga memungkinkan perlakuan panas untuk meningkatkan kekuatan dan memperbaiki sifat-sifat mekanik pada logam.

Seng tidak memberikan manfaat signifikan dalam pengecoran aluminium. Akan tetapi, disertai dengan penambahan tembaga dan/atau magnesium, seng menghasilkan komposisi yang dapat dirawat dengan panas atau penuaan alami yang menarik. Sejumlah komposisi semacam itu umum digunakan. Dalam paduan ini, toleransi hingga 3% Zn memungkinkan penggunaan aluminium paduan (skrap) bermutu rendah dan tempa (Kaufman dan Rooy, 2004).

#### d. Silikon

Unsur ini memiliki efek yang sangat menonjol dalam paduan aluminium tuang terutama untuk meningkatkan karakteristik kemampuan cor, penambahan unsur ini dapat meningkatkan mampu alir dan ketahanan *hottear*. Silikon juga memiliki berat jenis yang rendah dan mengurangi koefisien ekspansi panas. Jumlah penambahan unsur ini berhubungan dengan kecepatan pendinginan dan mampu alir, jadi jika penambahan unsur ini cukup banyak maka akan meningkatkan mampu alir sehingga kecepatan pendinginan harus ditingkatkan untuk mengurangi *shrinkage*. Maka untuk penambahan unsur Si lebih dari 8 % direkomendasikan untuk menggunakan proses *die casting*.

#### e. Besi

Adanya unsur Fe dapat menurunkan keuletan dan ketahanan korosi. Fe dapat membentuk fasa tidak larut/intermetalik ( $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{FeMnAl}_6$ , dan  $\alpha\text{FeAlSi}$ ) yang dapat meningkatkan kekuatan. Namun juga sebagai mikrostruktur yang bersifat *embrittlement*. Unsur Fe dapat meningkatkan ketahanan terhadap *hot tear* dan juga mengurangi kecenderungan terjadi penempelan antara aluminium dengan cetakan.

#### f. Mangan

Pada paduan aluminium tuang, mangan termasuk kategori pengotor. Keberadaan Mn dalam jumlah kecil dapat meningkatkan kekuatan unsur lainnya membentuk fasa intermetalik  $\text{FeMnAl}_6$ .



g. Nikel

Unsur ini biasanya digunakan bersama Cu untuk meningkatkan sifat paduan pada temperatur tinggi, dan juga mengurangi koefisien ekspansi panas.

### 2.2.5 Pengaruh struktur mikro terhadap sifat mekanis paduan Al-Si

Struktur mikro dari paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi kecepatan pembekuan serta perlakuan panas. Komponen dari struktur mikro yang mempengaruhi sifat mekanis aluminium tuang adalah :

- Ukuran, bentuk dan distribusi fasa intermetalik.
- *Dendrit arm spacing*.
- Ukuran dan bentuk butir.
- Modifikasi eutektik dan penghalusan fasa primer.

### 2.2.6 Fasa intermetalik

Fasa intermetalik merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro pada paduan aluminium yang terbentuk akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Keberadaan fasa ini dipengaruhi oleh komposisi dan mekanisme pembekuan yang terjadi. Laju pembekuan yang rendah akan menghasilkan fasa intermetalik dan konsentrasi fasa kedua yang kasar pada batas butir. Pembentukan fasa merupakan pengontrolan difusi sehingga semakin cepat solidifikasi dan semakin cepat pendinginan menuju temperatur ruang dari temperatur pembekuan akan menghasilkan tingkat *solid solution* yang tinggi dan dispersi partikel yang lebih halus.

Pada reaksi pembekuan paduan Al-Si hipoeutektik terjadi beberapa mekanisme pengendapan fasa, yaitu :

- Pembentukan jaringan dendritik  $\alpha$ -aluminium.
- Reaksi eutektik Al-Si.
- Pengendapan fasa kedua eutektik seperti  $Mg_2Si$  dan  $Al_2Cu$ .

Seperti tertulis pada bagian sebelumnya mengenai pengaruh paduan terhadap sifat mekanis, jenis paduan Fe dan Mn memegang peranan penting untuk meningkatkan sifat mekanis yang didasarkan pada struktur mikro. Kandungan Fe dapat membentuk fasa  $Al_5FeSi$  yang getas, sehingga keberadaan unsur tersebut akan menurunkan keuletan. Fasa  $Al_{15}(Mn, Fe)_3Si_2$  yang berasal dari paduan



Mn juga memiliki sifat yang getas dan keras seperti yang dihasilkan oleh Fe. Kedua fasa ini menyebabkan sulitnya proses *machining*. Demikian juga halnya dengan fasa terlarut  $Mg_2Si$ ,  $Al_2Cu$ , dan  $Al_2CuMg$ . Kecepatan pembekuan sangat mempengaruhi ukuran, bentuk dan distribusi fasa intermetalik.

### 2.2.7 Paduan aluminium A383

Paduan aluminium tuang A383 memiliki beberapa kelebihan yaitu kekuatan dan kekerasan yang baik, sifat mampu cor (*castability*) yang baik, sifat mampu las yang baik dan juga paduan ini dapat dilakukan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Unsur silikon pada paduan A383, sangat dekat dengan titik eutektik pada diagram fasa Al-Si dan daerah dua fasa cair dan padat sangat tipis. Oleh karena itu, jenis paduan ini cocok untuk diaplikasikan dalam dunia otomotif yang membutuhkan keseimbangan antara sifat kekuatan dan kekerasan serta konduktivitas panas yang baik seperti *crank cases*, *cylinder head*, *air compressor*, dan *piston*. Suku cadang otomotif ini, yang sebelumnya terbuat dari besi tuang, telah diganti dengan paduan aluminium tuang, karena kontribusinya terhadap efisiensi bahan bakar yang lebih tinggi dan tingkat emisi yang lebih rendah (Okayasu dkk., 2012).

Paduan aluminium tuang A383 memiliki komposisi 10,5 % Si dan 2,5 % Cu. Unsur-unsur penyusun paduan aluminium A383 dapat dilihat pada **Tabel 2.4**. Komposisi Cu dalam paduan aluminium A383 pada **Tabel 2.4** merupakan kedua terbanyak setelah Si, sehingga paduan aluminium A383 dapat digolongkan ke dalam paduan Al-Si-Cu.

Berdasarkan komposisi silikon dalam paduan aluminium A383 memiliki mikrostruktur hipoeutektik. Mikrostruktur dengan jenis hipoeutektik umumnya lebih baik untuk pengecoran yang lebih kompleks dengan proses permanent mold dan dies casting. Kontribusi silikon dalam paduan ini dapat meningkatkan mampu cor dan menghilangkan *hot shortness*, sedangkan Cu berkontribusi untuk menguatkan dan meningkatkan sifat mampu mesin. Karakteristik tersebut

paduan aluminium A383 memiliki sifat mampu cor yang baik, kuat, dan tahan terhadap perlakuan panas. Karakteristik lainnya dari paduan aluminium A383 dapat dilihat pada **Tabel 2.5**.



**Tabel 2.4** Komposisi kimia paduan aluminium A383 (Kaufman dan Rooy, 2004)

Unsur	Kandungan (%)
Silicon (Si)	9.5 - 11.5
Besi (Fe)	1.3
Tembaga (Cu)	2.0 - 3.0
Mangan (Mn)	0.50
Magnesium (Mg)	0.10
Kromium (Cr)	-
Nikel (Ni)	0.30
Seng (Zn)	3.0
Titanium (Ti)	-
Timah (Sn)	0.15
Aluminium	Balance
Total unsur lain	0.50

**Tabel 2.5** Sifat fisik dari paduan aluminium A383 (Kaufman dan Rooy, 2004)

Sifat	Nilai
Berat Jenis ( $g/m^3$ )	2.74
Kekuatan luluh (ksi)	22
Kekuatan tarik (ksi)	45
Perpanjangan di 2 in (%)	4
Kekerasan (HB)	75
Kerapatan	2.74
Koefisien rata-rata pada ekspansi termal 20–100 °C, $10^{-6}/^{\circ}C$	21.1
Rentang leleh (°C)	516 - 582
Modulus elastisitas ( $10^6$ psi)	10.3
Koduktivitas termal pada 25 °CW/m.K	96

### 2.3 Korosi

Korosi adalah suatu peristiwa kerusakan atau kehancuran pada material akibat adanya reaksi kimia pada sekitar lingkungannya. Pengertian korosi menurut para ahli sebagai berikut :

- Korosi adalah degradasi yang dialami oleh serangan terhadap bahan logam akibat terjadinya reaksi reduksi-oksidasi antara logam dengan lingkungannya (Lind, 2003).



ini didefinisikan sebagai kerusakan yang terjadi akibat berbagai serangan

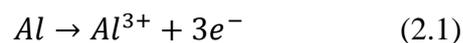
dan gangguan baik itu secara fisik (*Physycal Deterioration*) atau secara kimia (*Chemical Deterioration*) pada material karena reaksi dengan lingkungannya (Fontana, 1987).

- c. Korosi atau berkarat adalah serangan destruktif dari logam dengan reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya, melainkan sebab fisik tidak semua disebut korosi, tetapi digambarkan sebagai erosi, lecet, atau aus (Revie dan Uhlig, 2008).
- d. Korosi adalah konversi logam menjadi senyawa logam, dengan reaksi antara logam dan beberapa zat dalam lingkungannya. Ketika logam berkorosi, setiap atom logam kehilangan satu atau lebih elektron untuk membentuk kation, yang dapat menggabungkan dengan anion untuk membentuk senyawa ion (Brown dkk., 2018).

Korosi merupakan kerusakan logam oleh reaksi elektro-kimia dalam lingkungannya yang melibatkan perpindahan elektron dari satu area pada logam ke area lainnya. Anoda adalah bagian dari logam dimana elektron meninggalkan logam (oksidasi) untuk masuk ke larutan, dan dimana korosi terjadi. Katoda adalah bagian logam dimana arus meninggalkan larutan (reduksi) dan masuk ke logam. Ketika kedua reaksi ini seimbang, maka tidak terdapat aliran elektron. Potensi keseimbangan logam dengan tidak adanya perpindahan elektrik ke logam dinamakan *open circuit potential*, atau  $E_{oc}$ . Jika voltase positif terhadap  $E_{oc}$  (anodik), maka terjadi korosi. Sebaliknya, jika voltase negatif terhadap  $E_{oc}$  (katodik), maka logam akan terlindungi dari korosi (Popovic dkk., 2016).

### 2.3.1 Korosi pada aluminium

Reaksi dasar dari aluminium dalam media cair telah dipelajari dalam banyak penelitian. Dalam keadaan biasa, oksidasi aluminium dalam air dimulai dengan persamaan:

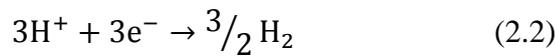


Logam aluminium, dalam keadaan oksidasi 0, dalam larutannya berubah menjadi kation  $Al^{3+}$  ketika kehilangan tiga elektron. Reaksi ini seimbang dengan imultan ion yang hadir dalam larutan yang merupakan elektron bebas. media cair dengan pH mendekati netral, seperti air biasa, air laut, dan uap ditunjukkan oleh perhitungan termodinamika bahwa hanya dua reaksi



reduksi yang dapat terjadi, yaitu:

- Reduksi proton  $H^+$  :

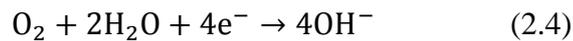


Proton  $H^+$  diperoleh dari dissolusi molekul air :

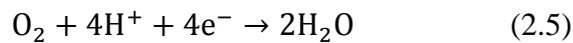


- Reduksi oksigen terurai dalam air :

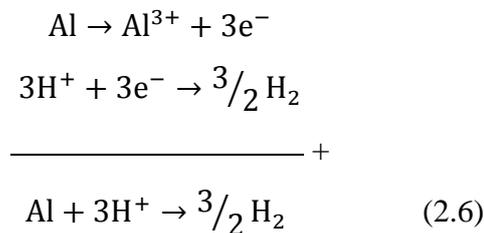
- Dalam alkalin atau media netral :



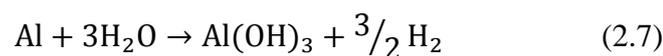
- Dalam media asam :



Pada  $20^{\circ}C$  dan dibawah tekanan atmosfer, kelarutan oksigen dalam air adalah  $43.4 \text{ mg.kg}^{-2}$ . Menurun dengan meningkatnya temperatur dan tidak lebih dari  $30.8 \text{ mg.kg}^{-2}$  pada  $40^{\circ}C$  dan  $13.8 \text{ mg.kg}^{-2}$  pada  $40^{\circ}C$ . Umumnya korosi aluminium dalam media cair adalah penjumlahan dua reaksi kimia, oksidasi dan reduksi:



Atau



Reaksi ini diiringi oleh suatu perubahan dalam bilangan oksidasi pada aluminium, dari 0 di dalam logam berubah menjadi bilangan oksidasi alumina (+3). Dengan pertukaran elektron, maka aluminium kehilangan tiga elektron yang diambil oleh  $3H^+$ . Korosi aluminium diperoleh dalam formasi alumina  $Al(OH)_3$  yang tidak larut dalam air dan mengendap sebagai gel putih dimana di dalamnya ditemukan korosi sumuran sebagai kepingan gelatin putih.

### 2.3.2 Korosi erosi



rosi-korosi umum terjadi di pabrik pengolahan minyak dan gas di mana aksi antara partikel padat, cairan korosif dan sasaran material (Islam dan 2017). Perpaduan antara erosi dan korosi, disebut erosi-korosi,

mempercepat laju inefisiensi material, menyebabkan masalah besar pada komponen teknik seperti : pompa, katup, agitator, kondensor dan tabung penukar panas, peralatan penyuplai bensin, dan jaringan pipa bersentuhan dengan lumpur berair selama operasi dan dapat terkena degradasi erosi-korosi (Abedini dan Ghasemi, 2016). Selama fenomena erosi-korosi, kehilangan berat yang diamati lebih besar daripada penjumlahan kehilangan berat akibat erosi murni dan korosi murni yang terjadi secara terpisah (Kermani dan Morshed, 2003).

Korosi erosi adalah percepatan atau peningkatan tingkat serangan pada logam karena gerakan relatif antara cairan korosif dan permukaan logam. Umumnya gerakan ini cukup cepat, dan efek aus mekanis atau abrasi terkait. Logam dikeluarkan dari permukaan sebagai ion terlarut, atau membentuk produk korosi yang solid yang dihilangkan secara mekanis dari permukaan logam.

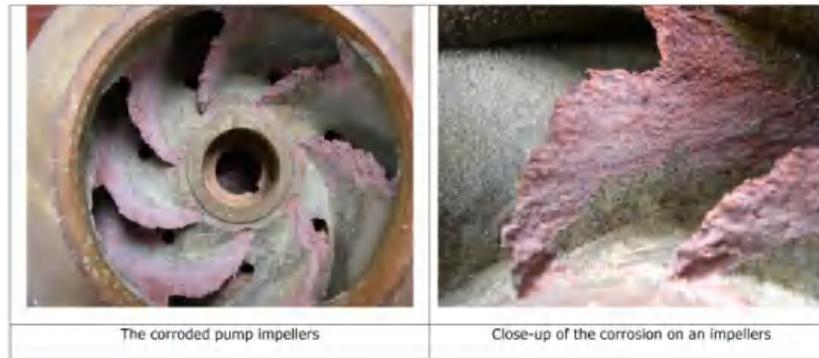
Korosi erosi merupakan jenis korosi yang menggunakan proses mekanik melalui pergerakan relatif antara aliran gas atau cairan korosif dengan logam. Dalam hal ini perusakan karena erosi dan korosi saling mendukung. Logam yang telah terkena erosi akibat terjadi keausan dan menimbulkan bagian-bagian yang tajam dan kasar. Bagian-bagian inilah yang mudah terserang korosi dan bila ada gesekan akan menimbulkan abrasi lebih berat lagi dan seterusnya. Korosi erosi dapat juga disebabkan karena impingment corrosion, yaitu akibat fluida sangat deras dan dapat mengikis film pelindung pada logam yang mengakibatkan korosi pada logam.

Karakteristik korosi erosi ditandai dengan bentuk alur, parit, gelombang, lubang bundar, dan lembah dan biasanya menunjukkan pola terarah. **Gambar 2.4** menunjukkan bentuk impeller pompa air kuningan yang mengalami kegagalan korosi erosi. Proses korosi erosi berlanjut sampai pompa tidak lagi memompa air. Inhibitor korosi kimia atau pemilihan kuningan yang lebih tahan korosi dapat mencegah kegagalan ini.

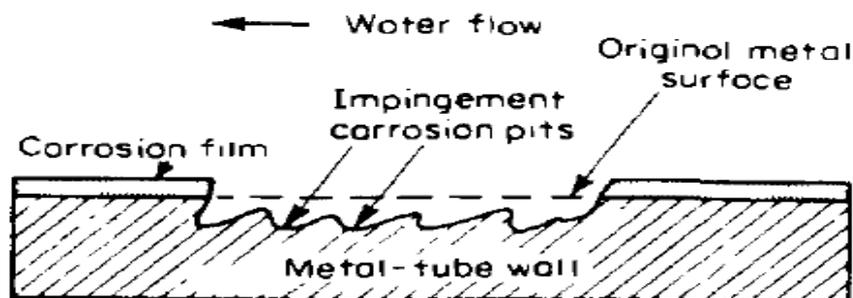
**Gambar 2.5** adalah sketsa yang mewakili korosi erosi dari air penanganan tabung penukar panas. Dalam banyak kasus, kegagalan karena korosi erosi terjadi



itu yang relatif singkat, dan sebagian besar tidak terduga karena tes evaluasi dijalankan di bawah kondisi statis atau karena efek erosi tidak diantisipasi.



**Gambar 2. 4** Korosi erosi pada impeller pompa air (Tait, 2018)



**Gambar 2. 5** Korosi erosi pada pipa kondenser (Fontana, 1987)

Faktor – faktor yang mempengaruhi korosi erosi antara lain : Kecepatan dan jenis aliran, sudut impak, kandungan partikel ( konsentrasi, ukuran, bentuk dan sifat partikel), korosifitas fluida, resistansi material.

### 2.3.3 Pengaruh kecepatan aliran terhadap sinergisme korosi dan erosi

Fenomena korosi erosi sangat ditentukan oleh kecepatan aliran fluida. Perubahan laju erosi akibat korosi atau perubahan laju korosi karena faktor erosi disebut sinergisme. Faktanya, sinergi digambarkan sebagai laju keausan tambahan yang dialami oleh logam akibat aksi gabungan dari erosi dan korosi. Sinergi dikatakan positif ketika laju keausan total akibat erosi-korosi lebih tinggi daripada jumlah laju keausan akibat erosi murni dan korosi murni. Sinergi negatif terjadi ketika laju korosi erosi lebih rendah dari jumlah erosi murni dan laju korosi murni. Sinergi dapat diperoleh secara numerik melalui Persamaan (Azarian dkk., 2015):

$$S = T - (W_0 + C_0) \quad (2.8)$$

mana T adalah laju keausan total akibat erosi-korosi,  $W_0$  adalah laju akibat erosi murni (yaitu, dengan proteksi katodik pada material target



dalam proses erosi-korosi),  $C_0$  adalah laju keausan akibat korosi murni (yaitu, tanpa efek erosi), dan  $S$  adalah laju keausan tambahan akibat efek sinergis.  $S$  dapat dibagi lagi menjadi dua subdivisi sebagai :

$$S = \Delta W_c + \Delta C_w \quad (2.9)$$

dimana  $\Delta W_c$  adalah perubahan laju erosi akibat media korosif dan  $\Delta C_w$  adalah perubahan laju korosi akibat erosi [10]. Dari Persamaan. (2.8), (2.9), dan (2.10a) dapat diperoleh:

$$T = W_0 + \Delta W_c + C_0 + \Delta C_w \quad (2.10a)$$

Dimana

$$W_0 + \Delta W_c = W_c \quad (2.10b)$$

$$C_0 + \Delta C_w = C_w \quad (2.10c)$$

Istilah  $W_0 + \Delta W_c$  menunjukkan bagian erosi dari laju kehilangan material, dan istilah  $C_0 + \Delta C_w$  mewakili bagian korosi dari kehilangan material [10]. Karena itu,

$$T = W_c + C_w \quad (2.11)$$

$W_c$  disebut komponen keausan total dari  $T$  sementara  $C_w$  disebut komponen korosi total dari  $T$ .

Kecepatan kritis ditentukan oleh media fluida, partikel dan sifat logamnya. Rajahram dkk. (2009) menemukan bahwa terdapat kecepatan kritis antara 4 m/s dan 7 m/s untuk material UNS S31603 dalam NaCl 3,5% dan partikel pasir silika antara 0 mg/l dan 6000 mg/l. Aiming dkk. (1996) menemukan bahwa kecepatan kritis untuk *stainless steel* pada media *phosphoric acid* (pH 1) dengan partikel *gypsum* berada pada kecepatan 12 m/s. Zheng dkk. (2008) menemukan bahwa kecepatan kritis untuk *carbon steel* dan baja paduan rendah 10CrMoAl adalah 3 m/s – 4 m/s pada fluida 2,4% NaCl. Aribu dkk. (2017) menemukan bahwa kecepatan kritis untuk paduan aluminium 6063 dan *hybrid composite* antara 2 m/s dan 3,5 m/s dengan fluida 1% NaCl dan partikel pasir silika.

Interaksi antara erosi dan korosi sangat penting bagi perancang dan peneliti untuk memahami mekanisme makro dan mikro dari kedua proses ini saat

bahan untuk aplikasi teknik apa pun . Sebagai contoh, korosi dapat tukan laju erosi melalui pelepasan lapisan *work hardening* atau erosi meningkatkan kecenderungan material untuk pembentukan lapisan pasif dan



dengan demikian menekan laju korosi. Tingkat erosi-korosi tergantung pada berbagai variabel, termasuk faktor partikel pasir padat (kekerasan, kerapatan, ukuran, dan bentuk), bahan target (kekerasan, struktur metalografi, kekuatan, keuletan, dan ketangguhan), dan lingkungan (konsentrasi partikel erosif, komposisi slurry, kecepatan aliran, temperatur, dan sudut impact).

### 2.3.4 Pengaruh aliran laminar dan turbulen

Aliran fluida di dalam sebuah pipa mungkin merupakan aliran laminar atau aliran turbulen. Osborne Reynolds (1842-1912), ilmuwan dan ahli matematika Inggris, adalah orang yang pertama kali membedakan dan mengklasifikasikan dua aliran ini. Dalam mekanika fluida, bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia ( $v\rho$ ) terhadap gaya viskos ( $\mu/L$ ) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen.

$$\text{Bilangan Reynolds, } Re = \frac{Vd\rho}{\mu} = \frac{Vd}{\nu} = \frac{4q}{\pi\mu D} \quad (2.12)$$

Dimana:  $V$  = Kecepatan rata-rata dalam m/s

$d$  = Diameter dalam pipa dalam m

$\nu$  = Viskositas kinematik fluida dalam  $\text{m}^2/\text{s}$  atau  $\nu = \mu / \rho$

$\rho$  = Densitas massa fluida ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\mu$  = Viskositas dinamik fluida ( $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ )

$q$  = Debit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Bilangan Reynolds merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang berfungsi untuk menentukan bentuk aliran apakah aliran suatu fluida laminar atau turbulen serta posisi relatifnya pada skala yang menunjukkan pentingnya secara relatif kecenderungan turbulen terhadap kecenderungan laminar. Reynolds menemukan bahwa aliran selalu menjadi laminar bila kecepatannya diturunkan sedemikian sehingga  $Re$  lebih kecil dari 2000. Untuk instalasi pipa biasa, aliran akan berubah dari laminar menjadi turbulen dalam daerah bilangan  $Re$  dari 2000

300.

ada aliran berkembang penuh terdapat keseimbangan antara gaya tekanan dan gaya gesek. Analisa dapat dilakukan dengan menghitung keseimbangan gaya –



gaya pada elemen kecil fluida.

Keseimbangan gaya pada elemen dapat ditulis sebagai :

$$(p_1)\pi r^2 - (p_1 - \Delta p)\pi r^2 - (\tau)2\pi r l = 0 \quad (2.13)$$

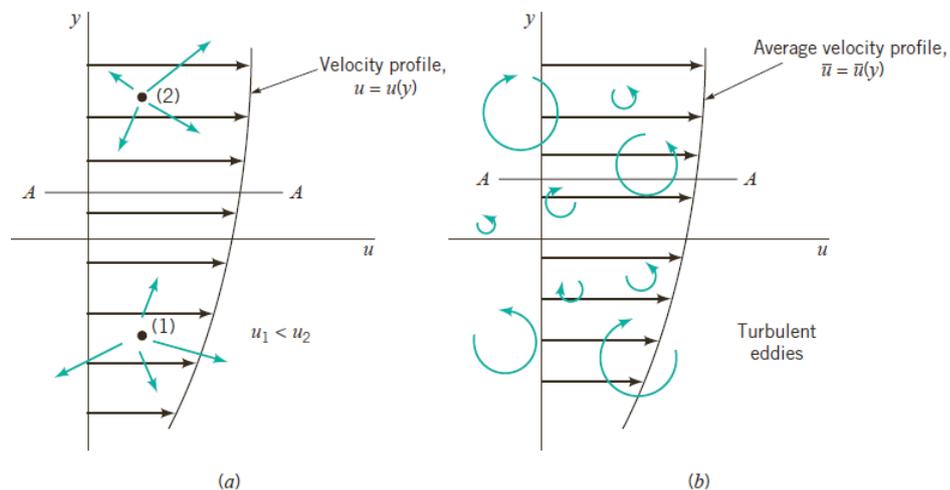
Tegangan geser  $\tau$ , pada aliran dalam pipa merupakan fungsi linear dari kordinat radialnya yang dapat ditulis sebagai :

$$\tau = \frac{2\tau_w r}{D} \quad (2.14)$$

dimana  $\tau_w$  adalah tegangan geser pada dinding dalam pipa ( $N/m^2$ ) dan  $\tau$  adalah tegangan geser yang bekerja pada suatu titik pada fluida ( $N/m^2$ ).

Dari persamaan tersebut diatas berlaku untuk aliran laminar maupun turbulen.

Perbedaan mendasar antara laminar dan torbulen adalah pada prilaku chaos, acak dari berbagai parameter fluida. Variasi tiga komponen kecepatan, tekanan, tegangan geser, dan temperatur. Aliran laminar dimodelkan sebagai partikel fluida yang mengalir secara teratur dilapisan – lapisannya, meluncur diantara partikel yang sedikit lebih lambat atau lebih cepat. Sedangkan aliran torbulen melibatkan gerakan – gerakan acak dari aliran fluida yang berpindah dan menghasilkan gaya geser yang lebih besar.



**Gambar 2.6** (a) Tegangan geser aliran laminar oleh gerakan acak molekul, (b) Aliran turbulen sebagai rangkaian eddies tiga dimensi yang acak (Brown dkk.,



iran laminar, eksperimen Reynolds menunjukkan bahwa tiap partikel sepanjang garis lurus yang sejajar dengan sumbu pipa. Dari persamaan

geraknya dapat ditunjukkan bahwa tegangan gesernya sama dengan :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.15)$$

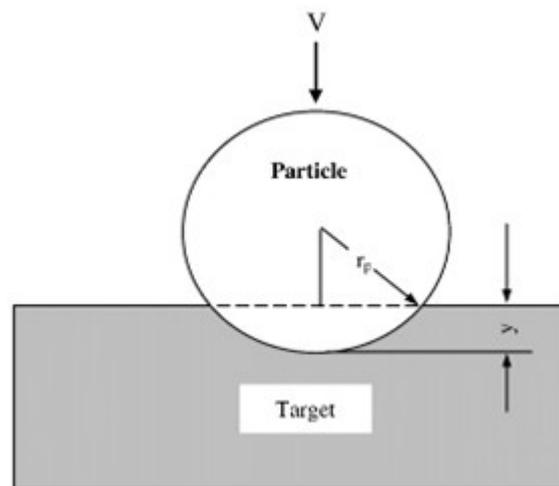
Pada aliran turbulen, tegangan geser bukan semata mata sebanding dengan gradien kecepatan rata – rata menurut waktu. Tegangan geser tersebut juga mengandung kontribusi dari fluktuasi acak komponen – komponen x dan y dari kecepatan sebuah persamaan yang disebut tegangan Reynolds untuk menghormati Osborne Reynolds yang pertama kali membahasnya.

### 2.3.5 Pengaruh sudut impact

Dalam peristiwa erosi, terdapat dua tipe mekanisme yang terjadi secara bersamaan yang menimbulkan kerusakan pada material. Mekanisme yang pertama adalah deformasi yang berulang (*impingement*) dan yang kedua adalah proses *cutting wear*. Total volume material yang hilang adalah penjumlahan dari kedua peristiwa ini.

- Mekanisme *impingement*

Ketika partikel mengenai sasaran, tegangan tarik membuat material sasaran bergerak ke arah indentasi dan membuat material sasaran mengalami elongasi. Tegangan tarik memainkan peran penting dalam menghasilkan deformasi yang menimbulkan kerusakan.



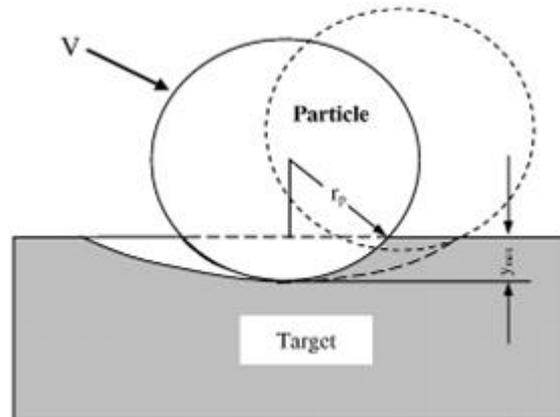
Gambar 2.7 Mekanisme pengrusakan oleh gaya normal (Huang dkk., 2008)



tegangan tarik maksimum terjadi pada sudut 90° sehingga kerusakan maksimum akibat *impingement* terjadi pada sudut impact 90°. Material getas

mengalami kerusakan yang lebih besar oleh mekanisme *impingement* ini sehingga material akan mengalami kerusakan maksimum pada sudut  $90^\circ$ .

- Mekanisme *Cutting wear*



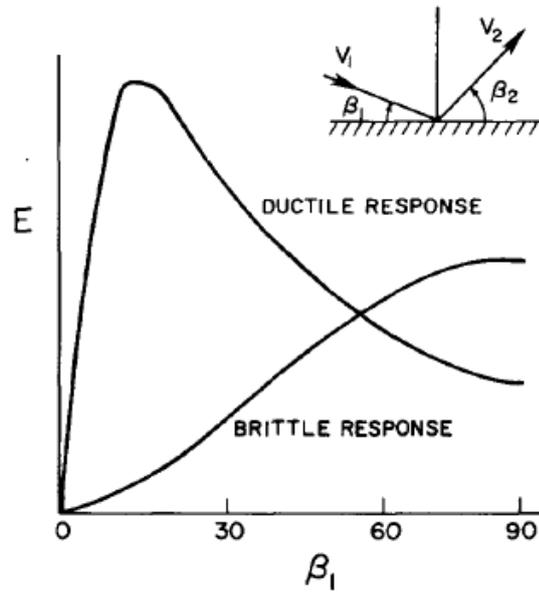
**Gambar 2. 8** Mekanisme pengrusakan oleh gaya tangensial (Huang dkk., 2008)

Tidak seperti gaya normal pada mekanisme pengrusakan dengan deformasi, gaya tangensial (tegangan geser) berfungsi seperti pisau yang memotong material dari permukaan sasaran.

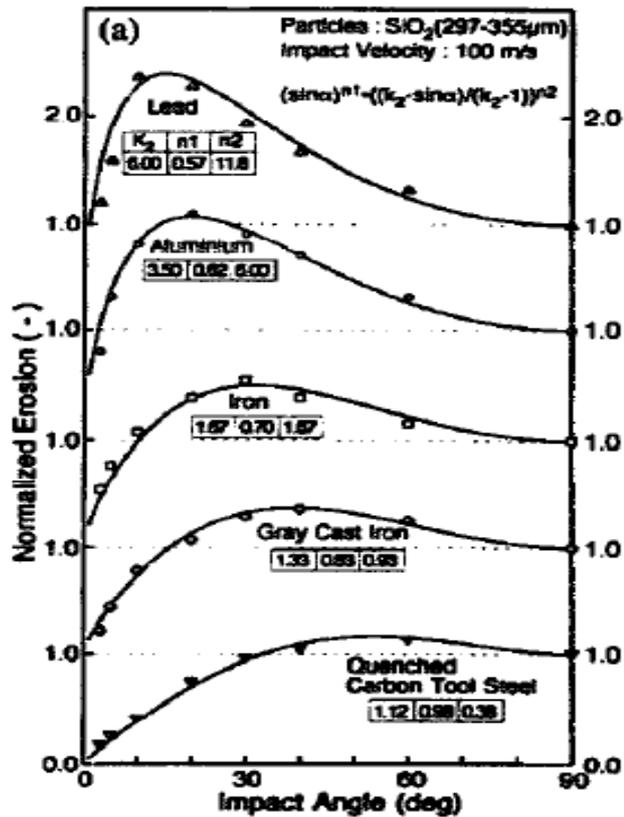
Tegangan geser maksimum terjadi pada sudut yang kecil ( $20^\circ$ - $30^\circ$ ) sehingga kerusakan maksimum akibat mekanisme *cutting wear* terjadi pada sudut yang kecil. Material ulet mengalami kerusakan yang lebih besar oleh mekanisme *cutting wear* sehingga material ulet akan mengalami kerusakan maksimum pada sudut yang kecil. Perbedaan respon material ulet dan getas digambarkan oleh Humphrey seperti pada **Gambar 2.9**.

Oleh karena kedua mekanisme erosi, *impingement* dan *cutting wear* terjadi secara bersamaan maka kerusakan maksimum ditentukan oleh respon sifat material (tingkat keuletan/kegetasan) sasaran. Pada penelitian yang lain (Oka dkk., 1997) memperlihatkan adanya perbedaan sudut impact yang menyebabkan kerusakan erosi maksimum pada material logam sasaran. Semakin keras/getas material sasaran semakin besar pula sudut impact yang menyebabkan kerusakan maksimum seperti yang ditunjukkan pada **Gambar**





Gambar 2.9 Kurva pengaruh sudut impact pada erosi untuk material ulet dan material getas (Humphrey, 1990)



Gambar 2.10 Pengaruh sudut impact terhadap kerusakan material (Oka dkk., 1997)



**Iekanisme sinergi**

terkasi antara korosi dan erosi menyebabkan kerusakan yang lebih besar

dari penggabungan keduanya. Interaksi ini terjadi dengan mekanisme korosi mendukung erosi dan erosi mendukung korosi. Beberapa peneliti memberikan pandangan yang berbeda terhadap mekanisme sinergi ini.

- Mekanisme erosi mendukung korosi

Stack dkk. (2008) mengembangkan map korosi erosi *aqueous* yang mengidentifikasi transisi antara korosi dan erosi. Dalam penelitian tersebut ditemukan bahwa *passive current density* meningkat ketika kecepatan meningkat dengan kehadiran partikel dan ketika kecepatan 2 m/s dengan partikel tidak memberikan pengaruh terhadap *passive current* menunjukkan lapisan pasif tidak mengalami kerusakan. Hanya setelah kecepatan 4 m/s *passive current* meningkat, mengindikasikan bahwa lapisan pasif mengalami kerusakan dan diperbaiki secara berkelanjutan.

Aiming dkk. (1996) melakukan pengujian korosi erosi pada *stainless steel* dengan fluida *phosphoric acid* dan *gypsum* menemukan bahwa kecepatan kritis pada 12 m/s dimana laju korosi meningkat. Hal ini menunjukkan fakta bahwa lapisan pasif permukaan akan mudah dihilangkan pada kecepatan yang tinggi. Menurutnya, erosi dapat meningkatkan korosi dengan menghilangkan lapisan pasif sehingga permukaan logam berada pada media korosif. Jika logam tidak dapat membentuk lapisan pasif dengan cepat maka logam tersebut akan terkorosi dengan cepat.

Penjelasan yang lain tentang erosi yang meningkatkan korosi adalah kecepatan fluida dan partikel yang tinggi dapat menyebabkan deformasi dan distribusi tegangan yang tidak rata. Daerah ini akan menjadi daerah yang *anodic* dan mengalami peningkatan aktifitas elektrokimia yang menyebabkan korosi secara cepat (Singh dkk., 2021).

- Mekanisme korosi mendukung erosi

Aiming dkk. (1996) menjelaskan bahwa korosi meningkatkan erosi pada *austenitic stainless steel* dimulai dengan mekanisme korosi seragam pada *grain boundary* yang melemahkan butir dan mudah dirusak oleh impact artikel atau proses erosi.

Korosi meningkatkan erosi oleh serangan yang terlokalisasi pada permukaan oksida pada bekas impact yang berulang. Korosi yang



terlokalisasi ini akan menjadi inisiasi *crack* dan memudahkan impact partikel untuk mempropagasi *crack* dan menimbulkan erosi.

## 2.4 Laju Korosi (*Corrosion Rate*)

Laju korosi merupakan suatu besaran yang menyatakan cepat atau lambat suatu material bereaksi dengan lingkungannya dan mengalami korosi. Menurut (Fontana, 1987) dalam bukunya “*Corrosion Engineering*”, laju korosi dapat didefinisikan dalam berbagai macam, seperti persentase kehilangan massa, miligram per sentimeter persegi per hari dan gram per inci persegi per jam. Selain itu, juga digunakan mils per year (mpy) yang menyatakan laju penetrasi serangan korosi terhadap logam. Laju korosi berbanding lurus dengan sejumlah arus yang mengalir pada sel korosi elektrokimia. Jika arus dapat diukur, suatu perhitungan yang tepat dari kehilangan logam akibat korosi dapat ditentukan. Ini berarti bahwa suatu pengukuran dalam ampere atau milliampere secara matematis dihitung dalam kilogram (pound) per tahun. Suatu Amp/tahun adalah satu Ampere yang mengalir selama periode satu tahun.

Suatu cara untuk mengetahui laju korosi pada logam diperlukan *corrosion monitoring* dari suatu struktur sehingga dengan mengetahui laju korosi kita dapat memprediksi kapan dan berapa lama material tersebut dapat bertahan terhadap serangan korosi. Teknik monitoring korosi dapat dibagi menjadi beberapa metode yaitu kinetika (*weight loss*) dan elektrokimia (diagram polarisasi, *linear polarization resistance*, *electrochemical impedance spectroscopy*, potensial korosi, dan *electrochemical noise*) (Santoso, 2019).

Metode kinetika (*weight loss*) secara umum dianggap identik dengan kehilangan massa (*mass loss*). Metode kehilangan massa (*mass loss*) ini didasarkan pada selisih massa awal sebelum pengujian korosi dengan massa akhir setelah pengujian korosi. Laju korosi biasanya dinyatakan dalam mils per year (mpy). Perhitungan laju korosi atas dasar kehilangan massa logam selama pengujian dirumuskan sesuai standar ASTM G31-72. Jika diketahui penurunan

’ i suatu material yang terkorosi maka laju korosi rata-rata dapat dihitung persamaan berikut:

$$Cr = \frac{534 W}{A.T.D} \quad (2.16)$$



Dimana :

Cr (*Corrosion Rate*) : Laju korosi dalam satuan mpy (mils per year)(mm/y)

W : Massa yang hilang (mg)

A : Luas sampel yang terendam ( $\text{in}^2$ )

T : Waktu perendaman (jam)

D : Density (Massa jenis) logam ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Mpy : Mills per year (1 mils = 1 milli inchi = 1/1000 inchi)

Berdasarkan dari persamaan (2.16) diperoleh satuan dari laju korosi *mili meter per year* diartikan sebagai hilangnya berat sebagian spesimen karena pengaruh korosi dalam satuan mili meter per tahun, dimana konversi *mils per year* ke satuan metrik ditunjukkan pada persamaan berikut :

$\text{mpy} = 0,0254 \text{ mm/y} = 25,4 \text{ } \mu\text{m/y} = 2,9 \text{ nm/hr} = 0,805 \text{ pm/sec (mpy)}$ .

Perbandingan mpy dan satuan metrik memberikan peringkat pada **Tabel 2.6** (Fontana, 1987).

**Tabel 2.7** Peringkat laju korosi (Fontana, 1987)

Relative Corrosion Resistance	mpy	$\frac{\text{mm}}{\text{yr}}$	$\frac{\mu\text{m}}{\text{yr}}$	$\frac{\text{nm}}{\text{hr}}$	$\frac{\text{pm}}{\text{sec}}$
Outstanding	< 1	< 0.02	< 25	< 2	< 1
Excellent	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10	1-5
Good	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50	5-20
Fair	20-50	0.5-1	500-1000	50-150	20-50
Poor	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
Unacceptable	200 +	5 +	5000	500	200

## 2.5 Natrium Hipoklorit

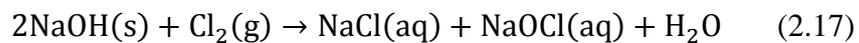
Natrium hipoklorit adalah senyawa kimia dengan rumus kimia NaOCl atau NaClO, yang tersusun dari kation natrium ( $\text{Na}^+$ ) dan anion hipoklorit ( $\text{OCl}^-$  atau  $\text{ClO}^-$ ). Natrium hipoklorit (NaOCl) merupakan salah satu jenis pemutih serta agen pengoksidasi kuat. Senyawa natrium hipoklorit merupakan senyawa pengoksidasi kuat yang artinya bahwa senyawa ini dapat menimbulkan korosi.



*National Fire Protection Association* (2004), senyawa natrium t dianggap sebagai pengoksidasi berbahaya jika konsentrasinya  $\geq 40\%$  n konsentrasi di bawah itu dikategorikan tidak berbahaya.

Senyawa ini disebut hipoklorit karena unsur klorin yang bereaksi dengan unsur logam alkali (Na). Penggunaan natrium Hipoklorit ini dapat dikatakan aman apabila dosis dan lama pemakaiannya sesuai. Sehingga tidak dapat mengganggu metabolisme tubuh manusia. Penggunaannya tidak hanya bermanfaat untuk pemutih, tetapi dapat pula digunakan untuk melumpuhkan mikroorganisme yang terdiri dari bakteri, archaea, jamur, alga, dan protozoa agar tidak bersarang dan merusak peralatan dengan konsentrasi yang diinginkan (Qin dkk., 2014).

Natrium hipoklorit dibuat dengan mereaksikan gas klorin ( $\text{Cl}_2$ ) dengan *caustic soda* (NaOH). Reaksinya dapat dituliskan sebagai berikut :



Namun natrium hipoklorit ini dapat terdekomposisi akibat pelepasan oksigen. Reaksinya sebagai berikut :



Natrium hipoklorit (NaOCl) memiliki rumus kimia NaOCl dengan berat molekul 74,44 g/mol. Wujud natrium hipoklorit ini berupa cair tidak berwarna, berbau, seperti Klorin, mempunyai titik didih 212 F/100°C (terdekomposisi), spesifik gravitasinya ( $\text{H}_2\text{O} = 1,21^\circ\text{C}$ ) yaitu  $\sim 11,4$ . Natrium hipoklorit mempunyai pH antara 11-12. Bahan ini reaktif terhadap bahan pereduksi, bahan mudah terbakar, bahan organik, dan asam, dapat terdekomposisi menjadi gas Klorin yang bersifat toksik dan korosif, mudah terurai jika terkena panas dan cahaya, larut dalam air dingin maupun panas, bersifat korosif terhadap aluminium, dan sangat beracun terhadap ekosistem perairan.

