



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI 0.02 wt. % Sr  
DAN 0.055, 0.078, DAN 0.087 wt. % Ti TERHADAP  
KETAHANAN AUS PADUAN ALUMINIUM AC4B**

**SKRIPSI**

**MASHUDI DARTA  
0606075095**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI 0.02 wt. % Sr  
DAN 0.055, 0.078, DAN 0.087 wt. % Ti TERHADAP  
KETAHANAN AUS PADUAN ALUMINIUM AC4B**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**MASHUDI DARTA  
0606075095**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2010**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

**Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,  
dan semua sumber yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Mashudi Darta**

**0606075095**

**1 Juli 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Mashudi Darta  
NPM : 0606075095  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi  
0.02 wt.% Sr dan 0.055, 0.078, dan 0.087 wt.% Ti Terhadap  
Ketahanan Aus Paduan Aluminium AC4B

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Si (.....)

Penguji 1 : Dr. Ir. A. Herman Yuwono, M.Phil.Eng (.....)

Penguji 2 : Dr. Ir. Myrna Ariati, M.Si (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 1 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Selama penelitian dan penyusunan skripsi ini, berbagai pihak telah banyak memberikan dukungan dan bantuan yang sangat besar. Penghargaan dan ucapan yang tulus disampaikan kepada **Prof. Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, Msi.** selaku dosen pembimbing skripsi yang telah senantiasa meluangkan waktu dan tenaga untuk memberikan arahan dan petunjuk serta dorongannya sehingga penelitian dan penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Ucapan terima kasih yang sedalam-dalamnya juga disampaikan kepada :

1. Bapak Prof.-Ing. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
2. Seluruh dosen dan staf Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang telah membantu selama perkuliahan dan praktikum.
3. Yang tercinta Mama, Papa, Novrialdia kakakku, Juliansah adikku, serta semua keluarga yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah senantiasa menyertai dengan kasih sayang, doa, dorongan, dan kesabaran serta memberikan dukungan moril maupun materil.
4. Ahmad Zakiyudin, yang telah meluangkan waktunya untuk mendapatkan hasil SEM/EDAX yang terbaik sehingga dapat menjadi acuan dalam melakukan analisis.
5. Sahabat dan semua teman-teman angkatan 2006 yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah banyak membantu memberikan semangat dan dukungan selama penyusunan skripsi maupun saat belajar bersama dan berbagi ilmu pada saat perkuliahan.

Disadari benar bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan skripsi ini, untuk itu sangat diharapkan adanya saran dan kritik yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi

ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Metalurgi dan Material dan kepustakaan di Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Jakarta, Juli 2010

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mashudi Darta  
NPM : 0606075095  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.055, 0.078, dan 0.087 wt.% Ti Terhadap Ketahanan Aus Paduan Aluminium AC4B**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 1 Juli 2010  
Yang menyatakan

(Mashudi Darta)

## ABSTRAK

Nama : Mashudi Darta  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.055, 0.078, dan 0.087 wt.% Ti Terhadap Ketahanan Aus Paduan Aluminium AC4B

Paduan aluminium AC4B adalah paduan aluminium hasil proses LPDC (*Low Pressure Die Casting*) yang digunakan untuk pembuatan komponen *cylinder head* pada sepeda motor. Paduan ini dituntut untuk memiliki ketahanan aus tinggi khususnya pada daerah yang bersentuhan dengan kepala piston. Penambahan penghalus butir dan *modifier* bertujuan untuk mengurangi tingkat kegagalan akibat porositas dan *shrinkage*. Untuk itu, pengaruh penambahan penghalus butir dan *modifier* terhadap ketahanan aus paduan aluminium AC4B akan dipelajari pada penelitian ini.

Pada penelitian ini digunakan 4 sampel dengan komposisi standar dan kombinasi 0.02 wt.% Sr dan 0.055, 0.078, dan 0.087 wt.% Ti. Selanjutnya, dilakukan pengujian kekerasan, pengujian aus dengan mesin uji aus Ogoshi, serta pengamatan *debris* keausan dan sub-permukaan keausan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray Analysis* (EDAX).

Hasil penelitian menunjukkan paduan yang telah dimodifikasi dan ditambahkan penghalus butir memiliki nilai laju aus yang lebih rendah yang berarti memiliki ketahanan aus yang lebih baik jika dibandingkan dengan sampel standar yang belum ditambahkan penghalus butir dan *modifier*.

**Kata Kunci :**

Penghalus butir, *modifier*, paduan aluminium AC4B, ketahanan aus

## ABSTRACT

Name : Mashudi Dart  
Major : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : Effect of Composition Combination of 0.02 wt.% Sr and 0.055, 0.078, and 0.087 wt.% Ti to Wear Resistance of Aluminum Alloy AC4B

Aluminum alloy AC4B is an alloy produced by Low Pressure Die Casting process, use in cylinder head component production. This alloy should have a good wear resistance especially in the region that have a friction with piston head. The addition of grain refiner and modifier can reduce high reject rate due to porosity and shrinkage. So, the effect of addition of grain refiner and modifier to wear resistance of aluminum alloy AC4B will be learned in this study.

This study using 4 sample with standard composition and combination of 0.02 wt.% Sr and 0.055, 0.078, and 0.087 wt.% Ti. A series of test were done i.e hardness test, wear testing by Ogoishi wear machine, and observation of wear debris, worn surface, and worn subsurface by using Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDAX).

The results of this study reveals that modified and grain refined alloy have a lower wear rate, so it have a good wear resistance than unmodified one.

**Keywords :**

Grain refiner, modifier, aluminum alloy AC4B, wear resistance

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 LATAR BELAKANG PENELITIAN .....	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN .....	3
1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN .....	3
1.3.1 Material Penelitian .....	3
1.3.2 Parameter Penelitian .....	3
1.4 MANFAAT PENELITIAN .....	3
<b>BAB 2 STUDI LITERATUR</b> .....	<b>5</b>
2.1 <i>CYLINDER HEAD</i> .....	5
2.2 KARAKTERISTIK LOGAM ALUMINIUM .....	5
2.3 ALUMINIUM TUANG DAN PADUANNYA .....	9
2.3.1 Paduan Aluminium Silikon Tuang .....	14
2.3.2 Paduan Aluminium AC4B .....	16
2.3.3 Pengaruh Unsur dalam Paduan Aluminium Tuang .....	17
2.4 KEAUSAN PADUAN ALUMINIUM AC4B .....	21
2.4.1 Definisi dan Penggolongan Keausan Logam .....	22
2.4.2 Mekanisme Keausan Adesif .....	23
2.4.3 Mekanisme Keausan Abrasif .....	24
2.4.4 Mekanisme Keausan Korosif .....	27
2.4.5 Mekanisme Keausan Lelah Permukaan .....	28
2.4.6 Faktor yang Memengaruhi Keausan Logam .....	28
2.4.7 Pengaruh Ti dan Sr Terhadap Keausan Paduan Aluminium AC4B .....	33
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN</b> .....	<b>45</b>
3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN .....	45
3.2 BAHAN DAN PERALATAN .....	46
3.2.1 Bahan .....	46
3.2.2 Peralatan .....	46
3.3 PROSEDUR PENELITIAN .....	46
3.3.1 Pengujian Kekerasan.....	46
3.3.2 Pengujian Komposisi Kimia.....	47

3.3.3 Pengujian Keausan.....	48
3.3.4 Pengamatan <i>Debris</i> Keausan.....	50
<b>BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>51</b>
4.1 ANALISIS KOMPOSISI KIMIA PADUAN ALUMINIUM AC4B .....	51
4.2 ANALISIS PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI 0.02 wt.% Sr DAN 0.063, 0.083, DAN 0.0108 wt.% Ti TERHADAP KEKERASAN PADUAN ALUMINIUM AC4B .....	54
4.3 ANALISIS PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI 0.02 wt.% Sr DAN 0.055, 0.078, DAN 0.087 wt.% Ti TERHADAP KETAHANAN AUS PADUAN ALUMINIUM AC4B .....	56
4.3.1 Analisis Pengujian Keausan Paduan Aluminium AC4B .....	56
4.3.2 Analisis <i>Debris</i> Keausan ( <i>Wear Debris</i> ).....	61
4.3.3 Analisis Sub-permukaan Keausan ( <i>Worn Subsurface</i> ).....	68
4.3.4 Analisis Permukaan Keausan ( <i>Worn Surface</i> ) .....	71
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>74</b>
5.1 KESIMPULAN .....	74
5.2 SARAN.....	75
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>76</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>79</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen <i>cylinder head</i> pada sepeda motor .....	5
Gambar 2.2	Jenis-jenis paduan aluminium yang sering digunakan .....	13
Gambar 2.3	Diagram fasa Al-Si .....	14
Gambar 2.4	Mikrostruktur aluminium-silikon komposisi, (a) hipoeutektik, (b) eutektik, dan (c) hipereutektik .....	15
Gambar 2.5	Grafik kelarutan hidrogen pada aluminium .....	20
Gambar 2.6	Skematis mekanisme keausan adesif .....	24
Gambar 2.7	Tipe gesekan selama terjadi keausan abrasif. (a) <i>Open two-body</i> . (b) <i>Closed two-body</i> . (c) <i>Open three-body</i> . (d) <i>Closed three-body</i> .....	25
Gambar 2.8	Lima proses dari keausan abrasif.....	26
Gambar 2.9	Permukaan piston yang rusak akibat terjadinya keausan korosif.....	27
Gambar 2.10	Keausan lelah permukaan dengan permulaan retak dan perambatan retak .....	28
Gambar 2.11	Gesekan antara dua permukaan .....	30
Gambar 2.12	Ketahanan aus vs kekerasan dari logam murni dan paduan .....	32
Gambar 2.13	(a) Variasi dari temperatur vs beban pada kecepatan luncur yang konstan (1.0 m/s) dan jarak luncur yang konstan (1200 m), (b) Variasi dari temperatur vs kecepatan luncur dengan beban yang konstan (30 N) dan jarak luncur yang konstan (1200 m) .....	34
Gambar 2.14	(a) Pola <i>X-Ray Diffraction</i> dari <i>debris</i> keausan, (b) Pola EDAX dari <i>debris</i> keausan .....	35
Gambar 2.15	Variasi dari koefisien gesek vs beban pada kecepatan luncur konstan (1.0 m/s) dan jarak luncur konstan (1200 m).....	36
Gambar 2.16	Pengaruh dari ukuran butir terhadap (a) Laju Aus dan (b) Ketahanan Aus dari Aluminium, penghalusan dengan menggunakan penghalus butir M51 sebanyak 0.2 wt.% .....	38
Gambar 2.17	Variasi dari berat yang hilang sebagai fungsi dari jarak luncur untuk semua bahan percobaan di bawah beban (a) 20N, (b) 40 N, c) 60 N.....	39
Gambar 2.18	(a) Perbedaan dari volume yang hilang vs beban yang berbeda, (b) Variasi dari ketahanan aus vs perubahan beban pada kecepatan luncur konstan (1.0 m/s) dan jarak luncur konstan (1200 m) .....	40
Gambar 2.19	Variasi dari laju keausan pada kenaikan beban untuk semua bahan percobaan .....	41
Gambar 2.20	Variasi dari ketahanan aus vs kecepatan luncur pada beban konstan (50 N) dan jarak luncur konstan (1200 m).....	42

Gambar 2.21	Hasil SEM dan analisis EDS dari <i>debris</i> keausan yang dihasilkan pada pengujian dengan beban 60 N; (a dan b) A356-10%B <sub>4</sub> C yang belum dimodifikasi, (c dan d) A356-10%B <sub>4</sub> C (modifikasi 0.5% Sr).....	43
Gambar 2.22	Hasil SEM <i>debris</i> keausan untuk paduan pada kecepatan luncur 0.3 m/s; (a) Paduan A357-Sr pada 0.25 MPa, b) Paduan A35 yang belum dimodifikasi pada 2 MPa, (c) Paduan A357-Sb pada 2 MPa, (d) Paduan A357-Sr pada 2 MPa.....	44
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian .....	45
Gambar 3.2	Mesin uji kekerasan Rocky .....	47
Gambar 3.3	Mesin uji komposisi kimia Foundry-Master .....	47
Gambar 3.4	Mesin uji aus Ogoshi .....	48
Gambar 3.5	Skematis pengujian keausan dengan metode Ogoshi .....	49
Gambar 3.6	Mesin SEM LEO 420i .....	50
Gambar 4.1	Perbandingan nilai kekerasan pada daerah tipis dan tebal untuk komposisi normal (0.00 wt. % Ti dan 0.00 wt. % Sr) dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083, dan 0.108 wt. % Ti.....	55
Gambar 4.2	Hasil pengujian kekerasan pada daerah tebal untuk sampel A, B, C, dan D .....	55
Gambar 4.3	Hasil uji keausan paduan aluminium AC4B untuk komposisi normal (0.0 wt.% Sr dan 0.0 wt.% Ti) dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.055, 0.078, dan 0.087 wt.% Ti.....	57
Gambar 4.4	Foto mikrostruktur paduan AC4B pada beban uji 18.96 kg, (a-b) sampel A3, (c-d) sampel B3, etsa Tucker .....	61
Gambar 4.5	Hasil pengamatan SEM dari <i>debris</i> keausan sampel A2 dengan detektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX .....	62
Gambar 4.6	Hasil pengamatan SEM dari <i>debris</i> keausan sampel B2 dengan detektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX .....	63
Gambar 4.7	Hasil pengamatan SEM dari <i>debris</i> keausan sampel C2 dengandetektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX .....	64
Gambar 4.8	Hasil pengamatan SEM dari <i>debris</i> keausan sampel C3 dengan detektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX .....	65
Gambar 4.9	Hasil pengamatan SEM dari <i>debris</i> keausan sampel D2 dengan detektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX .....	66
Gambar 4.10	Hasil pengamatan SEM dari sub-permukaan keausan sampel C2, etsa Tucker, detektor QBSD, (a) Low Magnification, (b) High Magnification, nomor	

	menunjukkan titik pengujian EDAX .....	69
Gambar 4.11	Hasil pengujian SEM dari permukaan aus sampel C2, detektor SE, (a) <i>Low Magnification</i> , (b) <i>High Magnification</i> .....	72



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Berat jenis beberapa jenis logam.....	6
Tabel 2.2	Sifat-sifat umum aluminium .....	8
Tabel 2.3	Penamaan paduan aluminium <i>as-cast</i> menurut standar AA .....	11
Tabel 2.4	Penamaan paduan aluminium tempa menurut AA.....	12
Tabel 2.5	Penamaan standar untuk proses pengerasan pada paduan aluminium .....	13
Tabel 2.6	Komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan <i>Japan Industrial Standard</i> .....	16
Tabel 2.7	Komposisi kimia paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar <i>Aluminum Association</i> .....	16
Tabel 2.8	Karakteristik yang dimiliki paduan aluminium AC4B.....	17
Tabel 4.1	Hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.063, 0.083, dan 0.108 wt.% Ti dibandingkan dengan standar QA AHM dan <i>Aluminum Association (AA)</i> .....	51
Tabel 4.2	Hasil pengujian komposisi kimia paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan <i>Japan Industrial Standards</i> .....	53
Tabel 4.3	Data hasil pengujian keausan paduan aluminium AC4B untuk sampel A, B, C, dan D .....	56
Tabel 4.4	Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.5 .....	62
Tabel 4.5	Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.6 .....	63
Tabel 4.6	Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.7 .....	64
Tabel 4.7	Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.8 .....	65
Tabel 4.8	Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.9 .....	66
Tabel 4.9	Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.10.....	69

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil Uji Komposisi Kimia Sampel A .....	79
Lampiran 2	Hasil Uji Komposisi Kimia Sampel B .....	80
Lampiran 3	Hasil Uji Komposisi Kimia Sampel C .....	81
Lampiran 4	Hasil Uji Komposisi Kimia Sampel D .....	82
Lampiran 5	Hasil Pengujian EDAX Sampel A2 .....	83
Lampiran 6	Hasil Pengujian EDAX Sampel B2 .....	86
Lampiran 7	Hasil Pengujian EDAX Sampel C2 .....	89
Lampiran 8	Hasil Pengujian EDAX Sampel C3 .....	92
Lampiran 9	Hasil Pengujian EDAX Sampel D2 .....	95
Lampiran 10	Hasil Pengujian EDAX Sub-Permukaan Sampel C2.....	98
Lampiran 11	Tabel Data Hasil Uji Keausan dan Kekerasan.....	103



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG PENELITIAN

Semakin banyaknya para pengguna sepeda motor di Indonesia akhir-akhir ini menunjukkan perkembangan industri otomotif yang sangat pesat. Perkembangan industri otomotif ini berpengaruh pada penggunaan logam aluminium yang semakin meluas dan semakin banyak. Contohnya adalah dalam pembuatan *cylinder head* sebagai salah satu komponen mesin motor yang menggunakan material paduan aluminium tuang AC4B (Al-Si-Cu) (dalam standar JIS (*Japan Industrial Standards*)) atau setara dengan paduan 333.0 *as cast* berdasarkan standar AA (*Aluminium Association*)<sup>[1]</sup>.

Pembuatan *cylinder head* ini dilakukan dengan menggunakan metode *Low Pressure Die Casting* (LPDC). Pada proses pembuatan *cylinder head* dengan menggunakan metode ini terjadi banyak *reject* karena proses solidifikasi yang tidak seragam dan terjadi cacat pada produk yang dihasilkan, adapun jenis-jenis kegagalan yang umumnya terjadi adalah penyusutan, porositas, dan *misrun*. oleh sebab itu paduan tersebut ditambahkan unsur penghalus butir dan unsur modifikasi. Dengan adanya penambahan penghalus butir atau unsur modifikasi ini, maka akan dapat menurunkan tingkat kegagalan komponen produk hasil pengecoran dengan cara meminimalisir cacat-cacat yang terbentuk<sup>[2]</sup>. Hal ini dikarenakan penghalus butir berfungsi sebagai pembentuk inti, maka pendinginan dapat lebih terkontrol sehingga butir-butir menjadi lebih halus dan sifat mekanis logam menjadi lebih baik. Sedangkan penambahan unsur modifikasi terhadap paduan aluminium tuang dapat memodifikasi struktur silikon eutektik pada fasa Al-Si dari *acicular* menjadi *fibrous* sehingga dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan kekuatan tarik, fluiditas, keuletan, kekuatan impact, sifat mampu mesin dari produk hasil pengecoran, dan ketahanan terhadap ausnya<sup>[3]</sup>.

Pengaruh penambahan *modifier* dan penghalus butir secara individual telah banyak dipelajari. Namun, penelitian terhadap pengaruh kombinasi penambahan dan interaksi antara keduanya pada proses pengecoran *Low Pressure Die Casting* (LPDC) belum banyak dilakukan. Terdapat berbagai jenis penghalus

butir dan *modifier* yang dapat digunakan. Untuk penghalus butir diantaranya adalah Al-Ti-B dalam bentuk batangan maupun yang berbentuk serbuk. Sedangkan untuk *modifier* diantaranya adalah Al-10-Sr dalam bentuk batangan. Pada penelitian ini, digunakan penghalus butir berbentuk serbuk dan *modifier* berbentuk batangan.

M. Azi Fallah<sup>[4]</sup> menyimpulkan bahwa pengaruh komposisi dari 0.02 wt% Sr dan 0.063, 0.083, dan 0.108 wt% Ti akan meningkatkan sifat mekanik, porositas panjang fluida, dan tingkat modifikasi silikon eutektik. Selain itu, kombinasi dari penambahan Ti dan Sr akan meningkatkan kuantitas porositas, sehingga porositas lebih terdistribusi merata pada seluruh bagian benda cor dan memiliki bentuk yang bulat dan *irregular* sebagian. Hasil lain yang didapatkan dari penelitian ini adalah penggabungan proses modifikasi dan penghalus butir akan menghasilkan struktur kristal yang termodifikasi menjadi struktur *fibrous* dan dendrit yang halus-halus.

Penambahan dari natrium (Na), strontium (Sr), atau *antimony* (Sb) sebagai *modifier* dari paduan Al-Si dapat mengubah bentuk dari pertikel silikon dari yang berbentuk *acicular* kasar menjadi *fibrous* atau berserabut yang dapat meningkatkan sifat mekaniknya<sup>[5]</sup>. Ditambah lagi, Pramila dan Biswas<sup>[6]</sup> telah mempelajari perilaku keausan dari paduan Al-Si yang telah dimodifikasi dengan natrium (Na) dan mengindikasikan bahwa dalam kondisi hasil coran (*as-cast*), modifikasi hanya memberikan sedikit pengaruh terhadap ketahanan aus dari paduan Al-Si. Hasil ini menunjukkan bahwa ketahanan aus paduan Al-Si tuang tidak memberikan pengaruh yang berarti dengan adanya penambahan *modifier* natrium<sup>[6]</sup>.

Pengaruh kombinasi dari *modifier* dan penghalus butir secara bersamaan terhadap ketahanan aus dari paduan aluminium juga belum banyak dilakukan seperti yang telah dilakukan Pramila dan Biswas<sup>[6]</sup> yang meneliti ketahanan aus dari paduan aluminium yang hanya diberi *modifier* saja, sehingga secara keseluruhan penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan *modifier* 0.02 wt.% stronsium dan penghalus butir 0.055, 0.078, dan 0.087 wt.% titanium terhadap ketahanan aus dari paduan aluminium AC4B hasil proses LPDC (*Low Pressure Die Casting*).

## 1.2 TUJUAN PENELITIAN

1. Untuk mempelajari pengaruh penambahan 0.02 wt.% Sr, dan 0.055, 0.078, dan 0.087 wt.% Ti terhadap ketahanan aus paduan aluminium AC4B hasil proses LPDC.
2. Untuk mempelajari pengaruh penambahan 0.02 wt% Sr, dan 0.055, 0.078, dan 0.087 wt% Ti terhadap mode keausan paduan aluminium AC4B hasil proses LPDC.

## 1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN

### 1.3.1 Material Penelitian

1. Material yang digunakan adalah paduan aluminium tuang AC4B.

### 1.3.2 Parameter Penelitian

1. Variabel komposisi tanpa titanium dan stronsium (0 wt.% Sr dan 0 wt.% titanium) dan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.055, 0.078, dan 0.087 wt.% Ti.
2. Analisis struktur dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan di Laboratorium SEM Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
3. Pengujian kekerasan menggunakan mesin *Rockwell* dengan indentor bola baja 1/16", beban 100 kgf, dan *dwell time* 5 detik.
4. Pengujian komposisi kimia (spektro) dilakukan di *Center for Material Processing and Failure Analysis* (CMPFA) Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
5. Pengujian keausan menggunakan mesin uji aus *Ogoshi* dengan variabel kecepatan putar 2.38 m/s, jarak luncur 100.000 mm, diameter *revolving disc* sebesar 30 mm dengan lebar 3 mm, dan beban seberat 2.11, 6.32, dan 18.96 kg.

## 1.4 MANFAAT PENELITIAN

Diharapkan penelitian ini dapat memberikan informasi mengenai pengaruh Ti dan Sr pada ketahanan aus paduan aluminium AC4B, Karena seperti kita tahu di dalam bagian *cylinder head* terdapat banyak gesekan dari beberapa bagian yang

bekerja pada suhu yang cukup tinggi sehingga jika material ini tidak tahan terhadap gesekan yang terjadi maka keausan akan cepat terjadi pada bagian ini yang mengakibatkan banyaknya produk yang terkena *reject*. Selain itu, penelitian ini diharapkan juga dapat memberikan tambahan studi literatur bagi pihak lain yang juga ingin mengetahui mengenai pengaruh penambahan *modifier* Sr dan penghalus butir Ti terhadap ketahanan aus pada paduan aluminium tuang AC4B (Al-Si-Cu).



## BAB 2

### STUDI LITERATUR

#### 2.1 *CYLINDER HEAD*

*Cylinder head* adalah bagian mesin dari sepeda motor yang berperan dalam mengatur proses pembakaran. *Cylinder head* berada pada bagian atas dari *cylinder* yang terdiri atas ruang bakar (*combustion chamber*),udukan *valve* dan *spark plug*. Pada bagian atas terdapat ruang untuk rantai keteng dan *rocker arm* yang berfungsi untuk mentransfer gerakan berputar rantai keteng menjadi gerak lurus (*linear*) untuk mengoperasikan *valve*. Dibagian terluar *cylinder head* terdapat sirip-sirip yang berfungsi sebagai pendingin udara untuk mesin<sup>[7]</sup>. Sebagaimana perannya dalam mengatur ruang pembakaran maka *cylinder head* harus memiliki ketahanan terhadap *hot tear*. Contoh bentuk dari *cylinder head* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Komponen *cylinder head* pada sepeda motor<sup>[7]</sup>

#### 2.2 KARAKTERISTIK LOGAM ALUMINIUM

Aluminium merupakan salah satu unsur logam yang ada di alam dengan simbol Al. Aluminium memiliki nomor atom 13 dengan konfigurasi elektron  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p$  dan berat atom 26.28. Isotopnya memiliki nomor massa 27 adalah satu-satunya isotop yang stabil. Aluminium memiliki sifat-sifat antara lain lunak, ringan, dan merupakan logam berwarna abu-abu yang memiliki ketahanan terhadap korosi saat dalam keadaan murni yang disebabkan oleh aktifitas kimianya karena keberadaan lapisan permukaan oksidanya yang tipis<sup>[8]</sup>.

Aluminium pertama kali ditemukan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1809 dan pertama kali berhasil direduksi sebagai logam oleh H.C Oersted pada tahun 1825. Secara terpisah pada tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C.M Hall di Amerika Serikat telah memperoleh aluminium. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah pada urutan kedua setelah besi baja dan merupakan yang tertinggi diantara material non-ferrous lainnya<sup>[8]</sup>.

Aluminium termasuk ke dalam jenis logam yang mudah dipadukan dengan logam lainnya sehingga sampai saat ini sudah lebih dari 300 jenis komposisi paduan aluminium yang telah dibuat untuk berbagai aplikasi<sup>[8]</sup>. Sebagai logam yang sering digunakan dalam proses pengecoran logam, aluminium tuang memiliki beberapa karakteristik atau sifat-sifat tertentu yang membuatnya bersifat lebih ekonomis dan menarik untuk digunakan. Karakteristik yang dimiliki aluminium<sup>[2]</sup> adalah sebagai berikut, antara lain :

1. Berat jenis aluminium lebih ringan jika dibandingkan dengan logam lain, yaitu sekitar sepertiga dari berat jenis baja ( $7.83 \text{ g/cm}^3$ ). Berat jenis aluminium  $\pm 2.689 \text{ gr/cm}^3$ , dan dalam keadaan cair memiliki berat jenis sekitar  $2.3 \text{ gr/cm}^3$ . Karena berat jenisnya yang relatif rendah, maka dapat dilakukan proses pengecoran logam untuk benda-benda yang berukuran kecil dan tekanan cetakan yang juga relatif rendah sehingga dapat dipakai peralatan cetakan yang ringan. Tabel 2.1 menjelaskan tentang perbandingan berat jenis beberapa jenis logam<sup>[9]</sup>.

**Tabel 2.1** Berat jenis beberapa jenis logam<sup>[9]</sup>

Bahan	Titik Cair ( $^{\circ}\text{C}$ )	Berat Jenis ( $\text{g/cm}^3$ )
Air	0	0.9982(20 $^{\circ}\text{C}$ )
Air Raksa	-38.9	13.56(20)
Timah	232	5.52(232)
Timbal	327	10.55(440)
Seng	420	6.21(420)
Aluminium	660	2.35(760)
Tembaga	1083	7.84(1200)
Besi	1537	7.13(1600)
Besi Cor	1170	6.9(1300)

2. Temperatur lebur dan temperatur tuang yang relatif lebih rendah bila dibandingkan dengan logam lain, temperatur lebur aluminium adalah sekitar 650-750 °C dan dapat menggunakan peralatan peleburan yang sederhana.
3. Kelarutan gas yang rendah (kecuali terhadap gas hidrogen).
4. Sifat mampu cor yang baik, terutama pada daerah komposisi yang dekat dengan daerah eutektik.
5. Kemampuan permesinan dan penyelesaian permukaan yang baik.
6. Ketahanan terhadap korosi yang sangat baik pada hampir semua kondisi lingkungan dengan membentuk lapisan tipis aluminium oksida ( $Al_2O_3$ ) yang bersifat pasif dan keras.
7. Konduktivitas panas dan listrik yang baik. Untuk berat yang diberikan, aluminium memiliki konduktivitas yang paling tinggi pada temperatur tertentu dibandingkan dengan elemen lain. Konduktivitas listrik dari berat spesifik aluminium jika dihitung nilainya didapatkan sekitar dua kali lebih besar dari unsur tembaga. Hal ini yang mendasari bahwa ternyata aluminium digunakan secara ekstensif untuk beberapa bagian atas kabel listrik.
8. Terdapat cukup banyak paduan aluminium tuang yang relatif bebas dari kecenderungan retak pada temperatur tinggi yang dapat disebabkan oleh peristiwa mulur pada material.
9. Aluminium pada temperatur rendah tidak mengalami fenomena transisi ulet ke rapuh, atau perubahan sifat mekanis logam dari yang bersifat lunak menjadi bersifat getas pada perubahan temperatur rendah yang sangat drastis (temperatur transisi). Oleh karena itu, aluminium dapat digunakan pada kondisi temperatur rendah sekalipun.
10. Memiliki kekuatan yang cukup baik sebanding dengan rasio berat.

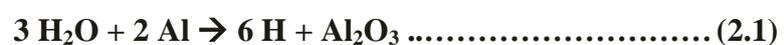
Selain kelebihan-kelebihan tersebut, aluminium tuang juga memiliki beberapa kekurangan<sup>[2]</sup>, di antaranya adalah sebagai berikut :

1. Dengan massa jenis yang rendah, aluminium dapat menimbulkan adanya *impurities* atau pengotor *non-metalik* (seperti oksida) yang umumnya memiliki berat hampir sama dengan aluminium air itu sendiri (sekitar 1.9-2.1 gr/cm<sup>3</sup>). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang berat jenisnya 2.1 gr/cm<sup>3</sup> hampir sama dengan berat jenis aluminium cair 2.3 gr/cm<sup>3</sup>. Oleh karena itu, diperlukan perlakuan khusus yang berguna untuk mengurangi kadar oksida dalam aluminium cair itu sendiri sehingga diperlukan waktu kerja yang ekstra dan proses pengecoran dapat berlangsung lebih lama. Tabel 2.2 menjelaskan tentang sifat-sifat umum yang dimiliki oleh aluminium.

Tabel 2.2 Sifat-sifat umum aluminium<sup>[2]</sup>

Sifat	Nilai
Nomor atom	13
Berat atom	26.89
Nomor valensi atom	3
Struktur kristal	FCC
Titik lebur (°C)	660.2
Titik didih (°C)	2480
Rata-rata panas spesifik (0-100 °C)(cal/g.°C)	0.219
Konduktivitas panas (0-100 °C)(cal/cms.°C)	0.57
Koefisien ekspansi linier (0-100 °C)(x10 <sup>-6</sup> /°C)	23.5
Resistivitas elektrik pada 20 °C (μΩ.cm)	2.69
Kepadatan (g/cm <sup>3</sup> )	2.6898
Modulus elastisitas (GPa)	68.3
Rasio poisson	0.34

2. Aluminium sangat mudah berikatan dengan hidrogen (afinitas terhadap gas hidrogen rendah).



Sehingga memerlukan suatu cara untuk meminimalisir kehadiran gas hidrogen dalam aluminium cair tersebut, yakni dengan pengapungan gelembung gas atau perlakuan menggunakan gas argon.

3. Aluminium memiliki tingkat penyusutan yang cukup tinggi yaitu sebesar 6-8 % pada saat proses pendinginan.
4. Aluminium murni mempunyai sifat mampu cor dan sifat mekanis yang buruk.

Oleh karena itu, untuk mengatasi kekurangan-kekurangan yang terdapat pada aluminium, dilakukan beberapa perlakuan khusus, yaitu :

1. Penambahan unsur paduan.
2. Pemilihan proses pengecoran yang tepat.
3. Pengontrolan laju pembekuan.
4. Pengaturan kecepatan pendinginan selama proses pendinginan.
5. Perlakuan panas.
6. Densifikasi proses setelah solidifikasi.

### 2.3 ALUMINIUM TUANG DAN PADUANNYA

Aluminium murni merupakan logam yang memiliki kemampuan cor (*castability*) yang buruk, oleh karena itu untuk mengecor aluminium diperlukan unsur paduan dengan menggunakan paduan aluminium tuang. Aluminium tuang memiliki komposisi silikon yang lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium tempa dimana penambahan silikon akan membuat aluminium memiliki karakteristik tuang yang lebih baik. Sebagai material tuang aluminium memiliki karakteristik antara lain<sup>[10]</sup>:

- 1) Memiliki temperatur lebur yang rendah. Hal tersebut akan menghemat penggunaan energi dalam proses peleburannya.
- 2) Massa jenis aluminium sekitar 1/3 dari massa jenis baja ( $\rho$  Al alloy = 2.6-2.9 g/cm<sup>3</sup> sedangkan  $\rho$  baja karbon = 7.85 g/cm<sup>3</sup>).
- 3) Fluiditasnya baik sehingga aluminium mampu mengisi rongga-rongga dari cetakan yang tipis.
- 4) Memiliki stabilitas kimia yang cukup baik.

- 5) Memiliki siklus penuangan yang cukup cepat karena perpindahan panas dari aluminium ke cetakan relatif cepat.
- 6) Dalam hal kelarutan gas terhadap hidrogen dapat dikendalikan dengan proses yang tepat.
- 7) Memiliki permukaan *as-cast* yang baik, berkilat, dan tanpa noda.
- 8) Cukup banyak jenis paduan aluminium tuang yang relatif bebas dari kecenderungan *hot shortness*.

Untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanik dari aluminium, maka paduan aluminium sering ditambahkan beberapa jenis unsur yang berguna untuk membentuk suatu paduan dengan sifat tertentu yang lebih baik bila dibandingkan dengan aluminium murni. Penambahan unsur paduan ini biasanya banyak diaplikasikan untuk pembuatan komponen kendaraan bermotor, badan pesawat terbang, kaleng minuman, dan peralatan-peralatan lainnya. Penambahan unsur-unsur paduan yang berfungsi sebagai atom asing yang disisipkan atau yang menyisip ke dalam kisi aluminium dapat menguntungkan maupun merugikan. Sifat mekanik dan fisik dari paduan akan meningkat. Akan tetapi, konduktifitas aluminium akan menurun dan penambahan unsur paduan dapat menaikkan volume dari benda kerja<sup>[11]</sup>.

Secara umum, paduan aluminium dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu aluminium cetak dan aluminium tempa. Paduan aluminium tuang merupakan paduan logam tuang yang relatif banyak digunakan dibandingkan dengan jenis paduan tuang material lainnya. Aluminium dapat digunakan pada berbagai macam proses pengecoran yang umum dipakai dan dapat dituang langsung ke dalam cetakan logam yang terpasang pada mesin otomatis dengan volume yang besar. Cairan aluminium dapat dituang ke dalam cetakan pasir, sentrifugal dan cetakan pengecoran investasi ataupun proses plaster.

Logam aluminium termasuk kedalam jenis logam yang mudah dipadukan dengan logam lainnya, dan saat ini lebih dari 300 jenis komposisi paduan aluminium telah dibuat untuk berbagai keperluan<sup>[8]</sup>. Oleh karena itu, dilakukan sistem penamaan terhadap jenis paduan aluminium yang sangat banyak jumlahnya dan berfungsi untuk memudahkan penggolongan sifat paduan dan memudahkan dalam pemilihan paduan aluminium sesuai dengan sifat yang diinginkan dalam

aplikasi tertentu. Terdapat berbagai macam penamaan material aluminium hasil pengecoran, salah satunya adalah menurut *Aluminium Association* (AA) yang digunakan oleh Amerika Serikat<sup>[12]</sup>. Tabel 2.3 menjelaskan tentang klasifikasi dari paduan aluminium *as-cast* menurut standar AA (ANSI H35. 1-1987)<sup>[11]</sup>.

**Tabel 2.3** Penamaan paduan aluminium *as-cast* menurut standar AA<sup>[2]</sup>

No. Seri	Paduan
1xx.x	Aluminium murni ( $\geq 99\%$ )
2xx.x	Paduan aluminium – tembaga
3xx.x	Paduan aluminium silikon + tembaga / magnesium
4xx.x	Paduan aluminium silikon
5xx.x	Paduan aluminium magnesium
6xx.x	Tidak dipakai
7xx.x	Paduan aluminium – seng
8xx.x	Paduan aluminium – timah (Sn)
9xx.x	Al + unsur lain

Dalam sistem penamaan AA, terdapat empat angka dengan angka keempat dituliskan terpisah dari tiga angka lainnya (XXX.X) yang berfungsi untuk menentukan jenis produk yang dapat dibuat dari paduan aluminium tersebut. Dalam sistem penamaan AA, angka pertama menunjukkan kelompok paduan, angka kedua dan ketiga menunjukkan kemurnian minimum untuk aluminium tanpa paduan dan sebagai nomor identifikasi untuk paduan tersebut, angka keempat menandakan bentuk produk (.0 = spesifikasi coran, .1 = spesifikasi ingot, .2 = spesifikasi ingot yang lebih spesifik). Tabel 2.4 menjelaskan tentang klasifikasi dari paduan aluminium tempa menurut standar AA<sup>[2]</sup>.

**Tabel 2.4** Penamaan paduan aluminium tempa menurut AA<sup>[2]</sup>

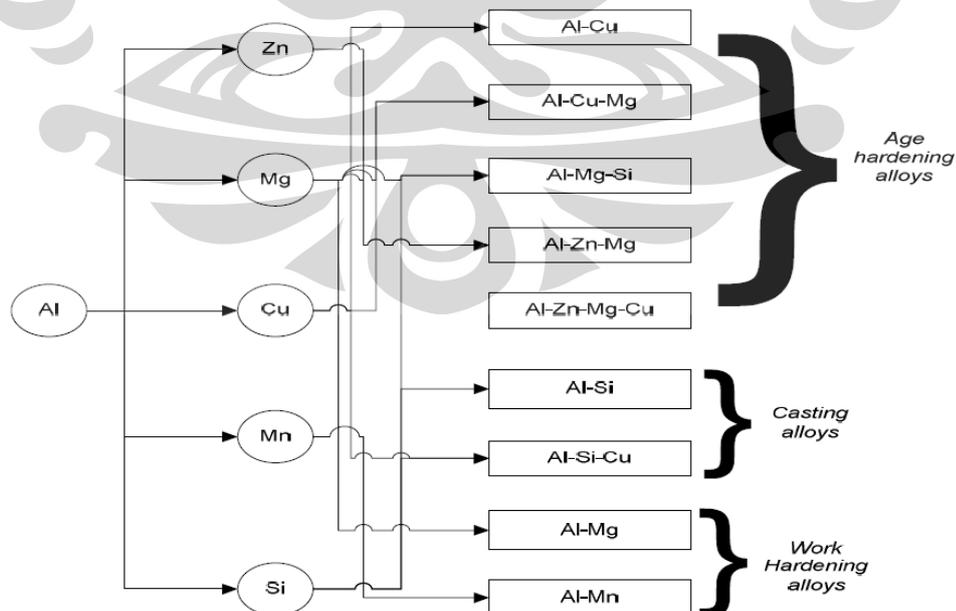
No. Seri	Unsur paduan utama
1xxx	Al murni ( $\geq 99\%$ )
2xxx	Tembaga (Cu)
3xxx	Mangan (Mn)
4xxx	Silikon (Si)
5xxx	Magnesium (Mg)
6xxx	Magnesium dan silikon
7xxx	Seng (Zn)
8xxx	Unsur lain-lain
9xxx	Seri yang tidak digunakan

Biasanya, ingot versi XXX.1 dapat digunakan sebagai produk kedua (dilebur kembali dari sisa-sisa ingot aluminium) dimana ingot versi XXX.2 dibuat dari aluminium pertama. Beberapa nama paduan menggunakan huruf, setiap huruf yang diikuti oleh angka menjadi pembeda antara paduan dalam hal persentase pengotor atau elemen yang jumlahnya minor. Selain berdasarkan unsur paduan yang dominan, aluminium juga dapat diklasifikasikan berdasarkan perlakuan panas yang dilakukan padanya. Jenis-jenis perlakuan panas yang dapat diberikan kepada aluminium menurut AA (*Aluminium Association*) terdapat dalam Tabel 2.5 yang dapat mengetahui berbagai proses perlakuan panas pada jenis aluminium tertentu. Setiap jenis perlakuan panas berfungsi untuk menghasilkan aluminium dengan sifat tertentu<sup>[1]</sup>.

**Tabel 2.5** Penamaan standar untuk proses pengerasan pada paduan aluminium<sup>[2]</sup>

Simbol Baru	Penjelasan	Simbol BS lama
O	Aluminium hasil pabrikan, lunak	O
F	Aluminium hasil fabrikasi	M
H12	Pengerasan tegangan, seperempat keras	H2
H14	Pengerasan tegangan, setengah keras	H4
H16	Pengerasan tegangan, tiga perempat keras	H6
H18	Pengerasan tegangan, keras semuanya	H8
H22	Pengerasan tegangan, sebagian pendinginan seperempat keras	H2
H24	Pengerasan tegangan, sebagian pendinginan setengah keras	H4
H26	Pengerasan tegangan, sebagian pendinginan tiga perempat keras	H6
H28	Pengerasan tegangan, sebagian pendinginan keras seluruhnya	H8
H32	Pengerasan tegangan dan stabil, seperempat keras	H2
H34	Pengerasan tegangan dan stabil, setengah keras	H4
H36	Pengerasan tegangan dan stabil, tiga perempat keras	H6
H38	Pengerasan dan stabil, keras seluruhnya	H8

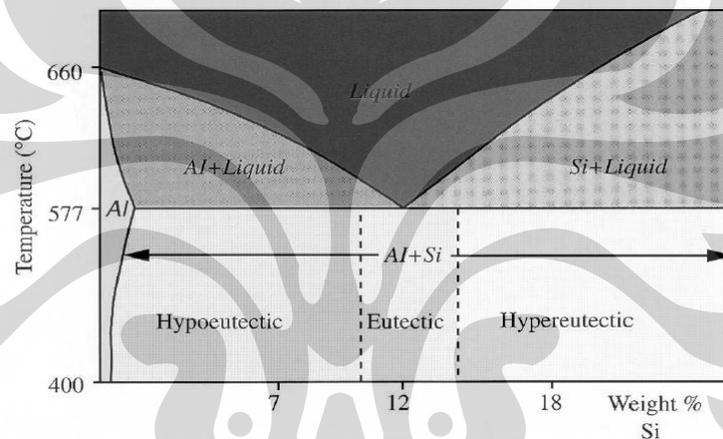
Jenis-jenis paduan aluminium yang umum digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.2 dimana pada umumnya paduan yang digunakan merupakan paduan aluminium dengan penambahan Zn, Mg, Si, Mn dan Cu. Setiap paduan memiliki karakteristik masing-masing dan digunakan untuk kondisi tertentu sesuai dengan sifat yang dihasilkan oleh paduan tersebut. Setiap paduan memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing.



**Gambar 2.2** Jenis-jenis paduan aluminium yang sering digunakan<sup>[3]</sup>

### 2.3.1 Paduan Aluminium Silikon Tuang

Paduan Aluminium-Silikon tuang merupakan kelas paduan yang cukup penting dalam industri pengecoran aluminium dimana penggunaannya telah meluas untuk berbagai aplikasi seperti untuk komponen otomotif, industri penerbangan serta industri pertahanan karena memiliki karakteristik tuang yang baik. Paduan Aluminium-Silikon memiliki fluiditas yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, sifat mampu las yang baik serta memiliki koefisien ekspansi termal yang rendah. Tetapi, kehadiran partikel silikon yang keras dalam mikrostrukturnya membuat paduan aluminium-silikon ini mempunyai sifat yang buruk dalam proses permesinannya<sup>[13]</sup>. Gambar 2.3 menunjukkan diagram fasa dari paduan aluminium-silikon.



Gambar 2.3 Diagram fasa Al-Si<sup>[14]</sup>

Paduan Al-Si ini terbagi atas tiga jenis berdasarkan komposisi silikonnya<sup>[15]</sup>, yaitu :

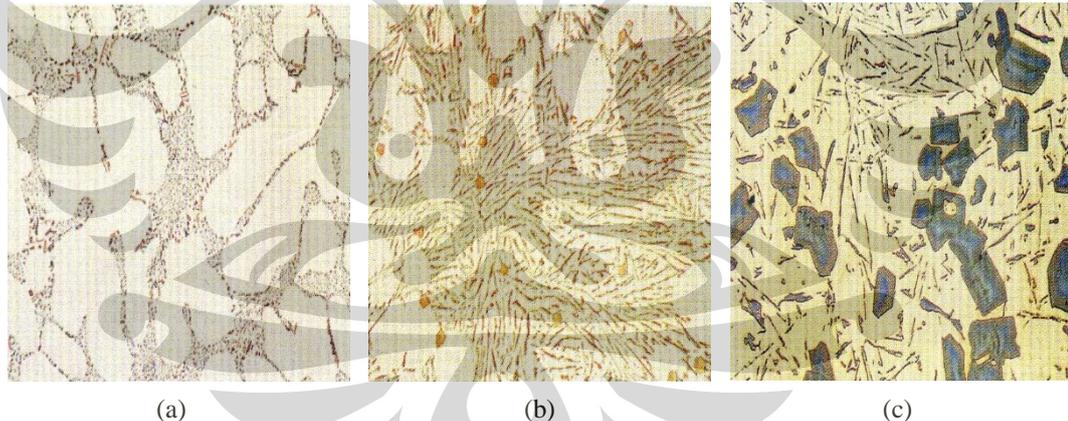
1. Hipoeutektik (< 11.7 % Si).
2. Eutektik (11.7% - 12.2% Si).
3. Hiper-eutektik (>12% Si).

Berdasarkan kandungan silikon yang ada maka paduan aluminium-silikon dibagi menjadi paduan hipoeutektik (kadar Si < 11.7 %), paduan eutektik (Si 11.7-12 %) dan paduan hipereutektik (kadar Si > 12.2 %) dimana struktur utama dari ketiga komposisi ini berupa fasa  $\alpha$ -Al yang sangat kaya akan aluminium. Struktur ini akan tetap muncul meskipun pada kondisi hipereutektik, karena bentuk struktur ini akan selalu terpisah dari fasa padatnya, baik dalam kondisi

hipoeutektik, eutektik dan hipereutektik. Selain fasa  $\alpha$ -Al, terdapat juga fasa yang merupakan partikel-partikel kristal silikon yang tidak terlarut dalam fasa  $\alpha$ -Al. Pada kondisi hipereutektik, fasa tersebut menghasilkan silikon primer yang bentuknya kasar<sup>[16]</sup>.

Pada komposisi hipoeutektik, terdapat kandungan silikon  $< 11.7\%$ . Pada daerah ini, pembekuan terjadi melalui fasa cair-padat. Struktur akhir dari komposisi ini adalah struktur yang kaya aluminium, dan sebagai fasa utamanya adalah fasa  $\alpha$  dengan struktur eutektik sebagai struktur tambahan<sup>[15]</sup>.

Komposisi eutektik merupakan daerah dimana paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya<sup>[3]</sup>. Komposisi eutektik mengandung kadar silikon antara  $11.7\% - 12.2\%$ <sup>[16]</sup>. Proses pembekuan yang berlangsung menyerupai pembekuan logam murni, dimana temperatur awal dan temperatur akhir adalah sama (*isothermal*). Adanya struktur eutektik ini mengakibatkan paduan Aluminium-Silikon memiliki karakteristik mampu cor yang baik. Gambar 2.4 menunjukkan mikrostruktur aluminium-silikon pada tiap komposisi.



**Gambar 2.4** Mikrostruktur aluminium-silikon komposisi, (a) hipoeutektik, (b) eutektik, dan (c) hipereutektik<sup>[14]</sup>

Untuk komposisi hipereutektik, kandungannya silikonnya  $> 12.2\%$ <sup>[16]</sup>. Mikrostruktur paduan ini terdiri dari endapan partikel silikon primer dalam matriks eutektik. Karena adanya endapan partikel silikon, maka paduan Aluminium-Silikon hipereutektik memiliki ketahanan aus yang sangat baik<sup>[14]</sup>. Akan tetapi kekuatan tarik dan keuletannya lebih rendah dibandingkan dengan

Aluminium-Silikon hipoeutektik. Selain itu, adanya endapan partikel silikon ini membuat masalah pada proses permesinannya.

### 2.3.2 Paduan Aluminium AC4B

Paduan AC4B sebagai bahan utama dalam pembuatan *cylinder head* merupakan paduan aluminium berdasarkan standar JIS (*Japan Industrial Standard*) H5202. Tabel 2.6 merupakan gambaran komposisi kimia dari paduan aluminium AC4B berdasarkan standar JIS.

**Tabel 2.6** Komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan *Japan Industrial Standard*<sup>[17]</sup>

Simbol	Komposisi Kimia (wt %)											Al
	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	
AC1B	4.2-5.0	0.3 max	0.15-0.35	0.1 max	0.35 max	0.1 max	0.05 max	0.05-0.35	0.05 max	0.05 max	0.05 max	sisa
AC2A	3.0-4.5	4.0-6.0	0.25 max	0.55 max	0.8 max	0.55 max	0.3 max	0.20 max	0.15 max	0.05 max	0.15 max	sisa
AC2B	2.0-4.0	5.0-7.0	0.50 max	1.0 max	1.0 max	0.5 max	0.35 max	0.20 max	0.20 max	0.1 max	0.20 max	sisa
AC3A	0.25 max	Okt-13	0.15 max	0.30 max	0.8 max	0.35 max	0.1 max	0.20 max	0.1 max	0.1 max	0.15 max	sisa
AC4A	0.25 max	8.0-10	0.3-0.6	0.25 max	0.55 max	0.3-6.0	0.1 max	0.20 max	0.1 max	0.05 max	0.15 max	sisa
AC4B	2.0-4.0	7.0-10	0.5 max	1.0 max	1.0 max	0.5 max	0.35 max	0.20 max	0.20 max	0.1 max	0.20 max	sisa
AC4C	0.2 max	6.5-7.5	0.2-0.4	0.3 max	0.5 max	0.6 max	0.05 max	0.20 max	0.05 max	0.05 max	-	sisa
AC4D	1.0-1.5	4.5-5.5	0.4-0.6	0.5 max	0.6 max	0.5 max	0.3 max	0.2 max	0.1 max	0.1 max	-	sisa
AC5A	3.5-4.5	0.7 max	1.2-1.8	0.1 max	0.7 max	0.6 max	1.7-2.3	0.2 max	0.05 max	0.05 max	0.20 max	sisa
AC7A	0.1 max	0.2 max	3.5-5.5	0.15 max	0.3 max	0.6 max	0.05 max	0.20 max	0.05 max	0.05 max	0.15 max	sisa
AC8A	0.8 - 1.3	11.0-13.0	0.7-1.3	0.15 max	0.8 max	0.15 max	0.8-1.5	0.20 max	0.05 max	0.05 max	0.1 max	sisa
AC8B	2.0-4.0	8.5-10.5	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	0.1-1.0	0.20 max	0.1 max	0.1 max	0.1 max	sisa
AC8C	2.0-4.0	8.5-10.5	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	0.5 max	0.20 max	0.1 max	0.1 max	0.1 max	sisa
AC9A	0.5-1.5	22-24	0.5-1.5	0.2 max	0.8 max	0.5 max	0.5-1.5	0.20 max	0.1 max	0.1 max	0.1 max	sisa
AC9B	0.5-1.5	0.50-1.5	0.5-1.5	0.2 max	0.8 max	0.5 max	0.5-1.5	0.20 max	0.1 max	0.1 max	0.1 max	sisa

Standar JIS H5202 ini setara dengan standar AA (*Aluminum Association*) pada paduan aluminium tuang 333.0. Tabel 2.7 merupakan gambaran komposisi kimia paduan aluminium tuang berdasarkan standar AA.

**Tabel 2.7** Komposisi kimia paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar *Aluminum Association*<sup>[18]</sup>

Komposisi Kimia (wt %)									
Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Lain-lain	Al
3.0-4.0	8.0-10	0.05-0.5	1 max	1 max	0.5 max	0.5 max	0.25 max	0.5	sisa

Kelebihan dari paduan aluminium tuang AC4B adalah kekuatan dan kekerasan yang baik, sifat mampu cor (*castability*) juga baik, sifat mampu las

yang baik dan dapat dilakukan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanisnya<sup>[1]</sup>. Karakteristik yang dimiliki oleh paduan aluminium AC4B hasil pengecoran (*as-cast*) diperlihatkan pada Tabel 2.8.

**Tabel 2.8** Karakteristik yang dimiliki paduan aluminium AC4B<sup>[19]</sup>

Karakteristik	Nilai
Kekuatan tarik	$\geq 193$ MPa
Kekerasan	65-100 HB
Modulus elastisitas	73000 MPa
Modulus geser	27400 MPa
Kekuatan geser	119 MPa
Titik lebur	516-585 °C
Konduktivitas panas	105 W/m-K
Difusi panas	389 J/g

### 2.3.3 Pengaruh Unsur dalam Paduan Aluminium Tuang

Unsur lain dalam paduan aluminium tuang akan memberikan pengaruh terhadap karakteristik paduan. Unsur ini dapat sengaja ditambahkan ataupun telah ada dengan sendirinya dalam paduan aluminium ini. Pengaruh unsur lain ini ada yang menguntungkan tetapi juga ada yang merugikan.

Unsur paduan ditambahkan dengan tujuan untuk meningkatkan sifat mekanis seperti kekuatan, keuletan, mampu permesinan dan sifat-sifat lainnya sesuai dengan kebutuhan. Unsur paduan yang sering digunakan adalah silikon yang menghasilkan paduan Al-Si. Unsur paduan lain yang juga dapat digunakan yaitu magnesium, besi, tembaga, seng dan mangan. Keseluruhan unsur tadi memiliki keterbatasan kadar dalam pemakaiannya, karena jika terlalu banyak justru akan mengganggu sifat utama dari aluminium.

#### 1. Silikon (Si)

Silikon adalah unsur yang paling sering ditemui pada paduan aluminium karena dapat memperbaiki karakteristik coran. Silikon pada paduan Al-Si (terutama pada kadar 5-13% Si) meningkatkan fluiditas dan ketahanan terhadap retak panas, meningkatkan kekuatan dan kekerasan serta menurunkan berat jenis.

Apabila kadar Si >12 % maka akan terbentuk kristal silikon primer yang bersifat keras, memiliki ekspansi termal yang rendah dan ketahanan ausnya baik. Akan tetapi sifat mampu permesinannya kurang baik. Berdasarkan standar JIS, kandungan silikon dapat mencapai 5-14 % dan untuk paduan aluminium AC4B sendiri sekitar 7-10 %<sup>[17]</sup>.

## 2. Tembaga (Cu)

Kandungan tembaga pada paduan aluminium AC4B berkisar 2-4 %. Unsur tembaga sebagai paduan akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam saat *as - cast* dan saat dilakukan perlakuan panas dengan membentuk fasa kedua  $Al_2Cu$ . Namun unsur ini dapat mengurangi ketahanan terhadap *hot tear* (retak panas), fluiditas dan ketahanan korosi<sup>[20]</sup>.

## 3. Besi (Fe)

Unsur besi merupakan pengotor yang sering ditemukan di aluminium<sup>[13]</sup>. Besi merupakan elemen paduan pada aluminium yang dapat meningkatkan ketahanan *hot-tear* dan menurunkan kecenderungan terjadinya efek penyambungan (*soldering*) dengan cetakan pada *die-casting*. Kelarutan besi dalam aluminium pada fasa padat sangat rendah (~0.04%), dan kebanyakan keberadaan besi dalam aluminium yang melebihi jumlah tersebut berupa fasa intermetalik kedua yang berkombinasi dengan aluminium dan unsur lainnya. Besi bereaksi membentuk fasa-fasa tidak terlarut (*insoluble*) dalam leburan paduan aluminium, yang umumnya berupa  $FeAl_3$ ,  $FeMnAl_6$ , dan  $AlFeSi$ . Adanya kadar besi pada paduan yang berlebihan akan membentuk kristal  $FeSiAl_5$  akan menurunkan sifat keuletan dan ketahanan korosi paduan Al-Si dan mengakibatkan struktur butir yang kasar<sup>[16]</sup>.

## 4. Magnesium (Mg)

Paduan magnesium berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan, terutama jika dilakukan perlakuan panas karena terbentuk fasa  $Mg_2Si$ . Fasa ini akan terbentuk pada paduan Al-Si dengan penambahan Mg dalam jumlah kecil (optimal pada 0.7 wt % Mg). Pada paduan AC4B, kandungan magnesium dijaga agar tidak melebihi 0.5 %. Pengaruh Mg lainnya antara lain meningkatkan ketahanan korosi akan tetapi Mg berpengaruh buruk menurunkan sifat mampu cor (*castability*)<sup>[12]</sup>.

#### 5. Seng (Zn)

Penambahan seng (Zn) tidak memiliki pengaruh yang signifikan bila hanya ditambahkan ke dalam paduan Al-Si. Akan tetapi bila dipadukan bersama dengan tembaga (Cu) dan/atau magnesium maka akan menghasilkan komposisi *heat-treatable* yang berpengaruh meningkatkan kekerasan dan kekuatan karena membentuk presipitat  $MgZn_2$ ,  $CuAl_2$ . Akan tetapi pengaruh buruk penambahan Zn ini dapat meningkatkan kegetasan dan menurunkan ketangguhan. Kandungan seng dalam paduan AC4B dibatasi hingga 0.1 %<sup>[17]</sup>.

#### 6. Mangan (Mn)

Mangan biasanya dianggap sebagai pengotor dalam komposisi coran, sehingga harus dikendalikan agar tetap rendah dalam proses *gravity casting*. Tanpa melakukan *work hardening*, mangan tidak memberikan efek yang signifikan pada coran paduan aluminium. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa fraksi volume yang tinggi dari  $MnAl_6$  pada paduan aluminium yang mengandung lebih dari 0.5 % Mn akan memiliki pengaruh yang menguntungkan pada mutu internal dari coran<sup>[16]</sup>.

#### 7. Nikel (Ni)

Nikel pada umumnya digunakan bersamaan dengan unsur tembaga untuk meningkatkan sifat paduan aluminium tuang pada temperatur tinggi. Selain itu, penambahan nikel bersamaan dengan tembaga juga dapat mengurangi koefisien ekspansi panas<sup>[21]</sup>.

#### 8. Kromium (Cr)

Kromium memiliki laju difusi yang rendah dan membuat fasa halus yang terdispersi pada produk tempa. Fasa terdispersi ini mencegah nukleasi dan pertumbuhan butir. Kromium digunakan untuk mengontrol struktur butir, untuk menjaga pertumbuhan butir pada paduan aluminium-magnesium-zinc selama proses *hot working* atau *heat treatment*<sup>[21]</sup>.

#### 9. Titanium (Ti)

Titanium merupakan unsur minor pada paduan AC4B. Kelarutan Titanium dalam paduan AC4B dibatasi sampai 0.2 %<sup>[17]</sup>. Titanium digunakan sebagai penghalus butir (*grain refiner*) pada paduan aluminium.

## 10. Boron (B)

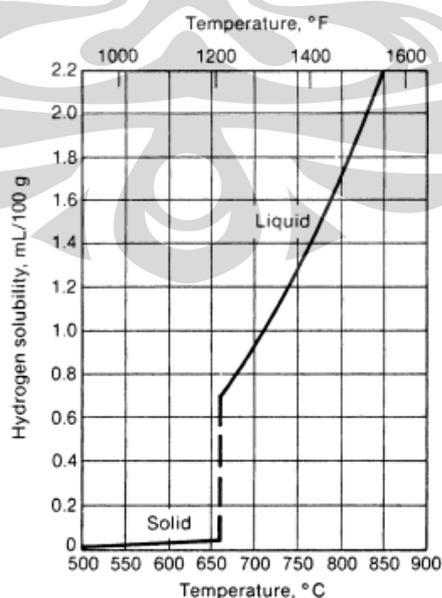
Boron digunakan pada aluminium dan paduannya sebagai *grain refiner* dan untuk meningkatkan konduktivitas dengan pengendapan vanadium, titanium, chromium dan molybdenum. Boron dapat digunakan sendiri (pada level 0,005% - 0,1%) sebagai *grain refiner* selama proses solidifikasi, namun menjadi lebih efektif saat digunakan dengan titanium berlebih<sup>[21]</sup>.

## 11. Stronsium (Sr)

Stronsium digunakan sebagai unsur yang memodifikasi kristal silikon eutektik. Modifikasi yang efektif akan didapatkan dengan penambahan Sr pada kadar yang rendah<sup>[16]</sup>.

## 12. Hidrogen (H)

Aluminium dan paduannya sangat rentan terhadap absorpsi hidrogen dalam kondisi cair. Hidrogen merupakan satu-satunya gas yang memiliki kelarutan yang cukup besar pada aluminium cair dan paduannya. Kehadiran hidrogen dalam aluminium cair akan menimbulkan masalah yang mengarah pada terjadinya cacat porositas pada hasil coran. Gambar 2.5 menunjukkan kelarutan hidrogen pada aluminium. Penyerapan hidrogen pada aluminium cair pada saat terjadi kontak antara permukaan aluminium cair dengan uap air pada atmosfer sehingga air tereduksi dan menghasilkan hidrogen seperti digambarkan persamaan 2.2<sup>[12]</sup>.



Gambar 2.5 Grafik kelarutan hidrogen pada aluminium<sup>[1]</sup>

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa kelarutan gas hidrogen akan meningkat secara eksponensial seiring dengan kenaikan temperatur. Selama pendinginan aluminium cair, hidrogen terlarut yang memiliki kelarutan rendah pada keadaan padat, akan mengendap dalam bentuk molekul, sehingga mengakibatkan pembentukan porositas<sup>[22]</sup>. Upaya pengendalian hidrogen dalam aluminium cair dapat dilakukan dengan beberapa cara misalnya dengan meminimalisasi sumber hidrogen yang masuk ke aluminium cair seperti dari bahan material yang mengandung uap air, melakukan proses *fluxing* dengan optimal (seluruh permukaan aluminium cair dapat terlindungi dari kontak dengan atmosfer), serta dengan melakukan proses *degassing* yang baik untuk menghilangkan hidrogen terlarut dalam aluminium cair<sup>[22]</sup>.

Proses *degassing* dilakukan dengan memasukan senyawa kimia kering yang akan terurai dan mampu mengikat serta mengangkat hidrogen keluar dari aluminium cair. Mekanisme pengikatan serta pengangkatan hidrogen ini menggunakan prinsip difusi tekanan parsial. Senyawa kimia yang digunakan biasanya mengandung nitrogen, argon, klorin atau freon, serta senyawa heksakloroetana. Senyawa kimia ini ada dalam bentuk gas ataupun tablet<sup>[22]</sup>.

#### 2.4 KEAUSAN PADUAN ALUMINIUM AC4B

Ketahanan aus yang baik merupakan salah satu sifat yang harus dimiliki oleh paduan aluminium AC4B mengingat penggunaannya pada salah satu komponen sepeda motor, sebagai contoh adalah *cylinder head* yang diaplikasikan pada temperatur yang cukup tinggi dan banyaknya gesekan yang terjadi di dalamnya<sup>[7]</sup>. Ketahanan aus pada paduan ini tidak hanya bergantung pada sifat dasar (asli) dari material itu saja, tetapi juga bergantung pada beberapa faktor di bawah ini<sup>[26]</sup> :

1. Temperatur operasi yang digunakan.
2. Ada atau tidaknya penggunaan pelumas.
3. Kemampuan abrasi.
4. Bentuk kekasaran permukaan.
5. Adanya gesekan (*friction*).
6. Lingkungan sekitar (*environments*).

7. Beban yang digunakan (*load*).
8. Jarak luncur (*sliding distance*).
9. Sifat dari material itu sendiri.

Kalau faktor-faktor di atas tidak diperhatikan maka menurut Tichvinsky<sup>[23]</sup> hasil penelitian keausan yang diperoleh mungkin menjadi keliru, untuk lebih jelasnya diberikan contoh seperti berikut :

Material A memperlihatkan sifat lebih tahan aus dari material B pada kondisi keausan tanpa pelumasan (kering). Tetapi jika pada kondisi ada pelumasan, material A mempunyai sifat kurang tahan aus dari material B, karena material A mempunyai sifat yang jelek pada pembentukan lapisan film. Oleh sebab itu, untuk melihat sifat keausan dari paduan aluminium AC4B harus diperhatikan tingkah laku (*behavior*) dari material yang dihubungkan dengan faktor-faktor yang telah disebutkan di atas.

#### **2.4.1 Definisi dan Penggolongan Keausan Logam**

Definisi keausan adalah gejala pada permukaan yang terjadi oleh adanya pemindahan dan pelepasan materi atau kerusakan secara bertahap (sedikit demi sedikit) yang dihasilkan saat dua material bergesekan dan bergerak relatif terhadap benda lainnya<sup>[26]</sup>. Ada pendapat lain yang mendefinisikan keausan sebagai adanya bagian yang hilang dari permukaan yang padat disebabkan adanya hasil dari aksi mekanis<sup>[24]</sup>. Kerusakan yang terjadi dapat berupa aksi potong (*cutting*), koyakan dalam (*tearing in depth*), atau deformasi yang berulang-ulang sehingga menyebabkan lapisan permukaan menjadi rapuh<sup>[25]</sup>.

Penelitian yang modern menetapkan bahwa ada empat bentuk utama keausan yang terjadi pada logam. Secara sederhana Burwell<sup>[25]</sup> menggolongkan faktor penyebab utama mekanisme keausan, yaitu :

1. Keausan Adesif

Adalah keausan yang terjadi pada dua permukaan logam yang saling kontak sehingga terjadi pelekatan. Dengan adanya pergerakan relatif menyebabkan bagian yang lunak yang terletak dekat dengan daerah sambungan menjadi lepas.

## 2. Keausan Abrasif

Keausan yang didefinisikan sebagai penghilangan bagian material dari permukaan logam oleh aksi mekanik dari partikel abrasif yang kontak dengan permukaan. Hasil yang didapatkan berupa guratan celah atau gundukan.

## 3. Keausan Korosif

Keausan ini terjadi pada logam yang bergesekan yang disebabkan adanya reaksi dengan lingkungan, dan dengan adanya kenaikan temperatur ini akan mempercepat terjadinya keausan korosif ini.

## 4. Keausan Lelah Permukaan (*fatigue*)

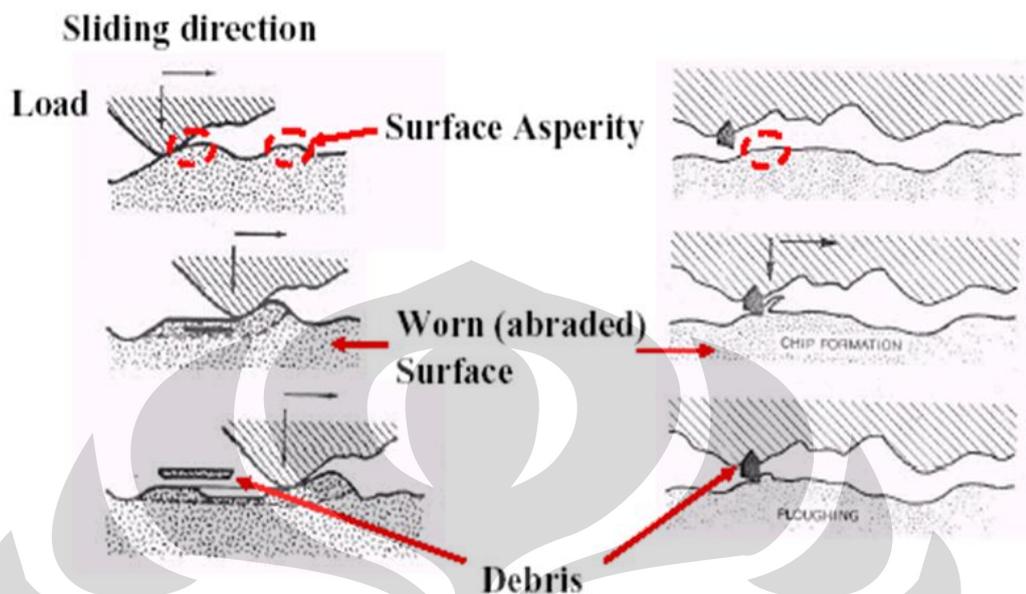
Bentuk keausan ini terjadi selama luncuran atau *rolling* yang berulang-ulang atas permukaan padat.

### 2.4.2 Mekanisme Keausan Adesif

Terjadinya gaya tarik menarik antara atom disebabkan oleh adanya dua permukaan padatan yang saling kontak, gaya tarik menarik tersebut menimbulkan pelekatan pada jarak kontak. Karena adanya pergerakan relatif, maka akan terjadi perpatahan pada daerah yang lemah. Selanjutnya pada bagian yang patah tersebut akan ada permukaan yang lebih luas. Dengan adanya gerakan lanjut menyebabkan bagian yang menempel pada permukaan yang lebih keras akan terpotong-potong oleh puncak-puncak kekerasan disekitarnya, sehingga menghasilkan serpihan yang disebut “*debris*” keausan. Serpihan ini dapat mempunyai kekerasan yang lebih besar dari induknya. Serpihan inilah yang menyebabkan terjadinya keausan adesif pada logam induknya.

Adesi ditunjukkan secara jelas pada sistem peluncuran di mana, sebagai contoh sebuah *shaft* (tangkai) dicengkram oleh *bearing*, adesi melibatkan *galling* dan pelecetan (*scuffing*) (beberapa peneliti mengklasifikasikan sebagai kerusakan permukaan daripada dengan keausan) tidak ada material yang hilang dari sistem. Dari contoh ini, dapat dilihat bahwa adesi bukanlah penyebab dari keausan, melainkan hanya akibat dari gesekan. Keausan terjadi saat gesekan antar permukaan dibuat untuk meluncur dan daerah yang teradesi secara lokal harus dipisahkan. Pemisahan ini mungkin terjadi dengan satu atau dua tipe kerusakan

dari benda padat, yang menghasilkan keausan dengan jarak yang sangat lebar<sup>[26]</sup>. Gambar 2.6 menunjukkan mekanisme dari keausan adesif.



Gambar 2.6 Skematis mekanisme keausan adesif<sup>[26]</sup>

### 2.4.3 Mekanisme Keausan Abrasif

Adanya permukaan kasar yang bergerak di atas permukaan yang lunak pada keausan abrasif mengakibatkan adanya material yang dipindahkan dari permukaan logam, sehingga akan timbul celah<sup>[27]</sup>. Karena sifat yang dibutuhkan untuk ketahanan aus suatu material akan tergantung pada tipe dari material ketahanan aus material lawannya, maka di bawah ini akan dijelaskan beberapa tipe dari ketahanan aus abrasif, yaitu<sup>[27]</sup>:

1. Abrasif Pahat (*Gouging Abrasion*)

Keausan jenis ini terjadi akibat adanya material yang kasar merusak partikel permukaan yang lebih halus, adanya impak atau benturan dari material kasar terhadap material yang lebih lunak. Jenis abrasi pahat ini dapat berupa kepingan kecil (*minute chipping*), bubutan (*turning*), dan perubahan bentuk (*deformation*).

2. Abrasive Tekanan Tinggi (*High Stress Abrasion*)

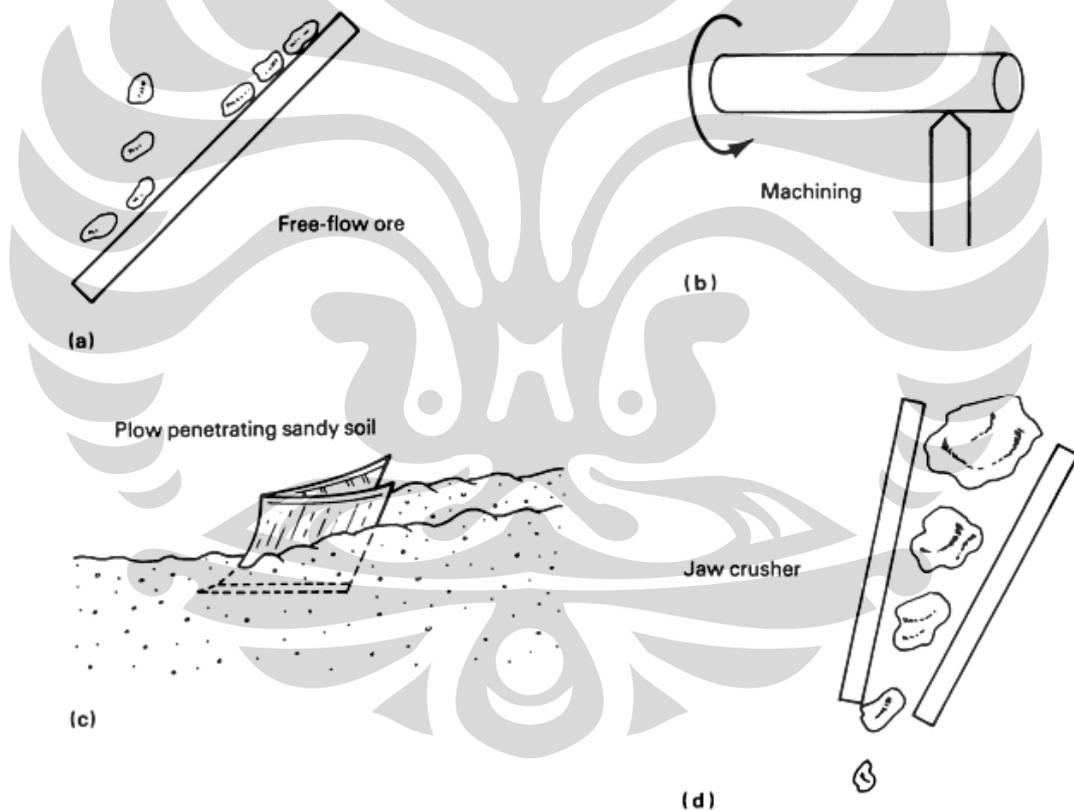
Keausan ini terjadi secara tiba-tiba saat dua permukaan sejenis yang bekerja sama untuk menghancurkan material padatan lainnya. Untuk

mendapatkan sifat ketahanan aus jenis ini, dibutuhkan jenis logam yang memiliki ketangguhan yang baik.

### 3. Abrasive Tekanan Rendah (*Low Stress Abrasion*)

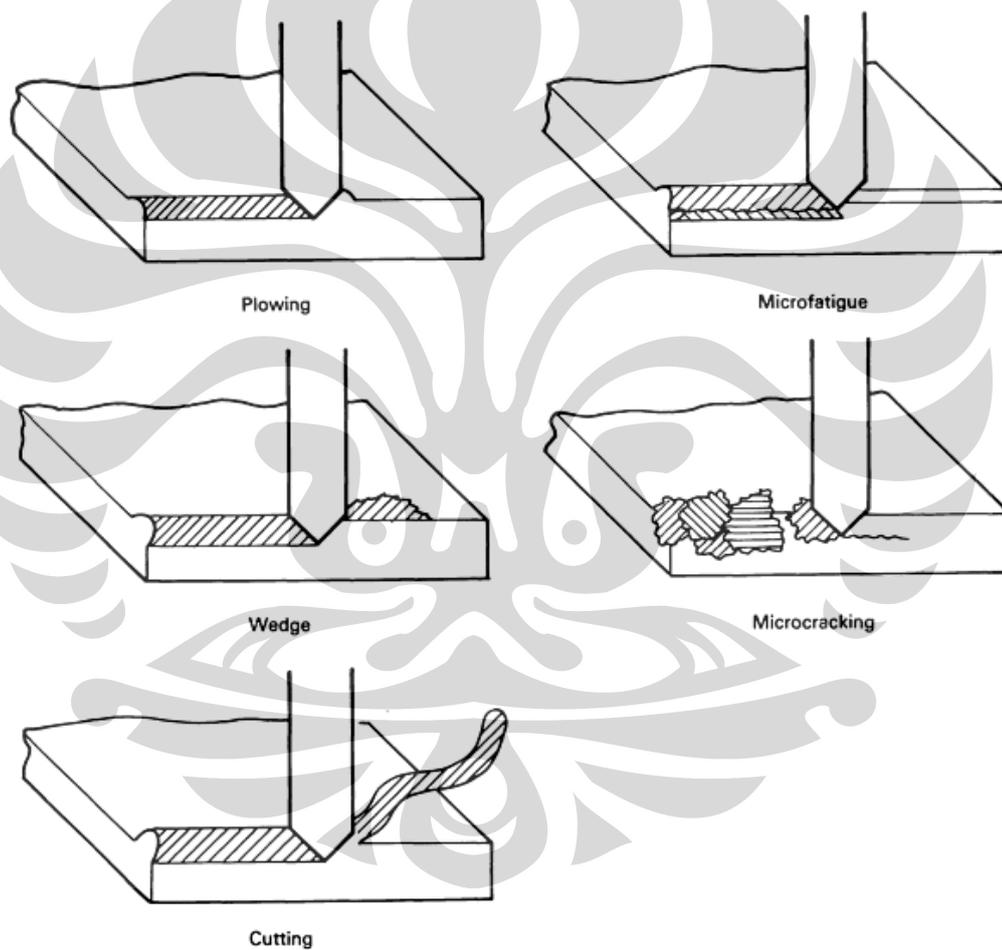
Keausan jenis ini terutama disebabkan oleh adanya material abrasif yang meluncur bebas pada permukaan material yang memiliki ketahanan terhadap abrasi yang rendah. Keausan ini juga terjadi karena adanya kondisi terkikis (erosi) yang dilakukan oleh material yang meluncur. Untuk mendapatkan sifat ketahanan aus yang baik, maka dibutuhkan material yang mempunyai ketangguhan rendah.

Gambar 2.7 dapat menggambarkan bagaimana mekanisme dari tipe-tipe keausan abrasif yang telah dijelaskan di atas.



**Gambar 2.7** Tipe gesekan selama terjadi keausan abrasif. (a) *Open two-body*. (b) *Closed two-body*. (c) *Open three-body*. (d) *Closed three-body* <sup>[26]</sup>

Beberapa mekanisme telah dikemukakan untuk menjelaskan bagaimana material terlepas dari permukaannya selama abrasi. Mekanisme ini termasuk pematahan atau peretakan (*fracture*), lelah (*fatigue*), dan peleburan (*melting*). Karena kerumitan dari abrasi ini, tidak ada satu mekanisme pun yang telah selesai dihitung besar kehilangannya. Gambar 2.8 menggambarkan beberapa proses yang mungkin terjadi saat ujung abrasi tunggal melintasi permukaan. Termasuk di dalamnya pembajakan (*plowing*), bentuk irisan (*wedge formation*), kelelahan mikro (*microfatigue*), pemotongan (*cutting*), dan keretakan mikro (*microcracking*)<sup>[26]</sup>.



**Gambar 2.8** Lima proses dari keausan abrasif<sup>[26]</sup>

#### 2.4.4 Mekanisme Keausan Korosif

Faktor tegangan dan deformasi menimbulkan terjadinya keausan abrasif dan adesif. Sedangkan adanya faktor lingkungan merupakan faktor lain yang mempengaruhi keausan korosif. Dengan demikian keausan korosif ditentukan oleh interaksi antara komponen dinamis, materi dan lingkungan<sup>[27]</sup>. Interaksi ini dapat digambarkan sebagai berikut<sup>[27]</sup> :

1. Tahap pertama, permukaan materi bereaksi dengan lingkungannya. Hasil reaksi terbentuk pada permukaan.
2. Tahap kedua, adanya aksi kerusakan pada permukaan mengakibatkan terbantuknya kembali oksida tipis hasil reaksi dengan lingkungannya. Fink<sup>[27]</sup> mengemukakan pendapat bahwa deformasi plastis menaikkan laju pembentukan oksida pada permukaan logam.

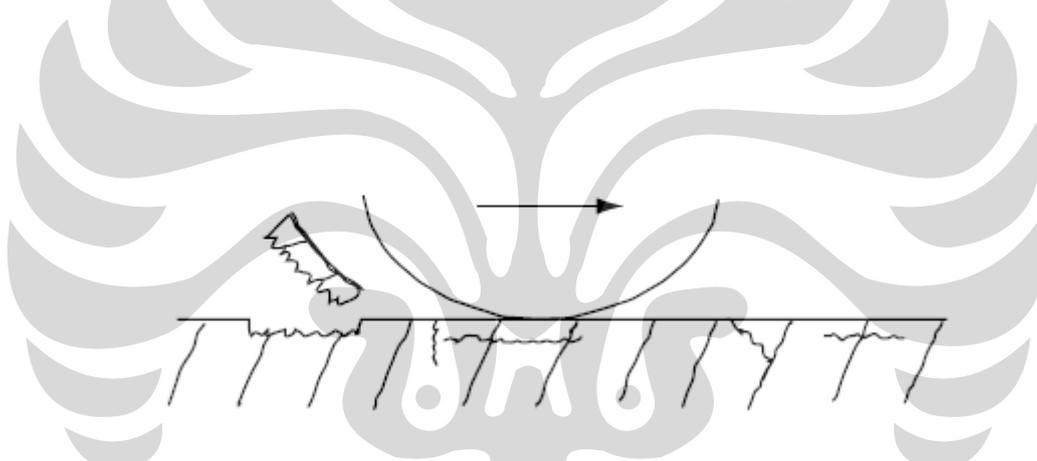
Keausan korosif dapat terjadi pada material yang bekerja pada daerah korosif dan adanya beban dinamis yang diberikan dalam jangka waktu tertentu. Gambar 2.9 menunjukkan permukaan piston yang terbuat dari aluminum yang terkena dampak dari adanya keausan korosif. Hal ini dapat terjadi karena piston bekerja secara terus menerus dalam jangka waktu tertentu, dan di dalam piston terdapat banyak gesekan yang terjadi dan juga daerah tempat piston bekerja juga memungkinkan terjadinya korosi.



**Gambar 2.9** Permukaan piston yang rusak akibat terjadinya keausan korosif<sup>[31]</sup>.

#### 2.4.5 Mekanisme Keausan Lelah Permukaan

Bentuk keausan ini dihubungkan dengan gejala *fatigue* atau lelah pada bahan akibat adanya hubungan timbal balik antara tegangan dalam daerah kontak dan jumlah waktu untuk menghasilkan kerusakan<sup>[25]</sup>. Adanya retak-retak pada permukaan atau sub-permukaan merupakan daerah konsentrasi tegangan dan memiliki kecenderungan untuk mengalami lelah atau *fatigue* saat mengalami pembebanan berulang-ulang, sehingga menyebabkan terjadinya perambatan retak. Fragmen keausan akan terjadi saat retak saling berhubungan satu sama lain<sup>[25]</sup>. Menurut teori Af Joffe<sup>[25]</sup>, adanya jaringan retakan mikro pada permukaan padat yang dihasilkan selama pembentukan lapisan-lapisan permukaan akan mengurangi kekerasan, sehingga mempermudah terjadinya keausan. Gambar 2.10 menggambarkan mekanisme dari terjadinya keausan lelah permukaan.



**Gambar 2.10** Keausan lelah permukaan dengan permulaan retak dan perambatan retak<sup>[28]</sup>.

#### 2.4.6 Faktor yang Memengaruhi Keausan Logam

Faktor-faktor yang memengaruhi keausan logam dapat dibagi atas dua bagian besar, yaitu<sup>[26]</sup> :

1. Faktor Dalam

Yaitu faktor-faktor yang dipunyai oleh material atau bahan itu sendiri, seperti komposisi kimia, sifat fisik atau mekanik, dan struktur mikro.

2. Faktor Luar

Seperti kondisi lingkungan, kekasaran permukaan awal, kecepatan gesekan, dan pembebanan.

## Gesekan

Pengertian gesekan menurut tribologi adalah suatu bidang mencakup kimia permukaan, ilmu bahan, dan mekanik. Pada dasarnya gesekan dan keausan sama-sama dimulai dari satu titik kontak yang terlokalisasi, yaitu daerah yang memiliki kekasaran<sup>[25]</sup>. Pada kontak yang terkonsentrasi tinggi inilah dapat menyebabkan perpatahan, pergeseran, atau aliran massa. Pecahan-pecahan bahan dapat lepas dari permukaan logam, disebut sebagai “*debris*” keausan. Mekanisme proses terjadinya keausan sangat rumit, dan dapat terjadi oleh satu atau lebih mekanisme mana yang tergantung pada gaya-gaya yang bekerja di permukaan kontak, atau juga pengaruh dari lingkungan<sup>[25]</sup>. Akibat dari gesekan adalah terlepasnya sejumlah fragmen dari materi yang saling bergesekan dan dapat menghasilkan panas yang akan merubah sifat permukaan.

### Temperatur Bidang Luncur

Bila dua permukaan bergerak secara relatif maka akan menghasilkan panas. Panas tersebut merupakan hasil deformasi pada permukaan material berupa pembentukan dan perpatahan sambungan antar permukaan kontak. Temperatur akan menyebabkan pelunakan dan pelelehan setempat<sup>[25]</sup>. Aliran panas yang dihasilkan akan merubah sifat mekanis lapisan tipis permukaan. Jumlah panas yang dihasilkan sebagai akibat gesekan antara individu-individu kekasaran menurut Block<sup>[25]</sup> adalah seperti persamaan 2.3 :

$$Q = \frac{\dot{\nu} \cdot L \cdot V}{A_r \cdot J} \dots\dots\dots(2.3)$$

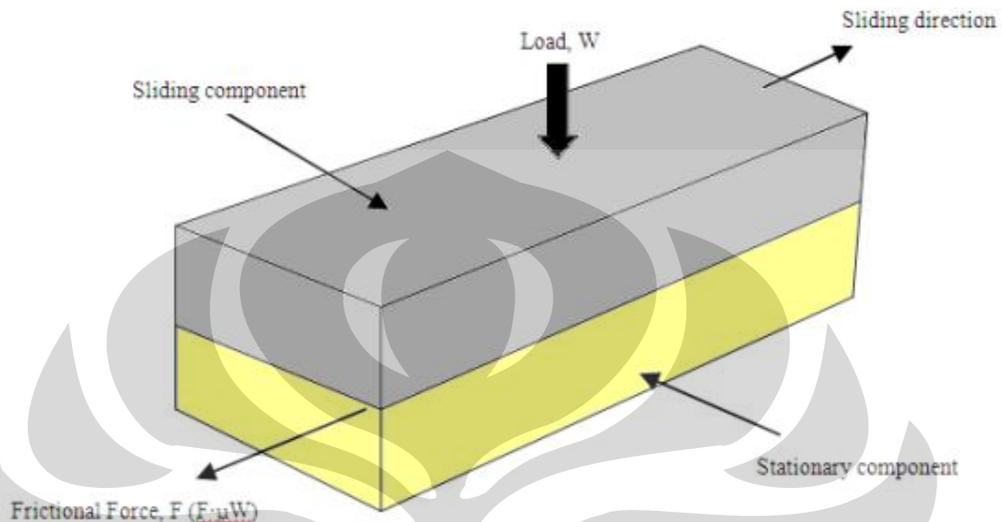
Dimana :

- Q = Panas yang dilepaskan (kalori/m<sup>3</sup>.detik)
- L = Beban (Newton)
- V = Kecepatan (m/s)
- J = Panas Ekuivalen
- A<sub>r</sub> = Luas daerah kontak yang sebenarnya (m<sup>2</sup>)

Pengukuran panas yang terjadi selama peluncuran sangat sulit, karena banyak faktor-faktor yang mempengaruhinya, seperti konduktivitas materi yang bergesekan, dimensi bahan baku, dan juga akibat kontak yang sebenarnya sangat kecil sehingga sulit dideteksi. Selain itu, adanya perpindahan panas secara konveksi ke lingkungan juga merupakan faktor yang mempengaruhi dalam pengukuran temperatur<sup>[25]</sup>.

## Koefisien Gesek

Bila dua permukaan saling bergesekan, akan ada gaya gesek, yaitu gaya perlawanan relatif material satu sama lain. Gambar 2.11 memperlihatkan secara skematis gesekan antara dua permukaan.



Gambar 2.11 Gesekan antara dua permukaan<sup>[27]</sup>

Bila gaya gesek sebanding dengan jumlah daerah kontak sebenarnya, maka gaya gesek dapat ditulis seperti persamaan 2.4<sup>[27]</sup> :

$$F = S \cdot Ar \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana : S = Kekuatan geser (N/m<sup>2</sup>)  
Ar = Luas daerah kontak yang sebenarnya (m<sup>2</sup>)

Daerah kontak yang sebenarnya berbanding terbalik dengan kekerasan dan berbanding lurus dengan beban normal :

$$Ar = \frac{L}{P} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana : L = Beban normal  
P = Indentasi kekerasan (kg/mm<sup>2</sup>)

Biasanya dalam skala vickers

Dengan mengkombinasikan persamaan 2.4 dan 2.5 maka akan didapat persamaan:

$$F = \frac{S \cdot \Delta L}{P} \text{ atau } \frac{S}{P} = \frac{F}{\Delta L} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :  $\frac{S}{P}$  =  $\mu$  , adalah koefisien gesek.

Jadi gaya gesek dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\mathbf{F} = \dot{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{L} \dots\dots\dots(2.7)$$

Ada dua faktor utama yang memengaruhi gesekan yang timbul antara dua permukaan yang bergerak relatif, yaitu<sup>[27]</sup> :

1. Faktor adesi pada dasar kontak
2. Faktor deformasi

Bila tidak ada interaksi antara kedua faktor tersebut, maka dapat ditulis hubungannya sebagai berikut :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{adesi}} + \mathbf{F}_{\text{deformasi}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :  $\mathbf{F}$  = total gaya gesek

### Hubungan antara Kecepatan Luncur dengan Koefisien Gesek

Perubahan harga koefisien gesek disebabkan oleh adanya peningkatan temperatur pada permukaan bahan. Perubahan koefisien gesek disebabkan oleh beberapa hal, yaitu<sup>[27]</sup> :

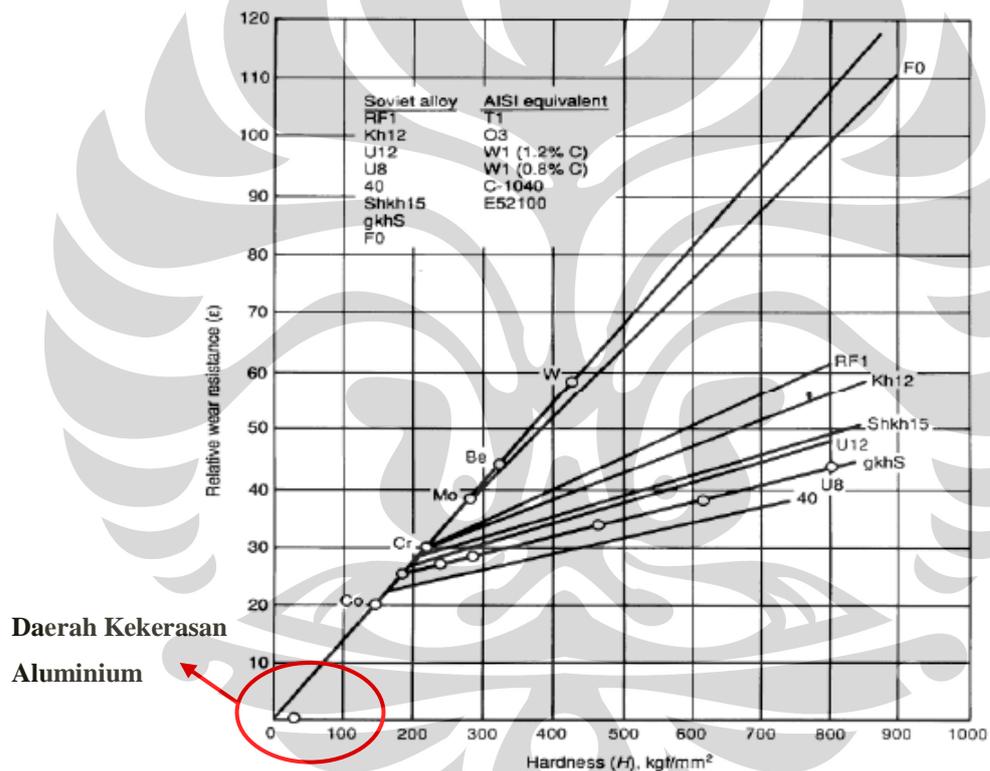
1. Pada beberapa macam logam, misalnya baja digosok oleh nikel, koefisien dapat turun dengan hebat dari kurang lebih 1 menjadi 0.5. biasanya terjadi pada jarak temperatur yang sempit. Penurunan ini disebabkan oleh terbentuknya lapisan oksida yang tipis pada permukaan bahan, pembentukan lapisan oksida menyebabkan berkurangnya kontak antar logam.
2. Pada beberapa logam, perubahan nilai koefisien gesek dapat naik atau turun tergantung dari jejak oksida yang terbentuk. Sebagai contoh senyawa oksida  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dengan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  mempunyai kemampuan pelumasan yang berbeda. Pada umumnya diamati bahwa meningkatnya koefisien gesek berlangsung pada saat mendekati titik leleh (*melting*) logam.

Naiknya nilai koefisien gesek yang seiring dengan kenaikan beban dapat dihubungkan dengan<sup>[29]</sup> :

- a. Semakin meningkatnya timbunan dari *debris* keausan yang terdiri atas pecahan dengan volume yang besar dari partikel alumida dan silida keras yang ditarik keluar dari *matrix* selama pengujian keausan pada penjepit dan *interface* piringan.
- b. Oksidasi dari permukaan yang terkena aus.

### Hubungan antara Kekerasan dengan Sifat Ketahanan Aus Abrasif

Khrushchov<sup>[26]</sup> melakukan penelitian dalam jumlah yang besar dan menemukan hubungan terbalik antara kecepatan abrasi dan kekerasan dari material murni, dalam percobaan tersebut digunakan baja sebagai variasi dari kekerasan. Kekerasan didapatkan berhubungan lurus terbalik terhadap keausan abrasif, kecuali ada lekukan berbeda dari material murninya seperti dapat kita lihat pada Gambar 2.12. Lingkaran merah menunjukkan daerah kekerasan aluminium yaitu sampai dengan nilai 100 kgf. Dengan daerah kekerasan yang rendah tersebut aluminium juga memiliki ketahanan aus yang rendah jika dibandingkan dengan material lain yang memiliki kekerasan yang lebih tinggi.



Gambar 2.12 Ketahanan aus vs kekerasan dari logam murni dan paduan<sup>[26]</sup>

Deformasi plastis yang terjadi karena gaya-gaya luar yang bekerja akan mengakibatkan penggelinciran kristal-kristal logam. Salah satu mekanisme penggelinciran (*slip*) adalah dengan cara pergerakan dislokasi. Jika ada tumpukan dislokasi yang terhambat, maka terjadi penguatan dan pengerasan<sup>[25]</sup>.

### Pengaruh Beban dan Kecepatan pada Laju Keausan

Semakin meningkatnya jumlah beban yang diberikan, maka luas kontak sebenarnya yang berinteraksi semakin besar<sup>[25]</sup>, hal ini sesuai dengan persamaan 2.5 bahwa harga luas daerah permukaan kontak berbanding lurus dengan penambahan beban. Selanjutnya, perluasan daerah kontak akan meningkatkan volume keausan adesif. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.9 <sup>[25]</sup> :

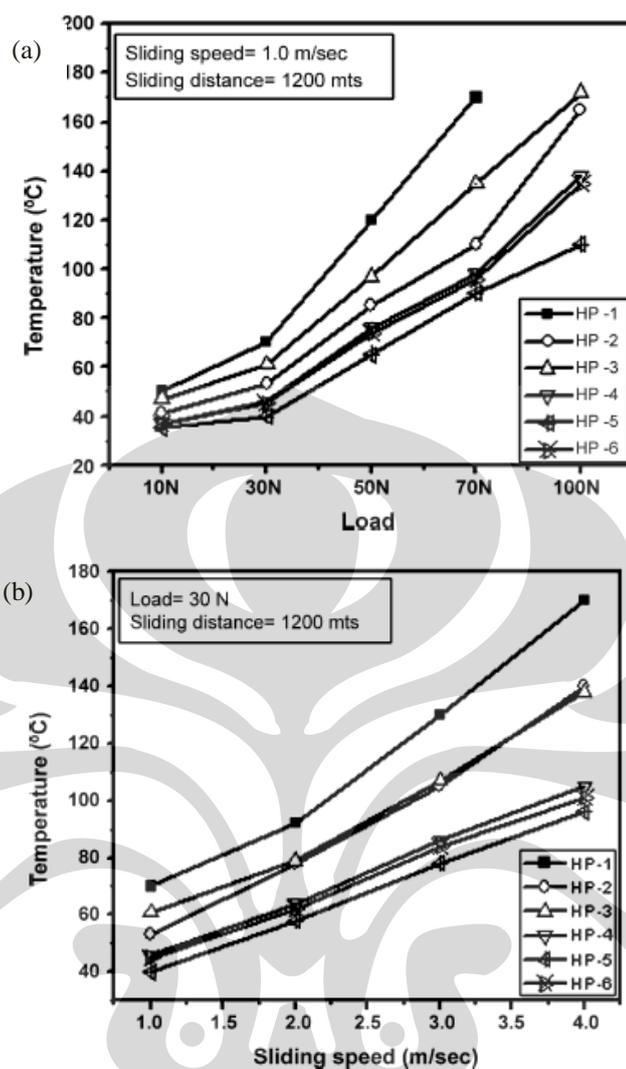
$$V = \frac{1}{3} \cdot K \cdot A \cdot X \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :     V       = Volume yang terabrasi  
               K       = Konstanta, yang merupakan fraksi dari jumlah perlekatan yang terlepas.  
               A       = Luas permukaan (m<sup>2</sup>)  
               X       = Jarak luncur (m)

Dari persamaan 2.9 tersebut, terlihat bahwa meningkatnya luas daerah kontak, volume yang hilang akibat aus akan semakin besar, karena volume keausan berbanding lurus dengan luas daerah kontak yang terbentuk selama gesekan.

#### 2.4.7 Pengaruh Ti dan Sr Terhadap Keausan Paduan Aluminium AC4B

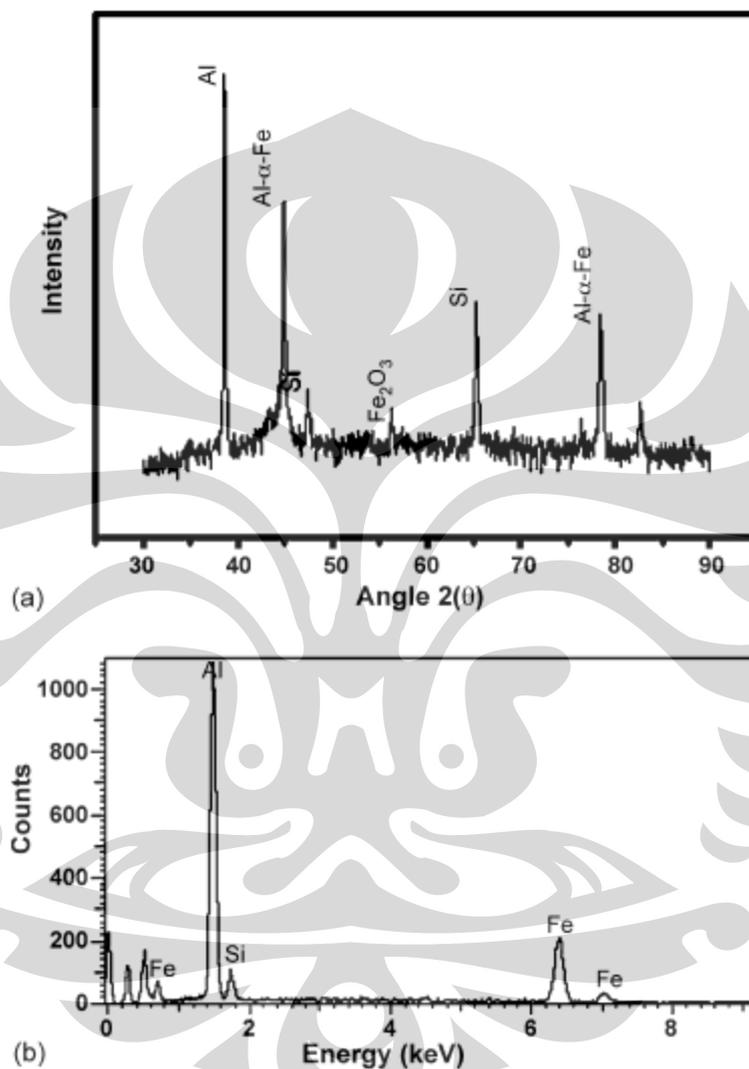
K.G. Basavakumar *et al*<sup>[29]</sup> telah melakukan penelitian tentang pengaruh dari penghalus butir dan modifikasi dari peluncuran kering terhadap perilaku keausan dari paduan Al-7Si dan Al-7Si-2.5Cu hasil tuang. Salah satu hasil dari pengujian ini menyatakan bahwa penambahan beban dan kenaikan dari kecepatan luncur dapat menaikkan temperatur permukaan bidang luncur. Gambar 2.13 menggambarkan pengaruh dari penambahan beban dan kecepatan luncur terhadap temperatur permukaan bidang luncur. Selama pengujian keausan pada beban yang tinggi, temperatur meningkat cukup besar yang membuat kekuatan dari material yang bergesekan menurun dan menyebabkan meningkatnya daerah gesekan dan koefisien gesek. Penghalus butir yang lebih kuat dan paduan yang sudah dimodifikasi mendapatkan hasil koefisien gesek yang lebih rendah. Sedangkan material yang belum dimodifikasi dan belum diberi penghalus butir kemungkinan lebih teroksidasi selama pengujian keausan pada temperatur luncur yang lebih tinggi<sup>[29]</sup>.



**Gambar 2.13** (a) Variasi dari temperatur vs beban pada kecepatan luncur yang konstan (1.0 m/s) dan jarak luncur konstan (1200 m). (b) Variasi dari temperatur vs kecepatan luncur dengan beban yang konstan (30 N) dan jarak luncur yang konstan (1200 m)<sup>[29]</sup>.

Selain itu, peningkatan kecepatan luncur juga meningkatkan temperatur permukaan bidang luncur<sup>[29]</sup>. Peningkatan temperatur di dalam batasan meningkatkan kemampuan dari *matrix* aluminium yang lembut untuk menyesuaikan atau mencocokkan diri menjadi partikel silikon fasa kedua yang keras dan rapuh. Jika temperatur naik melebihi nilai kritis yang pasti, pelembutan akibat temperatur (*thermal softening*) dari material pada daerah di bawah permukaan (*sub-surface*) akan terjadi, hal ini akan menyebabkan deformasi plastis dalam skala yang besar selama peluncuran di bawah beban eksternal<sup>[29]</sup>. Di bawah kondisi seperti itulah keausan logam (*metallic*) terjadi. Dengan peningkatan penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*), senyawa *inter-metallic* dan

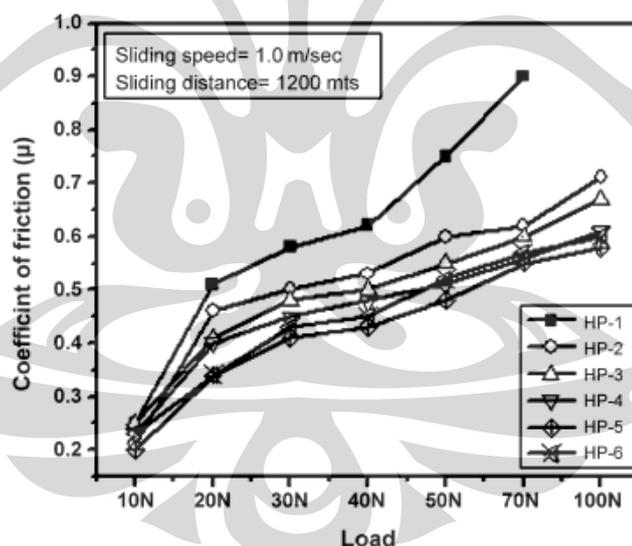
pengerasan pengendapan (*precipitation hardening*) dari hadirnya unsur paduan mungkin berhubungan dengan adanya perbandingan ketahanan aus dan kekerasan yang lebih baik pada paduan Al-7Si-2.5Cu tuang yang sudah dikombinasikan antara penghalus butir dan *modifier* jika dibandingkan dengan paduan Al-7Si yang belum diberi tambahan apapun<sup>[29]</sup>.



**Gambar 2.14** (a) Pola X-ray diffraction dari debris keausan. (b) Pola EDAX dari debris keausan<sup>[29]</sup>.

Ketahanan aus yang tinggi dari paduan Al-7Si-2.5Cu tuang hasil kombinasi dari penghalus butir dan *modifier* mungkin disebabkan oleh kehadiran pembanding senyawa *inter-metallic* yang lebih stabil pada keadaan panas dari paduan tembaga (Cu), yang menahan terutama sekali pelembutan akibat panas (*thermal softening*) pada saat kecepatan tinggi dan beban gesek. Pada saat

kecepatan luncur tinggi, yang menghasilkan temperatur *interface* yang tinggi, dapat meningkatkan pergantian kekuatan (*back transfer*) dari besi (Fe), yang mungkin berdifusi ke dalam permukaan material yang dekat dengan bidang luncur dan mengubah komposisi<sup>[29]</sup>. Gambar 2.14 akan dapat lebih menggambarkan pengaruh dari kehadiran unsur lain dalam paduan. Analisis dari *x-ray diffraction* dan EDAX *debris* keausan seperti dapat dilihat pada Gambar 2.14, secara jelas menunjukkan adanya kehadiran dari Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe, Al, dan Si. Difusi dari besi (Fe) ke dalam paduan menyebabkan terjadinya pengerasan pengendapan (*precipitation hardening*) dengan bereaksi dengan unsur paduan lainnya. Kesempatan untuk membentuk senyawa *inter-metallic* yang keras akan lebih sedikit pada paduan Al-7Si yang belum ditambah apapun karena tidak adanya unsur paduan lain<sup>[29]</sup>. Dari hasil penelitiannya, K.G. Basavakumar *et al*<sup>[29]</sup> juga mendapatkan hasil bahwa koefisien gesek mencapai nilai dengan jarak tertentu (yang diperlihatkan menyebar di data) setelah awal masa *transient*, seperti ditunjukkan pada gambar 2.15.

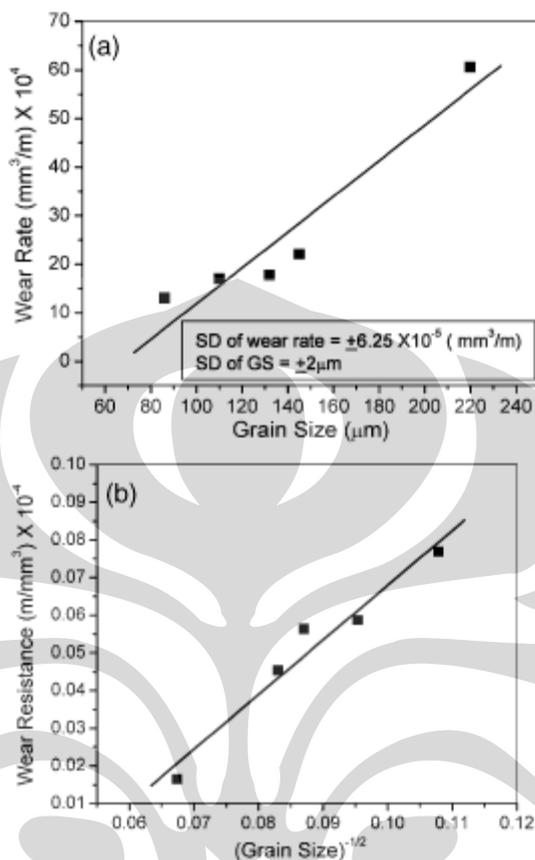


**Gambar 2.15** Variasi dari koefisien gesek vs beban pada kecepatan luncur konstan (1.0 m/s) dan jarak luncur konstan (1200 m)<sup>[29]</sup>.

Koefisien gesek meningkat dengan secara keseluruhan dengan meningkatnya beban pada kebanyakan kasus. Pada keadaan adanya penambahan penghalus butir dan *modifier* paduan Al-7Si-2.5Cu tuang, koefisien gesek yang terjadi menjadi lebih rendah pada semua variasi beban seperti terlihat pada Gambar 2.15. Peningkatan koefisien gesek secara tiba-tiba pada saat beban

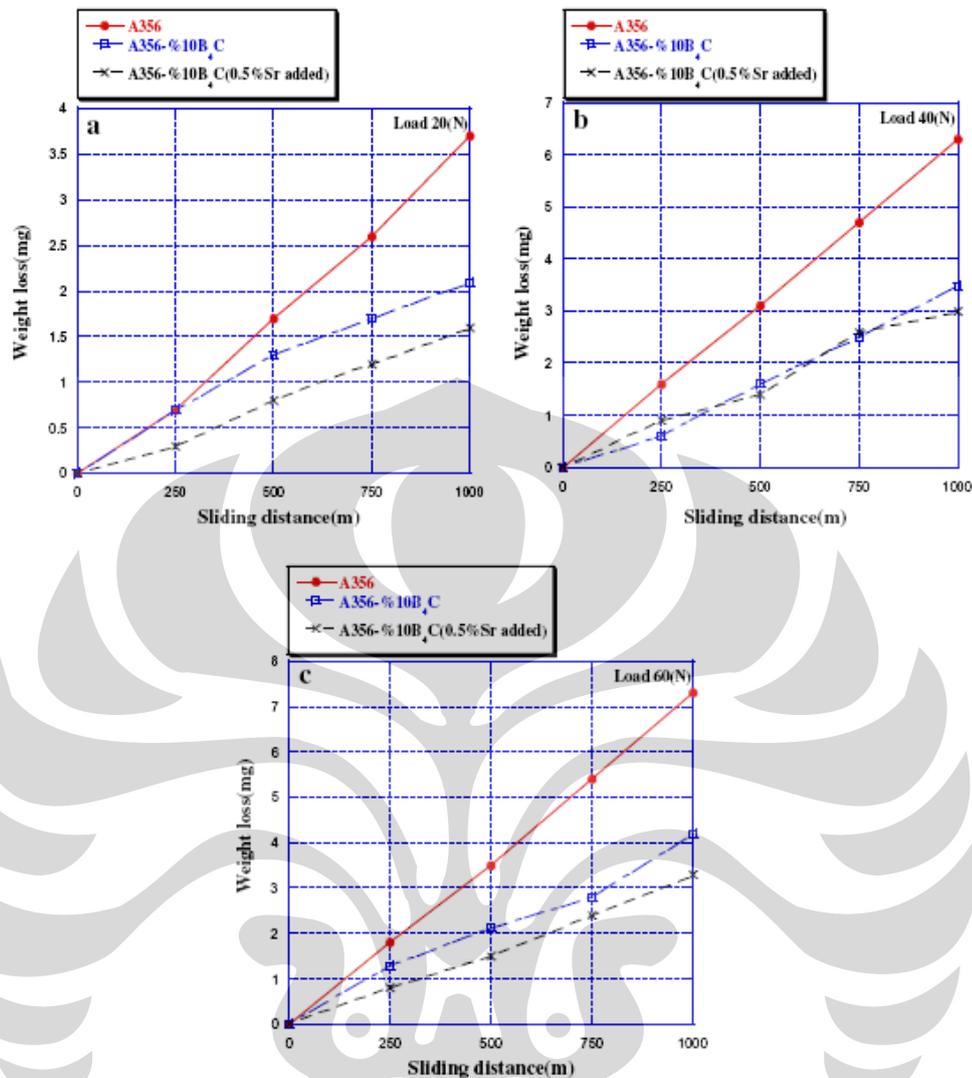
sebesar 70 N diberikan ke paduan yang belum diberikan tambahan apapun mengindikasikan adanya adesi dari penjepit (*pin*) ke permukaan bidang luncur<sup>[29]</sup>. Adesi yang terjadi begitu terlihat dari ketiadaan yang sangat mencolok pada keadaan paduan Al-7Si, yang mengalami penyerangan pada beban 70 N. pada beban sebesar ini, pergesekan panas yang dihasilkan cukup untuk menyebabkan pemanasan lokal (*localized heating*), yang akan menghasilkan pelengketan dari penjepit ke piringan (*disc*). Gaya gesek dibangun dari dua faktor utama<sup>[29]</sup> : (a) gaya yang dibutuhkan untuk menggeser bentuk bagian yang menyatu sesaat pada titik kontak antara dua permukaan yang bergesekan dan (b) gaya yang dibutuhkan untuk memutuskan atau menyerang kekasaran di atas permukaan yang lembut. Oleh karena itu, koefisien gesek yang lebih tinggi pada peluncuran pada paduan Al-7Si yang tidak diberi apapun dibandingkan dengan paduan Al-7Si-2.5Cu tuang yang telah diberi penghalus butir dan *modifier* mungkin berhubungan dengan kekerasan yang lebih rendah dan kekuatan dari paduan Al-7Si yang tidak diberi apapun disebabkan ketiadaan dari unsur paduan lainnya. Pada kecepatan luncur yang rendah, diperlukan waktu yang lebih lama untuk membentuk dan menumbuhkan pertemuan kekasaran dari daerah kontak, yang meningkatkan gaya yang dibutuhkan untuk menggeser pertemuan untuk mempertahankan gerakan relatif, oleh karena itu dapat membenarkan koefisien gesek yang tinggi pada kecepatan luncur yang rendah dibandingkan dengan kecepatan luncur yang tinggi<sup>[29]</sup>. Rao A.K. Prasada *et al*<sup>[32]</sup>, mendapatkan hasil penelitiannya dengan menambahkan penghalus butir ke dalam paduan aluminium. Gambar 2.16 (a) menunjukkan bahwa laju aus meningkat seiring dengan bertambahnya ukuran butir. Laju aus diamati bernilai maksimum pada  $6.0 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$  untuk aluminium tanpa adanya penambahan penghalus butir, yang ditunjukkan pada ukuran butir yang paling besar (220  $\mu\text{m}$ ). Pada *holding time* selama 30 menit, ukuran butir menjadi paling kecil (86  $\mu\text{m}$ ) dan nilai laju aus pun menjadi paling rendah  $1.2 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ . Gambar 2.16 (b) menunjukkan pengaruh dari ukuran butir terhadap ketahanan aus (kebalikan dari laju aus). Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa ketahanan aus hampir mengikuti garis lurus dengan  $(\text{ukuran butir})^{-1/2}$ . Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa semakin kecil ukuran butir, maka ketahanan ausnya akan menjadi semakin besar dan begitu juga sebaliknya karena

dengan berkurangnya ukuran butir maka kekerasan paduan aluminium akan semakin meningkat.



**Gambar 2.16** Pengaruh dari ukuran butir terhadap (a) Laju Aus dan (b) Ketahanan Aus dari Aluminium, penghalusan dengan menggunakan penghalus butir M51 sebanyak 0.2 wt. %<sup>[32]</sup>

H.R. Lashgari *et al.*<sup>[30]</sup> melakukan penelitian pengaruh dari stronsium terhadap mikrostruktur dan sifat keausan dari komposit A356-10%B<sub>4</sub>C hasil tuang. Didapatkan hasil yang salah satunya adalah tentang banyaknya volume material yang hilang seiring bertambahnya jarak luncur seperti dapat kita lihat pada Gambar 2.17.

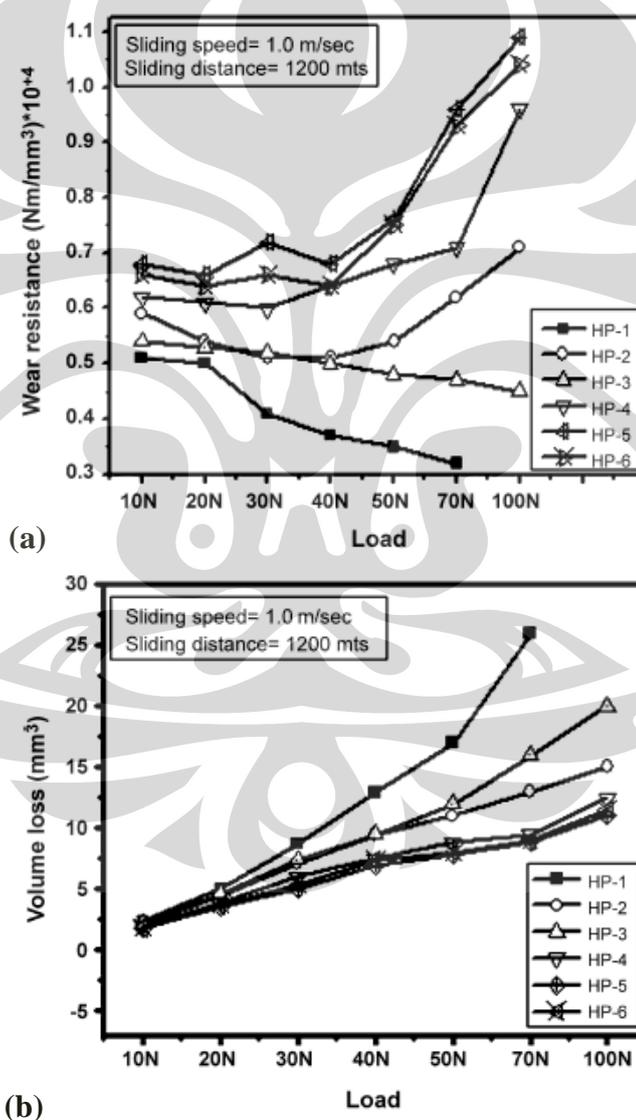


**Gambar 2.17** Variasi dari berat yang hilang sebagai fungsi dari jarak luncur untuk semua bahan percobaan di bawah beban (a) 20N, (b) 40 N, (c) 60 N<sup>[30]</sup>.

Gambar 2.17 menggambarkan variasi dari berat yang hilang sebagai fungsi dari jarak luncur untuk material A356, A356-10%B<sub>4</sub>C dan A356-10%B<sub>4</sub>C yang telah dimodifikasi dengan menambah 0.5% Sr di bawah beban 20, 40, dan 60 N. pada umumnya, penggabungan dari partikel keramik yang keras ke paduan *monolithic* akan menghasilkan peningkatan ketahanan aus dari aluminium dalam jumlah yang besar. Hasil ini menunjukkan bahwa ketahanan aus dari komposit Al-B<sub>4</sub>C meningkat dengan adanya penambahan stronsium pada penggunaan semua beban. Partikel silikon eutektik lebih rapuh dibandingkan dengan partikel keramik yang ditambahkan sebagai penguat dari komposit. Pada keadaan ini, bentuk *acicular* dari partikel silikon yang belum dimodifikasi mengindikasikan bahwa

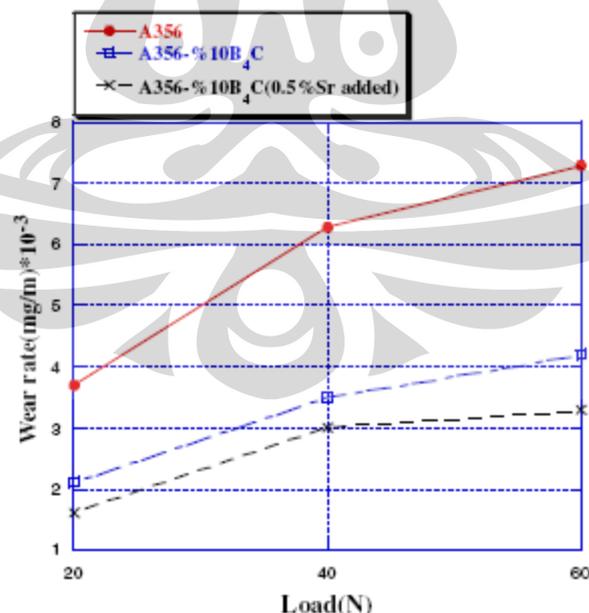
diperlukan tegangan yang lebih rendah untuk menyebabkan retakan lokal jika dibandingkan dengan partikel yang diperkuat oleh  $B_4C$ . Oleh karena itu, penghalusan partikel silikon dapat mengurangi konsentrasi tegangan yang berpengaruh pada partikel silikon dan meningkatkan sifat keausan<sup>[30]</sup>.

K. G. Basavakumar *et al*<sup>[29]</sup> juga mendapatkan hasil yang sama bahwa dengan bertambahnya beban yang diberikan maka volume material yang hilang juga akan bertambah. Dari Gambar 2.18 (a) dapat dilihat volume material yang hilang akibat terkena aus akan semakin bertambah seiring dengan bertambahnya beban yang diberikan.



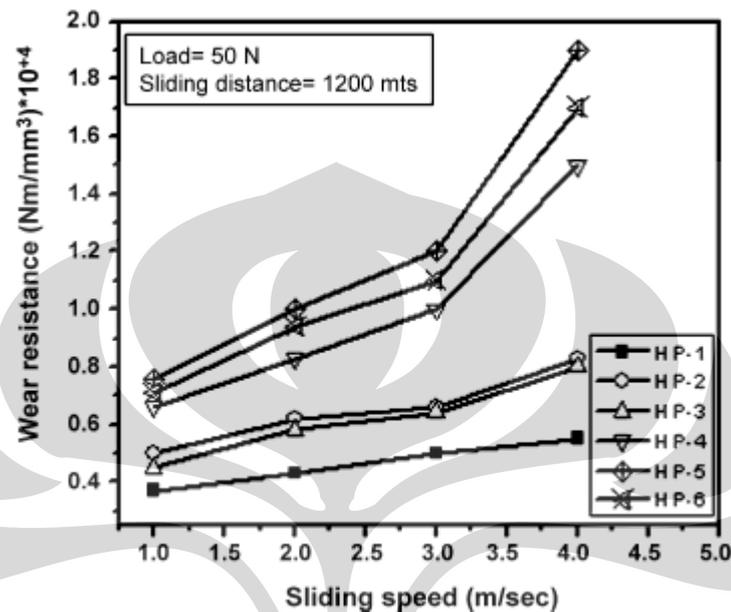
**Gambar 2.18** (a) Perbedaan dari volume yang hilang vs beban yang berbeda, (b) Variasi dari ketahanan aus vs perubahan beban pada kecepatan luncur konstan (1.0 m/s) dan jarak luncur konstan (1200 m)<sup>[29]</sup>

Pada gambar tersebut, volume material yang hilang memiliki nilai paling tinggi ( $\pm 26 \text{ mm}^3$ ) pada material HP-1 (paduan Al-7Si yang belum ditambahkan penghalus butir dan *modifier*). Volume material yang hilang dengan adanya penambahan *modifier* saja (HP-2) berada sedikit di bawah grafik material HP-1. Sedangkan dengan penambahan penghalus butir dan *modifier* secara bersamaan (HP-6), volume material yang hilang akibat terkena aus menjadi sangat kecil jika dibandingkan dengan material HP-1. Sedangkan pengaruh dari penambahan beban terhadap ketahanan aus dapat terlihat dengan jelas pada Gambar 2.18 (b), ketahanan aus lebih rendah pada material yang belum dimodifikasi dan belum diberi penghalus butir. Bagaimanapun juga, paduan tuang Al-7Si-2.5Cu yang mengandung penghalus butir atau *modifier* atau kombinasi dari keduanya menunjukkan ketahanan aus yang tinggi seiring dengan bertambahnya beban<sup>[30]</sup>. H.R. Lashgari *et al*<sup>[30]</sup> juga mendapatkan hasil perbandingan dari laju keausan dengan adanya kenaikan beban seperti dapat dilihat pada Gambar 2.19 bahwa transisi dari keausan yang berat ke keausan yang sedikit ringan, terjadi seiring dengan penambahan beban dari 40 N sampai 60 N. Ditambah lagi, laju aus dari komposit yang sudah dimodifikasi lebih rendah dibandingkan dengan yang belum dimodifikasi pada penggunaan semua beban<sup>[30]</sup>.



**Gambar 2.19** Variasi dari laju keausan pada kenaikan beban untuk semua bahan percobaan<sup>[30]</sup>

Dapat dilihat dari Gambar 2.20 bahwa ketahanan aus terlihat semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan luncur. Paduan aluminium tuang yang telah diberi penghalus butir dan *modifier* memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan aluminium yang belum dimodifikasi.

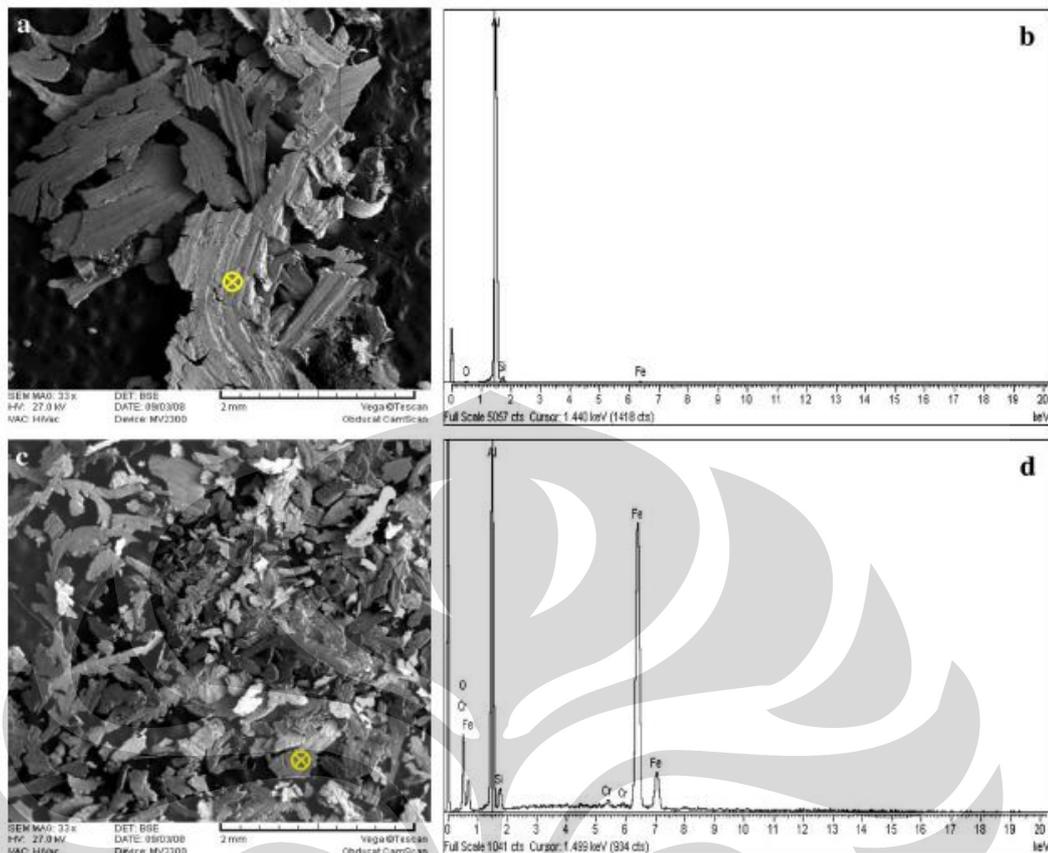


Gambar 2.20 Variasi dari ketahanan aus vs kecepatan luncur pada beban konstan (50 N) dan jarak luncur konstan (1200 m)<sup>[29]</sup>.

Hal ini dikarenakan penambahan penghalus butir (Al-1Ti-3B) dan *modifier* Sr akan mengubah butir  $\alpha$ -Al yang besar menjadi butir  $\alpha$ -Al *equiaxed* halus dan mengubah serpihan (*plates*) silikon eutektik menjadi partikel yang lebih halus serta mengubah partikel  $\text{CuAl}_2$  di daerah *interdendritic* yang akan meningkatkan sifat mekanik menjadi lebih baik sehingga akan meningkatkan ketahanan ausnya<sup>[29]</sup>.

#### Pengamatan Debris Keausan

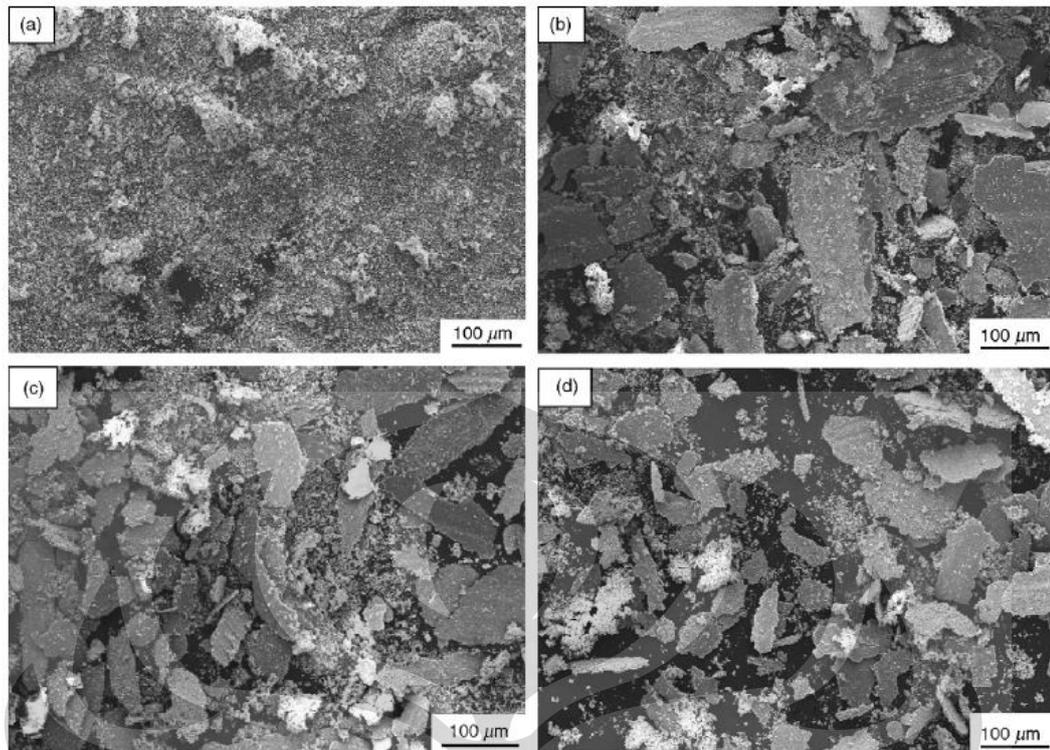
H.R Lashgari *et al*<sup>[30]</sup> menyebutkan bahwa debris keausan dapat dihasilkan oleh deformasi plastik pemotongan mikro (*microcutting*) sebagaimana ada perpindahan material dari satu permukaan ke permukaan lainnya. Bentuk dari *debris* keausan pada perbesaran yang sama dan analisis EDS untuk komposit yang telah dimodifikasi dan belum dimodifikasi yang diberikan beban sebesar 60 N dapat dilihat pada Gambar 2.21.



**Gambar 2.21** Hasil SEM dan analisis EDS dari *debris* keausan yang dihasilkan pada pengujian dengan beban 60 N; (a dan b) A356-10%B<sub>4</sub>C yang belum dimodifikasi, (c dan d) A356-10%B<sub>4</sub>C (modifikasi 0.5% Sr)<sup>[30]</sup>

Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.21, *debris* keausan menunjukkan bentuk seperti serpihan untuk kedua komposit di atas, baik yang belum dimodifikasi maupun yang sudah dimodifikasi, tetapi terlihat dengan jelas bahwa *debris* keausan pada komposit yang belum dimodifikasi memiliki ukuran yang lebih besar jika dibandingkan dengan yang telah dimodifikasi. Dapat dilihat bahwa bentuk dan ukuran dari partikel silikon memegang peranan yang sangat penting dalam menentukan ukuran dari *debris* keausan.

Ching-Yi Yang *et al*<sup>[5]</sup> menyebutkan, ada dua tipe bentuk yang ditunjukkan dari *debris* keausan pada tekanan yang berbeda pada kecepatan luncur 0.3 m/s seperti dapat dilihat pada Gambar 2.22 bahwa *debris* keausan didapat bentuk partikel yang sangat halus pada tekanan sebesar 0.25 MPa.



**Gambar 2.22** Hasil SEM *debris* keausan untuk paduan pada kecepatan luncur 0.3 m/s; (a) Paduan A357-Sr pada 0.25 MPa, (b) Paduan A35 yang belum dimodifikasi pada 2 MPa, (c) Paduan A357-Sb pada 2 MPa, (d) Paduan A357-Sr pada 2 MPa<sup>[5]</sup>

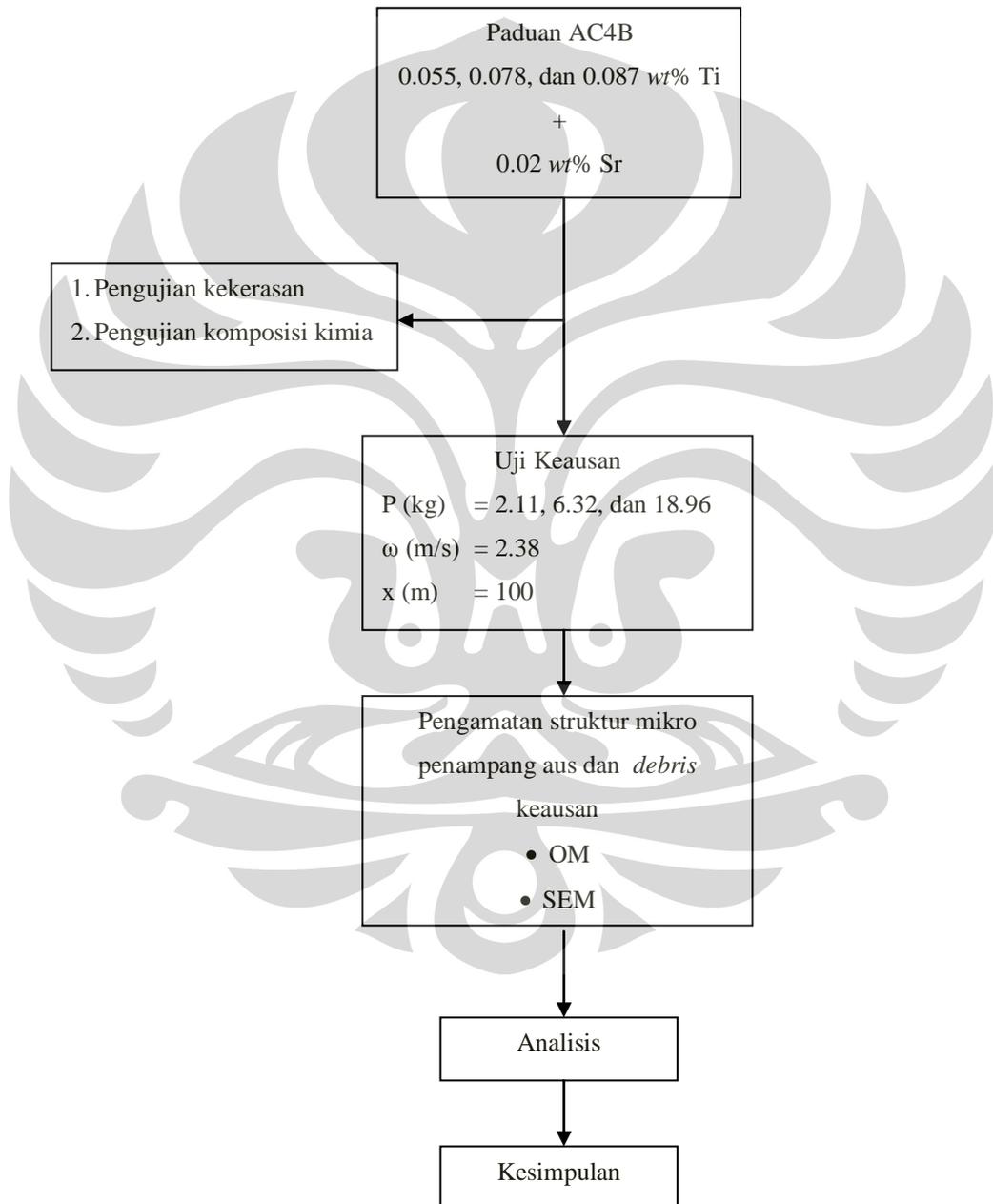
*Debris* keausan dari semua sampel juga ditemukan sama seperti yang lain pada tekanan ini. *Debris* keausan terdiri dari campuran partikel halus dan serpihan-serpihan pipih pada tekanan yang lebih tinggi. Hasil SEM dari *debris* keausan pada paduan yang belum dimodifikasi dan sudah dimodifikasi pada tekanan yang lebih tinggi pada 2 MPa seperti dapat dilihat pada Gambar 2.22 (b) dan (d). Dapat diamati bahwa partikel halus yang menggumpal dan beberapa *debris* serpihan besar terlepas dari MML (*Mechanically Mixed Layer*). Di bawah kondisi tekanan tinggi, keausan primer terjadi akibat pengelupasan dari MML dan abrasi. Juga, *debris* keausan yang berbentuk serpihan pada paduan yang belum dimodifikasi terlihat lebih kasar dan besar jika dibandingkan dengan paduan yang telah ditambahkan *modifier* Sr. Selanjutnya, ukuran *debris* dari paduan yang ditambahkan *modifier* Sb berada di antara paduan yang belum dimodifikasi dan yang telah ditambahkan *modifier* Sr.

## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti diagram alir seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

## 3.2 BAHAN DAN PERALATAN

### 3.2.1 Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan sebagai berikut :

1. Sampel paduan aluminium AC4B hasil proses LPDC dengan komposisi awal (0 wt% Sr dan 0 wt% Ti) dan dengan komposisi 0.02 wt% Sr, dan 0.055, 0.078, dan 0.087 wt% Ti.
2. Kertas amplas ukuran *mesh* 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, dan 1500.

### 3.2.2 Peralatan

Penelitian ini menggunakan peralatan :

1. Mesin uji aus Ogoshi.
2. Alat spektrometer Foundry-Master.
3. Alat uji kekerasan merek Rocky.
4. Mesin amplas merek Ecomet.
5. Mikroskop optik digital merek Olympus.
6. *Scanning Electron Microscope* LEO 420i.

## 3.3 PROSEDUR PENELITIAN

### 3.3.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode penjejakan Rockwell B. Dengan metode pengujian nilai kekerasan dapat langsung dibaca pada display dalam skala HRB. Dengan metode ini material akan di jejak dengan menggunakan indenter bola baja berdiameter 1/16 inchi dengan beban 100 kgf (ASTM E18) dengan *dwell time* selama 5 detik. Sampel untuk pengujian kekerasan ini diambil dari salah satu bagian komponen cylinder head yang telah diratakan terlebih dahulu. Penjejakan dilakukan pada lima titik berbeda yang jaraknya minimal 3d antara satu jejak dan jejak lainnya. Hasil nilai kekerasan yang didapat akan diambil nilai rata-ratanya. Gambar 3.2 menunjukkan mesin Rocky yang digunakan untuk pengujian kekerasan.



**Gambar 3.2** Mesin uji kekerasan Rocky

### 3.3.2 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan alat Optical Emission Spectrometer merk Foundry-Master. Sampel pengujian ini sebelumnya telah diratakan terlebih dahulu. Pengujian ini dilakukan pada 3 titik agar data yang diperoleh dapat mewakili komposisi kimia dari material yang diuji. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui komposisi dari aluminium AC4B hasil pengecoran apakah sesuai dengan standar atau tidak, serta untuk mengetahui kadar penambahan Sr dan AlTiB telah sesuai atau tidak. Gambar 3.3 menunjukkan mesin Foundry-Master yang digunakan untuk pengujian komposisi kimia.



**Gambar 3.3** Mesin uji komposisi kimia Foundry-Master

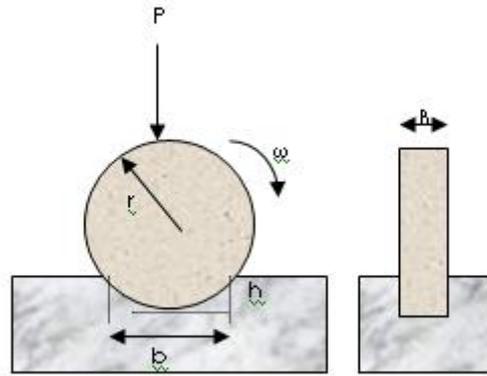
### 1.3.3 Pengujian Keausan

Pengujian keausan ini dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Metalurgi dan Material FTUI dengan menggunakan mesin uji aus Ogoshi, dimana benda uji memperoleh beban gesek dari cincin yang berputar (*Revolving disc*). Gambar 3.4 merupakan gambaran dari mesin uji aus Ogoshi.



**Gambar 3.4** Mesin uji aus Ogoshi

Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antar permukaan yang berulang-ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan benda uji. Besarnya jejak permukaan dari material tergesek itulah yang dijadikan dasar penentuan tingkat keausan pada material. Semakin besar dan dalam jejak keausan maka semakin tinggi volume material yang terlepas dari benda uji. Adapun skema pengujian keausan dengan mesin Ogoshi dapat dilihat pada Gambar 3.5 :



Gambar 3.5 Skematis pengujian keausan dengan metode Ogoshi

Dimana :

$\omega$  = kecepatan putar

B = tebal *revolving disc* (mm)

r = jari-jari *disc* (mm)

b = lebar celah material yang terabrasi (mm)

Maka dapat diturunkan rumus besarnya volume material yang terabrasi

(W) :

$$W = \frac{B b^3}{12 r} \dots\dots\dots(3.1)$$

Dimana :

W = Volume material yang terabrasi ( $\text{mm}^3$ )

B = Tebal *revolving disc* (mm)

b = Lebar celah material yang terabrasi (mm)

r = Jari-jari *disc* (mm)

Laju keausan (V) dapat ditentukan sebagai perbandingan volume terabrasi

(W) dengan jarak luncur (x) yang disetting pada mesin uji :

$$V = \frac{W}{x} = \frac{B \cdot b^3}{12 \cdot r \cdot x} \dots\dots\dots(3.2)$$

Dimana :

V = Laju Keausan ( $\text{mm}^3/\text{m}$ )

x = Jarak luncur (m)

sebelum dilakukan pengujian, spesimen terlebih dahulu diampelas dan dipoles untuk menghilangkan cacat pada permukaan serta untuk mendapatkan permukaan yang rata dan licin. Jika terdapat goresan pada permukaan akan mengganggu mekanisme keausan dan penghitungan lebar jejak keausan.

### 3.3.4 Pengamatan *Debris* Keausan

Setelah dilakukan pengujian keausan untuk setiap sampel dengan komposisi yang berbeda dan juga sampel normal, maka akan didapatkan *debris* keausan atau serpihan-serpihan hasil dari uji keausan. *Debris* ini kemudian ditembakkan dengan menggunakan mesin SEM (*Scanning Electron Microscope*) dengan merek LEO 420i untuk mengetahui mekanisme keausan apa yang terjadi pada paduan aluminium AC4B ini. Untuk mengetahui peretakan atau keausan yang terjadi di permukaan bidang lurus, dapat juga dilihat dengan menggunakan mikroskop optik ataupun dengan penggunaan SEM, sehingga fraktografi atau jenis patahan akibat aus yang terjadi bisa di analisis. Gambar 3.6 merupakan gambaran dari mesin SEM merek LEO 420i.



**Gambar 3.6** Mesin SEM LEO 420i

## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 ANALISIS KOMPOSISI KIMIA PADUAN ALUMINIUM AC4B

Tabel 4.1 adalah hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B yang telah dilakukan pada penelitian M. Azi Falah<sup>[4]</sup>. Tabel hasil pengujian ini adalah hasil sebelum dan sesudah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.063, 0.083, dan 0.108 wt.% Ti dan dibandingkan dengan standar QA AHM dan *Aluminum Association* (AA).

**Tabel 4.1** Hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.063, 0.083, dan 0.108 wt.% Ti dibandingkan dengan standar QA AHM dan *Aluminum Association* (AA)<sup>[4]</sup>

Unsur Paduan	Komposisi AC4B (wt.%)				
	+0.03 Ti +0.02Sr	+ 0.05 Ti + 0.02 Sr	+ 0.07 Ti + 0.02 Sr	Standar QA AHM	Standar AA 333
Si	8.804	8.883	8.849	7.00 - 10.00	8.0 - 10.0
Cu	2.239	2.462	2.800	2.00 - 4.00	3.0 - 4.0
Mg	0.242	0.276	0.264	0.50 maks	0.05 - 0.50
Fe	0.739	0.851	0.812	1.00 maks	1.0 maks
Mn	0.252	0.257	0.323	0.50 maks	0.5 maks
Ni	0.068	0.072	0.062	0.35 maks	0.5 maks
<b>Ti</b>	<b>0.063</b>	<b>0.083</b>	<b>0.108</b>	<b>0.20 maks</b>	<b>0.25 maks</b>
Pb	0.063	0.076	0.079	0.20 maks	-
Sn	0.023	0.045	0.049	0.10 maks	-
Cr	0.031	0.036	0.032	0.20 maks	0.20 maks
<b>Sr</b>	<b>0.020</b>	<b>0.021</b>	<b>0.018</b>	-	-
Al	sisa	sisa	sisa	sisa	sisa

Pada penelitian tersebut<sup>[4]</sup>, proses pengujian komposisi dilakukan beberapa kali selama proses penambahan titanium dan stronsium ke dalam paduan aluminium AC4B agar komposisi titanium dan stronsium yang ditambahkan sesuai dengan target penelitian, yaitu 0.02 wt.% Sr dan penambahan 0.03, 0.05, dan 0.07 wt.% Ti.

Pada pengambilan sampel pertama, komposisi titanium pada material dasar sebelum ditambahkan penghalus butir adalah 0.033 wt. %, dengan adanya penambahan penghalus butir, komposisi titaniumnya berubah menjadi 0.063 wt.%

sesuai dengan yang tertera pada Tabel 4.1 di atas. Sedangkan untuk komposisi stronsium sebelum ditambahkan modifier adalah 0.00 wt.% dan setelah penambahan modifier menjadi 0.02 wt.% Sr.

Pada pengambilan sampel kedua, dilakukan dua kali penambahan karena penambahan tahap pertama tidak memenuhi target, perubahan komposisi penghalus butir dari semula berjumlah 0.033 wt.% hanya berubah sampai sekitar 0.072 wt.% dan 0.013 wt.% Sr. Oleh karena itu dilakukan lagi penambahan kedua sehingga komposisinya menjadi 0.083 wt.% Ti dan 0.021 wt.% Sr. Hal yang sama terjadi pada pengambilan sampel ketiga, komposisi titanium sebelum penambahan penghalus butir adalah 0.038 wt.% Ti, setelah penambahan penghalus butir menjadi 0.108 wt.% Ti. Sedangkan untuk komposisi stronsium sebelum ditambahkan modifier adalah 0.00 wt.% Sr, dengan penambahan modifier menjadi 0.02 wt.% Sr yang sesuai dengan target penelitian<sup>[4]</sup>.

Penelitian yang dilakukan saat ini adalah penelitian lanjutan dari penelitian M. Azi Falah<sup>[4]</sup> sehingga semua pengujian yang dilakukan menggunakan sampel yang sama tanpa ada perlakuan tambahan. Tetapi untuk memastikan apakah komposisi dari sampel yang ada untuk melakukan pengujian-pengujian sama dengan komposisi dari sampel yang digunakan pada penelitian M. Azi Falah<sup>[4]</sup>, maka dilakukan pengujian komposisi ulang dan didapatkan hasil pengujian seperti ditampilkan pada Tabel 4.2. Dapat dilihat terjadi penurunan yang cukup jauh pada komposisi titanium pada semua sampel. Komposisi titanium pada sampel awal paduan aluminium AC4B sebelum ditambahkan penghalus butir adalah 0.033 wt.% Ti, berkurang menjadi 0.028 wt.% Ti. Kemudian sampel awal yang telah ditambahkan 0.03 wt.% Ti menjadi 0.063 wt.% Ti pada komposisi penelitian M. Azi Falah<sup>[4]</sup> berkurang menjadi 0.055 wt.% Ti. Hal tersebut terjadi juga pada sampel awal yang telah ditambahkan 0.05 dan 0.07 wt.% Ti menjadi 0.083 dan 0.108 wt.% Ti pada komposisi penelitian M. Azi Falah<sup>[4]</sup> yang berkurang menjadi 0.078 dan 0.087 wt.% Ti. Sedangkan pada komposisi stronsium, tidak terjadi penurunan komposisi yang signifikan, komposisi yang didapat masih dalam target penelitian hanya turun sedikit menjadi sekitar 0.018 dan 0.019 wt.% yang masih dalam batas yaitu sebesar 0.02 wt.%.

**Tabel 4.2** Hasil pengujian komposisi kimia paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan *Japan Industrial Standards*<sup>[17]</sup>

Unsur	Komposisi aktual Sampel A (wt.%)	Komposisi aktual Sampel B (wt.%)	Komposisi aktual Sampel C (wt.%)	Komposisi aktual Sampel D (wt.%)	Komposisi standar paduan aluminium AC4B standar JIS (wt.%)
Si	9.580	8.800	9.280	9.830	7–10
Cu	2.780	2.540	2.160	2.770	2 – 4
Mg	0.261	0.237	0.223	0.257	0.5 maks
Zn	0.555	0.671	0.693	0.692	1 maks
Fe	0.746	0.728	0.668	0.754	1 maks
Mn	0.307	0.327	0.258	0.257	0.5 maks
Ni	0.068	0.075	0.065	0.071	0.35 maks
<b>Ti</b>	<b>0.028</b>	<b>0.055</b>	<b>0.078</b>	<b>0.087</b>	<b>0.2 maks</b>
Pb	0.050	0.064	0.057	0.056	0.2 maks
Sn	0.023	0.021	0.030	0.023	0.1 maks
Cr	0.018	0.018	0.019	0.022	0.2 maks
<b>Sr</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.018</b>	<b>0.019</b>	<b>0.02</b>	<b>1.2 maks</b>
Al	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa

Dengan demikian, untuk selanjutnya penamaan sampel yang digunakan dalam penelitian ini dalam melakukan berbagai pengujian adalah sebagai berikut :

- Sampel A : Sampel standar.
- Sampel B : Sampel dengan komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.055 wt.% Ti.
- Sampel C : Sampel dengan komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.078 wt.% Ti.
- Sampel D : Sampel dengan komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.087 wt.% Ti.

Penurunan komposisi yang terjadi kemungkinan diakibatkan oleh tidak meratanya distribusi dari penghalus butir yang diberikan. Penelitian M. Azi Falah<sup>[4]</sup> menggunakan penghalus butir jenis coveral GR-2815 yang berbentuk *fluks* dan diberikan pada saat proses peleburan. Lalu pengujian komposisi yang dilakukan pada penelitian M. Azi Falah<sup>[4]</sup> adalah pengujian komposisi yang dapat dikontrol (masih dalam bentuk *molten*) sehingga jika hasil yang diinginkan belum didapatkan dapat ditambahkan lagi sampai hasil yang diinginkan tercapai. Sedangkan pengujian komposisi saat ini dilakukan setelah produk (*cylinder head*) terbentuk dan dipotong-potong pada tiap bagian yang tebal dan yang tipis. Selanjutnya, pada saat proses pengecoran akan terjadi ketidakseragaman pembekuan dan pada saat inilah kemungkinan tersebarnya penghalus butir sangat

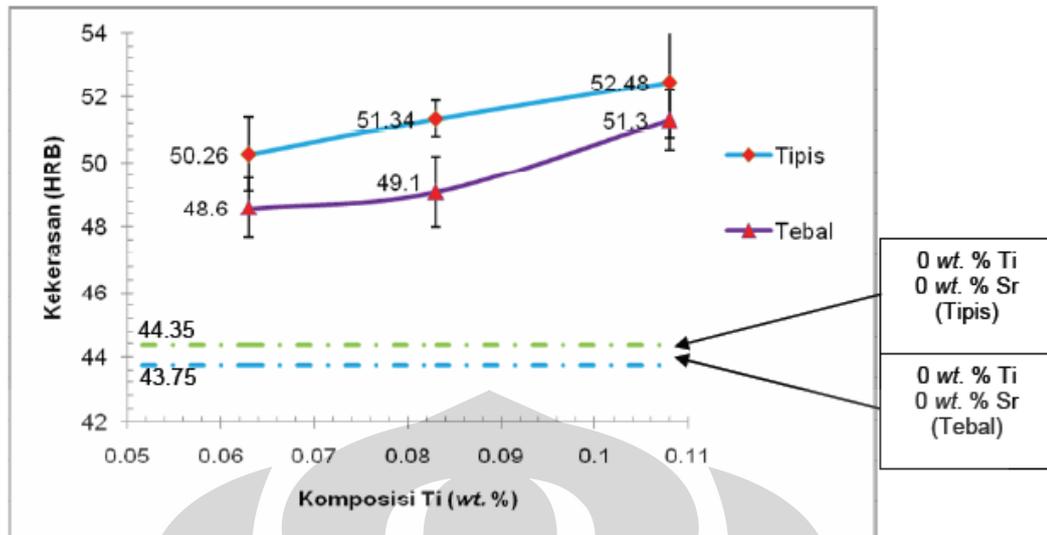
besar sehingga dapat terjadi perbedaan kadar titanium pada tiap-tiap bagian komponen dari *cylinder head* yang telah jadi.

Pada Tabel 4.2, dapat dilihat kadar silikon yang didapatkan pada penelitian kali ini berada pada range 8.80 - 9.58 wt.%. Hal ini menunjukkan bahwa paduan Al-Si masih berada dalam batas paduan aluminium AC4B menurut JIS<sup>[17]</sup> yang berada pada range 7-10 wt. dan masih ada dalam kondisi hipoeutektik<sup>[15]</sup>.

Kadar besi juga cukup tinggi pada hasil pengujian komposisi ini, jika dibandingkan dengan kadar maksimal pada paduan aluminium yang berdasarkan pada JIS<sup>[17]</sup>, kadar maksimal dari besi adalah 1 %, sedangkan pada pengujian ini didapatkan kadar besi hingga 0.754 wt. % yang berarti masih di dalam batas yang diizinkan. Kadar besi yang cukup tinggi ini akan menyebabkan besi bereaksi membentuk fasa-fasa tidak terlarut (*insoluble*) dalam leburan paduan aluminium, yang umumnya berupa FeAl<sub>3</sub>, FeMnAl<sub>6</sub>, dan AlFeSi. Adanya kadar besi pada paduan yang berlebihan akan membentuk kristal FeSiAl<sub>5</sub> yang dapat menurunkan sifat keuletan dan ketahanan korosi paduan Al-Si dan mengakibatkan struktur butir yang kasar<sup>[16]</sup>.

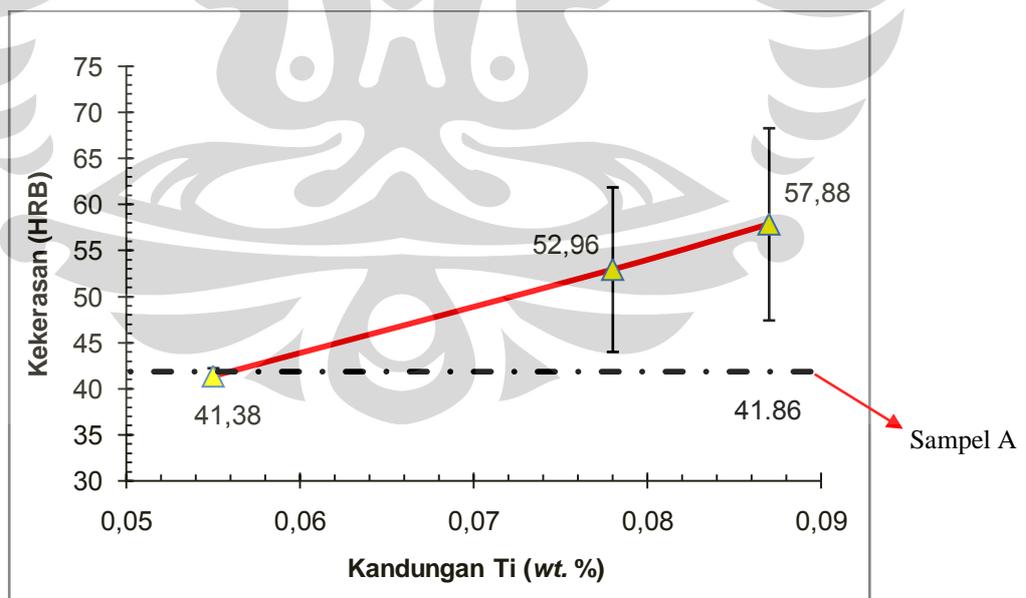
#### **4.2 ANALISIS PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI 0.02 wt.% Sr DAN 0.055, 0.078, 0.087 wt.% Ti TERHADAP KEKERASAN PADUAN ALUMINIUM AC4B**

Gambar 4.1 di bawah ini menggambarkan tentang perubahan kekerasan paduan AC4B dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083, dan 0.108 wt. % Ti pada sampel tipis dan tebal yang telah dilakukan pada penelitian M. Azi Falah<sup>[4]</sup>. Dapat dilihat pada kombinasi kadar Sr yang konstan (0.02 wt.% Sr) dan kombinasi penambahan kadar Titanium yang semakin meningkat mulai dari 0.063, 0.083, sampai 0.108 wt.% Ti, didapatkan nilai kekerasan yang juga semakin tinggi yaitu sebesar 50.26, 51.34, dan 52.48 HRB secara berturut-turut pada sampel tipis, dan 48.6, 49.1, dan 51.3 HRB secara berturut-turut pada sampel tebal. Adapun sampel normal (0 wt.% Ti dan 0 wt.% Sr) digunakan sebagai pembanding pada percobaan tersebut yang memiliki nilai kekerasan sebesar 44.35 HRB untuk sampel tipis dan 43.75 HRB untuk sampel tebal.



**Gambar 4.1** Perbandingan nilai kekerasan pada daerah tipis dan tebal untuk komposisi normal (0.00 wt. % Ti dan 0.00 wt. % Sr) dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083, dan 0.108 wt. % Ti<sup>[4]</sup>

Penelitian yang dilakukan saat ini hanya menggunakan variabel sampel tebal sebagai sampel untuk melakukan semua pengujian, dan dilakukan pengujian kekerasan kembali untuk melihat apakah ada perbedaan hasil pengujian kekerasan yang dilakukan saat ini dengan yang telah dilakukan sebelumnya. Hasil pengujian kekerasan dapat dilihat pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Hasil pengujian kekerasan pada daerah tebal untuk sampel A, B, C, dan D

Dari hasil pengujian kekerasan didapatkan nilai kekerasan sampel A sebesar 41.86 HRB, sampel B didapatkan nilai kekerasan sebesar 41.38 HRB,

sampel C didapatkan nilai kekerasan sebesar 52.96 HRB, dan sampel D sebesar 57.88. Hal ini menunjukkan dengan jelas bahwa nilai kekerasan paduan aluminium AC4B akan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah Ti yang ditambahkan. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyebutkan dengan adanya penambahan penghalus butir yang berfungsi sebagai pembentuk inti sehingga butir-butir menjadi lebih halus<sup>[3]</sup>, dan adanya penambahan *modifier* yang dapat merubah bentuk partikel silikon dari *acicular* kasar menjadi *fibrous* atau bentuk *lamellar*<sup>[5]</sup>, akan dapat meningkatkan sifat mekanis dari logam tersebut<sup>[3,5]</sup>.

### 4.3 ANALISIS PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI 0.02 wt.% Sr DAN 0.055, 0.078, DAN 0.087 wt.% Ti TERHADAP KETAHANAN AUS PADUAN ALUMINIUM AC4B

#### 4.3.1 Analisis Pengujian Keausan Paduan Aluminium AC4B

Tabel 4.3 menggambarkan data hasil pengujian keausan paduan aluminium AC4B pada sampel A, B, C, dan D. Pengujian keausan dilakukan pada semua sampel dengan kombinasi komposisi yang berbeda. Pengambilan titik-titik pengujian berbeda-beda tergantung dari kondisi sampel yang ada.

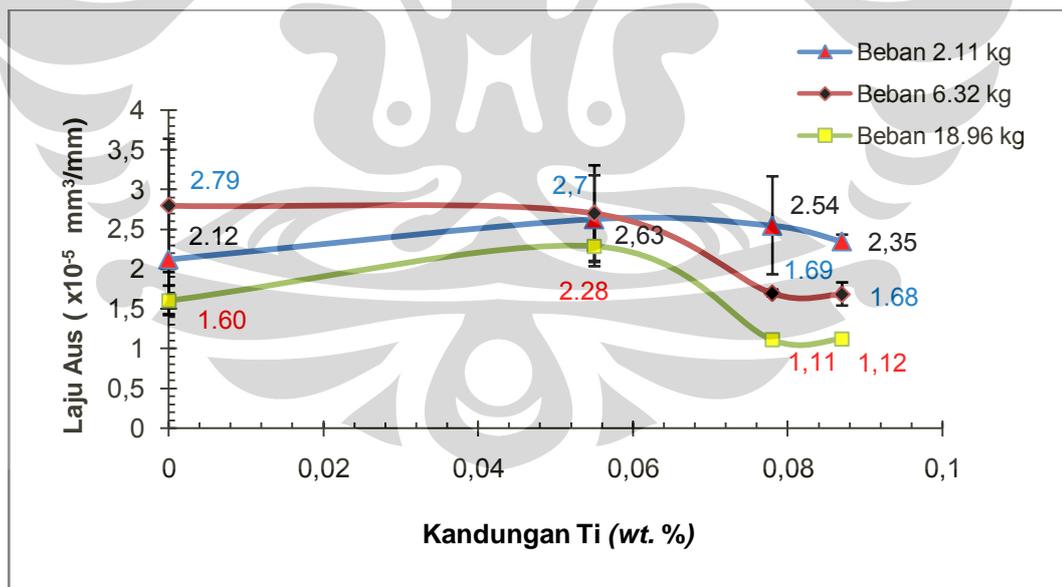
**Tabel 4.3** Data hasil pengujian keausan paduan aluminium AC4B untuk sampel A, B, C, dan D

Sampel	Komposisi (wt.%)	Beban (kg)	Lebar Celah Terabrasi (mm)			Volume Terabrasi (mm <sup>3</sup> )			Laju Aus (x 10 <sup>-5</sup> mm <sup>3</sup> /mm)			Rata-rata Laju Aus (x10 <sup>-5</sup> mm <sup>3</sup> /mm)
			b1	b2	b3	b1	b2	b3	b1	b2	b3	
A1	Standar	2.11	4.38	5.51	5.08	84.02	167.28	131.72	1.40	2.78	2.19	2.12
A2		6.32	5.24	6.09	5.12	143.88	225.87	134.22	2.39	3.76	2.24	2.79
A3		18.96	4.76	4.58	4.40	107.85	96.07	85.18	1.79	1.60	1.42	1.60
B1	0.02 Sr dan 0.055 Ti	2.11	5.52	4.95	5.69	168.19	121.28	184.22	2.80	2.02	3.07	2.63
B2		6.32	5.87	5.33	5.10	202.26	151.42	132.65	3.37	2.52	2.21	2.70
B3		18.96	5.06	5.37	5.03	129.55	154.85	127.26	2.16	2.58	2.12	2.28
C1	0.02 Sr dan 0.078 Ti	2.11	4.80	5.54	5.63	110.59	170.03	178.45	1.84	2.83	2.97	2.54
C2		6.32	4.70	4.63	4.68	103.82	99.25	102.50	1.73	1.65	1.71	1.69
C3		18.96	4.01	4.05	4.10	64.77	66.43	68.92	1.08	1.10	1.15	1.11
D1	0.02 Sr dan 0.087 Ti	2.11	5.25	5.14	5.23	144.70	135.79	143.05	2.41	2.26	2.38	2.35
D2		6.32	4.60	4.56	4.81	97.34	94.82	111.28	1.62	1.58	1.85	1.68
D3		18.96	5.35	4.10*	4.03*	153.13	68.92*	65.45*	2.55	1.15*	1.09*	1.12*

Sebagai contoh ada sampel yang memiliki ruang yang cukup banyak untuk diuji keausan, sehingga sampel tersebut diuji sampai didapatkan beberapa titik yang kemudian dilihat nilai yang paling baik dari semuanya. Sebaliknya pada sampel yang terbatas ruang untuk dilakukan pengujian keausan, maka hanya didapatkan 3 titik pengujian dari sampel tersebut.

Data yang didapatkan dari hasil uji keausan ini berupa lebar celah yang terabrasi ( $b$ ) dalam satuan mm. Data lebar celah yang terabrasi ini digunakan untuk menentukan volume material yang terabrasi ( $W$ ), kemudian dari volume material yang terabrasi ini dapat dihitung laju keausan material ( $V$ ). Semakin kecil nilai laju keausan suatu material maka akan semakin besar pula ketahanan aus material tersebut. Sebaliknya, semakin besar nilai laju keausan suatu material maka akan semakin rendah pula ketahanan aus material tersebut.

Besarnya volume material yang terabrasi ( $W$ ) dan nilai laju keausan ( $V$ ) dari material uji dihitung dengan menggunakan persamaan (3.1) dan (3.2) pada Bab 3. Setelah didapatkan data laju aus dan rata-ratanya dari tiap sampel, maka data tersebut di plot ke dalam grafik seperti digambarkan pada Gambar 4.3.



**Gambar 4.3** Hasil uji keausan paduan aluminium AC4B untuk sampel A, B, C, dan D

Dari Gambar 4.3, dapat dilihat pada beban 2.11 kg, laju aus yang didapat pada sampel A, B, C, dan D secara berturut-turut adalah 2.12, 2.63, 2.54, dan 2.35  $\times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/mm. Jika dilihat, sampel A memiliki laju aus yang lebih rendah jika

dibandingkan dengan sampel B pada beban 18.96 kg, pada sampel A didapatkan nilai laju aus sebesar  $1.60 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$ , lebih rendah jika dibandingkan dengan sampel pada B yang memiliki nilai laju aus sebesar  $2.28 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$ , kemudian nilai laju aus kembali turun seiring dengan bertambahnya kadar Ti, yaitu sebesar  $1.11 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$  pada sampel C dan memiliki nilai yang sama atau naik sangat sedikit pada sampel D, yaitu sebesar  $1.12 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Sedangkan kecenderungan grafik yang berbeda ditunjukkan pada beban 6.32 kg, dimana nilai laju aus terus menurun seiring dengan bertambahnya kadar Ti, yaitu sebesar 2.79, 2.7, 1.69, dan  $1,68 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$  secara berturut-turut.

Menurut Ching-Yi Yang *et al*<sup>[5]</sup>, sifat keausan paduan aluminium-silikon sangat penting dipengaruhi oleh kadar dan bentuk dari partikel silikon. Ketahanan aus paduan Al-Si dilaporkan meningkat pada saat kadar silikon yang ada mendekati komposisi eutektik. Telah diamati juga bahwa ketahanan aus paduan Al-Si A390 meningkat dengan kehalusan dari silikon primer di bawah kondisi peluncuran kering. Saat paduan Al-Si meluncur melawan permukaan yang keras, partikel silikon pada daerah sub-permukaan (*subsurface*) terbelah akibat dari aliran plastik. Bentuk dan ukuran dari partikel silikon dianggap sebagai faktor pengontrol dari pembentukan retakan, karena kecenderungan untuk terjadi retak akan meningkat dengan adanya perbedaan bentuk dari partikel silikon pada paduan Al-Si. Bentuk dari partikel silikon yang bulat-bulat pada paduan Al-Si memperlambat terjadinya proses nukleasi dan pertumbuhan retakan pada daerah sub-permukaan (*subsurface*).

H.R Lashgari *et al*<sup>[30]</sup> mendapatkan bentuk *acicular* dari partikel silikon yang belum dimodifikasi mengindikasikan bahwa diperlukan tegangan yang lebih kecil untuk terjadinya retakan lokal dari partikel silikon jika dibandingkan dengan partikel yang diperkuat B<sub>4</sub>C. Oleh karena itu, kehalusan dari partikel silikon dapat mengurangi konsentrasi tegangan yang dapat mempengaruhi partikel silikon dan meningkatkan sifat keausan.

Penambahan dari *modifier* Sr pada paduan Al-Si dapat merubah bentuk dari partikel silikon dari bentuk *acicular* kasar menjadi bentuk *fibrous* atau *lamellar* yang lebih halus yang akan meningkatkan sifat mekaniknya<sup>[5]</sup>. Pada penelitian saat ini, penambahan *modifier* Sr sebanyak 0.02 wt.% akan merubah

bentuk partikel silikon dan akan dapat meningkatkan sifat mekaniknya dengan memiliki ketahanan aus yang lebih baik. Sehingga kecenderungan yang ada pada grafik hasil pengujian keausan yang benar adalah grafik yang terus menurun dengan bertambahnya kadar silikon atau dengan kata lain pergerakan grafik menuju nilai laju aus yang lebih rendah.

Penghalusan butir berhubungan dengan pembentukan dari struktur butir *equiaxed* yang halus pada aluminium dan paduan cor lainnya, yang kalau tidak diberi penghalus butir akan membeku dengan bentuk struktur butir kolumnar yang kasar pada nukleasi heterogen. Struktur butir yang halus ini akan memberikan beberapa keuntungan seperti peningkatan sifat mekanik, dan bertambahnya kadar Ti yang ada akan meningkatkan ketahanan aus dari paduan Al-Si<sup>[32]</sup>. Oleh karena itu, kecenderungan nilai laju aus yang didapat akan semakin berkurang seiring dengan bertambahnya kadar penghalus butir (Ti) yang diberikan.

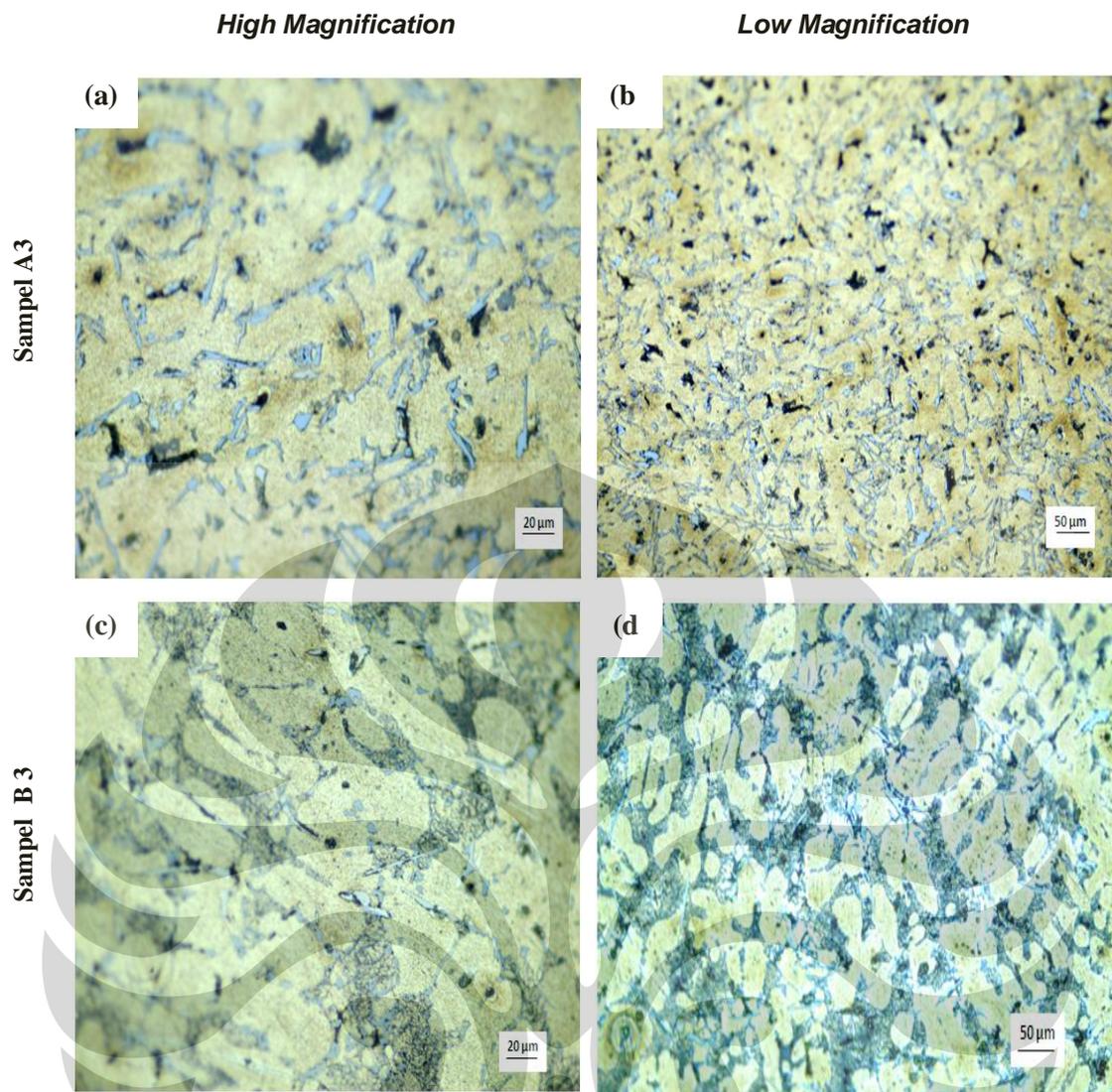
Ketidaksesuaian hasil penelitian ini terdapat pada pengaruh beban uji. Gambar 4.3 memperlihatkan bahwa pengujian pada beban 18.96 kg didapatkan nilai laju aus yang lebih kecil dari beban 6.32 dan 2.11 kg, yang berarti memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi. Padahal menurut K.G Basavakumar *et al*<sup>[29]</sup>, pengaruh dari bertambahnya beban yang diberikan pada saat pengujian keausan akan menyebabkan volume material yang hilang akan semakin banyak (lihat Gambar 2.18 (a)).

Perbedaan ini mungkin dapat disebabkan oleh pengujian yang kurang sempurna pada beban 18.96 kg. Pada saat dilakukan pengujian dengan menggunakan beban 18.96 kg, gesekan yang terjadi antara beban uji dengan *disc* berputar pada mesin uji aus Ogoshi tidak terlalu sempurna. Awal pengujian tersebut, *disc* dan benda saling bergesekan dengan baik, lalu seiring dengan bertambahnya waktu dan jarak luncur yang diberikan, gesekan yang terjadi semakin hilang (pengikat benda uji dengan *disc* menjadi sedikit longgar sehingga tidak terjadi gesekan sama sekali), dan pada saat pengujian akan selesai, pengikat benda uji dengan *disc* menjadi kuat kembali dan gesekan terjadi lagi. Oleh karena itu, kemungkinan volume material yang hilang akan sedikit lebih berkurang pada beban uji 18.96 kg ini.

Untuk lebih memastikan adanya kekurang sempurnaan pengujian pada beban 18.96 kg ini, maka dilakukan pengamatan foto mikro dan debris keausan pada sampel uji beban 18.96 kg, khususnya sampel A3 dan B3. Untuk pengamatan debris keausan akan dibahas pada subbab 4.3.2.

Gambar 4.4 menggambarkan mikrostruktur dari sampel hasil uji aus A3 dan B3 yang diambil pada sampel yang digunakan juga sebagai sampel uji aus pada beban 18.96 kg. Pada hasil foto mikro di atas, secara keseluruhan didapat gambar yang sama dengan hasil foto mikro pada semua sampel dan semua komposisi yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya<sup>[4]</sup>, bahwa terjadi perubahan bentuk partikel silikon dari *acicular* kasar menjadi *fibrous* atau *lamellar* yang halus dengan adanya penambahan *modifier* sebanyak 0.02 wt.%, dan terjadi pengurangan ukuran dari butir atau DAS (*Dendrite Arm Spacing*) menjadi lebih kecil dengan adanya penambahan penghalus butir Ti sebesar 0.055 wt.%. Selain itu, didapat pula beberapa fasa lain yang mungkin ada seperti  $Al_2Cu$  dan  $AlFeSi$ .

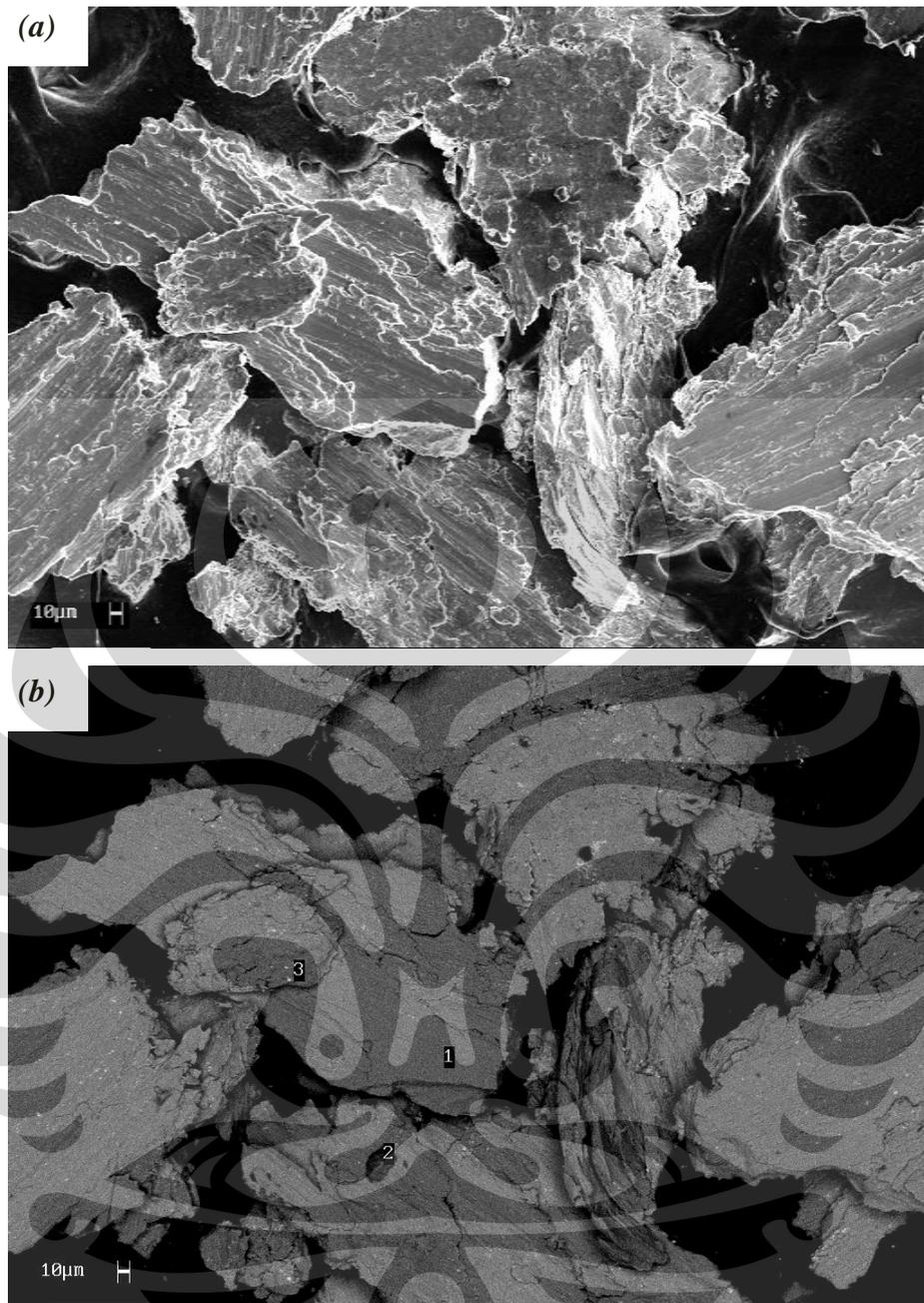
Dari hasil pengamatan mikrostruktur, tidak didapat keanehan yang menyebabkan rendahnya nilai laju aus yang didapat pada grafik beban 18.96 kg. Sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat kekurangsempurnaan pada saat dilakukan pengujian keausan pada beban 18.96 kg, kekurangsempurnaan ini bisa berupa kondisi sampel pada saat dilakukan pengujian yang kurang tepat, baik adanya sampel yang miring maupun yang permukaan untuk dilakukan uji ausnya sedikit. Kekurangsempurnaan lainnya bisa terjadi kemungkinan akibat dari gesekan yang tidak sempurna pada uji keausan dengan beban 18.96 kg ini, sehingga volume material yang hilang tidak terlalu banyak.



**Gambar 4.4** Foto mikrostruktur paduan AC4B pada beban uji 18.96 kg, (a-b) sampel A3, (c-d) sampel B3, etsa Tucker

#### 4.3.2 Analisis *Debris* Keausan (*Wear Debris*)

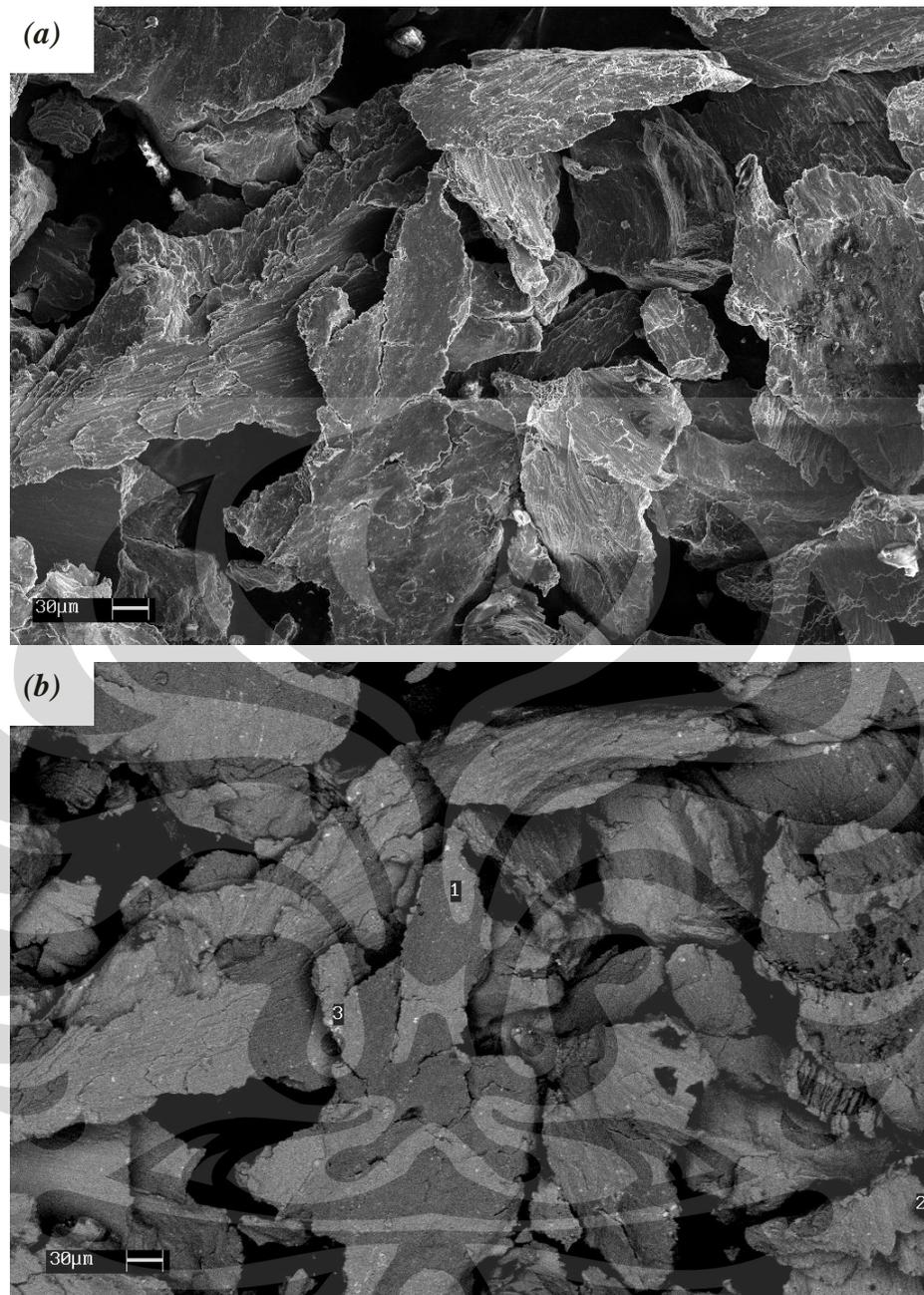
Gambar 4.5 – 4.9 merupakan hasil pengamatan SEM dari *debris* keausan untuk sampel A2, B2, C2, dan D2 pada pengujian keausan dengan beban 6.32 kg. Untuk membedakan morfologi *debris* pada beban yang berbeda juga dilakukan pengamatan SEM pada debris keausan dari sampel C3 yang diuji keausan dengan beban 18.96 kg. Selanjutnya Tabel 4.4 – 4.8 merupakan hasil pengujian EDAX untuk setiap titik yang ditunjukkan pada tiap-tiap gambar.



**Gambar 4.5** Hasil pengamatan SEM dari *debris* keausan sampel A2 dengan detektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX

**Tabel 4.4** Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.5

No. Titik	Unsur (wt. %)											Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Al	Si	Ti	Cu	Fe	C	O	Cl	K	Sn	S		
1	85.63	5.87	-	3.99	-	-	3.12	-	-	1.38	-	abu-abu	Al-Si, Al <sub>2</sub> Cu
2	68.95	4.14	-	4.98	-	11	6.27	3.36	0.63	-	0.52	hitam	Al-Si, Al <sub>2</sub> Cu
3	83.30	4.71	-	6.97	-	1.2	3.84	-	-	-	-	putih	Al-Si, Al <sub>2</sub> Cu



**Gambar 4.6** Hasil pengamatan SEM dari *debris* keausan sampel B2 dengan detektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX

**Tabel 4.5** Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.6

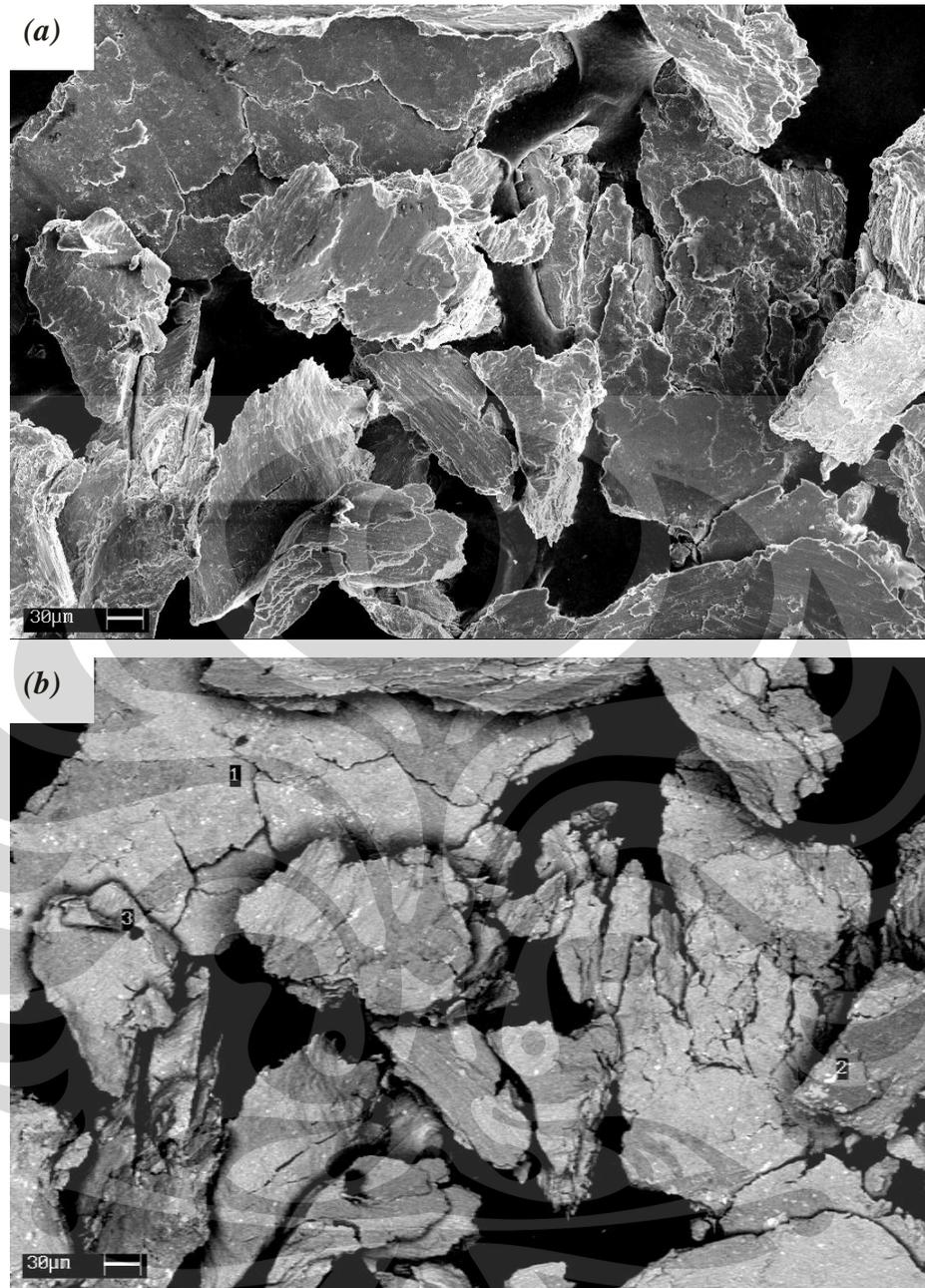
No. Titik	Unsur (wt. %)												Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Al	Si	Ti	Cu	Fe	Mn	C	O	Cl	K	Na	Ca		
1	79.75	5.40	-	4.79	4.59	1.75	0.78	2.15	-	-	0.79	-	abu-abu	$\text{Al}_2\text{Cu}$ , $\text{Al}(\text{FeMn})\text{Si}$ , $\text{AlFeSi}$
2	58.11	1.72	-	-	2.09	-	14.15	11.85	3.26	2.32	-	6.50	hitam	$\text{AlFeSi}$ , $\text{Al-Si}$ , $\text{CaSi}_2$
3	46.99	0.92	-	49.8	0.55	-	0.47	1.30	-	-	-	-	putih	$\text{Al}_2\text{Cu}$ , $\text{AlFeSi}$ ,



**Gambar 4.7** Hasil pengamatan SEM dari *debris* keausan sampel C2 dengan detektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX

**Tabel 4.6** Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.7

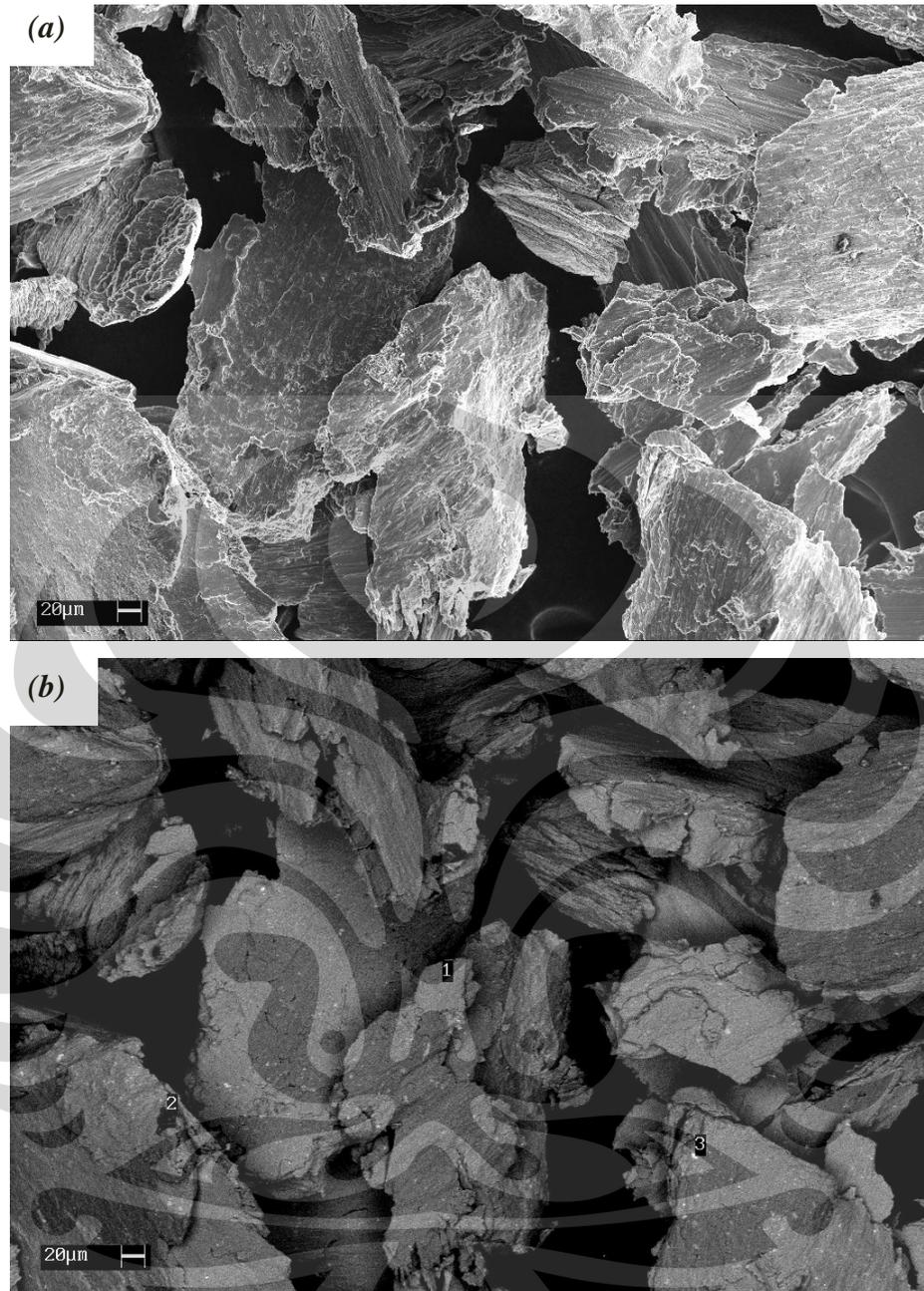
No. Titik	Unsur (wt. %)								Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Al	Si	Ti	Cu	Fe	C	O	Cl		
1	90.37	2.94	-	4.54	-	0.94	1.20	-	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu, Al-Si
2	86.54	2.29	-	5.85	-	1.01	1.06	3.25	hitam	Al <sub>2</sub> Cu, Al-Si
3	77.74	2.39	-	14.03	2.70	1.31	1.82	-	putih	Al <sub>2</sub> Cu, AlFeSi, Al-Si



**Gambar 4.8** Hasil pengamatan SEM dari *debris* keausan sampel C3 dengan detektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX

**Tabel 4.7** Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.8

No. Titik	Unsur (wt. %)											Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Al	Si	Ti	Cu	Fe	C	O	Cl	Na	S	Ca		
1	50.23	29.56	0.18	4.03	-	0.65	15.35	-	-	-	-	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu, Al-Si
2	66.14	13.56	0.04	7.47	6.00	0.82	5.99	-	-	-	-	putih	Al <sub>2</sub> Cu, Al-Si
3	18.79	2.33	-	-	0.48	38.67	28.28	6.52	0.93	2.95	1.06	hitam	Al-Si, AlFeSi, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>



**Gambar 4.9** Hasil pengamatan SEM dari *debris* keausan sampel D2 dengan detektor (a) SE (b) QBSD, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX

**Tabel 4.8** Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.9

No. Titik	Unsur (wt. %)											Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Al	Si	Ti	Cu	Fe	C	Cl	K	Na	S	Ca		
1	92.65	2.42	-	4.01	-	0.92	-	-	-	-	-	abu-abu	Al-Si, Al <sub>2</sub> Cu
2	41.73	3.19	0.71	0.83	5.10	11.54	18.96	5.75	4.62	2.57	5.00	hitam	Al <sub>2</sub> Cu, AlFeSi
3	79.53	9.70	-	7.63	0.77	1.18	-	-	1.19	-	-	putih	Al-Si, Al <sub>2</sub> Cu, AlFeSi,

Dari Gambar 4.5 – 4.9 dapat dilihat perubahan ukuran dari *debris* keausan mulai dari yang berukuran besar pada *debris* sampel A2 sekitar  $\pm 170 \mu\text{m}$ , menjadi sedikit lebih kecil menjadi  $\pm 140 \mu\text{m}$  pada sampel B2, sampel C2 memiliki ukuran *debris* yang lebih kecil lagi yaitu sampai *range*  $\pm 90 \mu\text{m}$ , dan terakhir adalah ukuran dari sampel D2 yang tidak terlalu berubah dari sampel sebelumnya. Perbedaan ukuran *debris* keausan ini juga terjadi pada pembebanan yang berbeda, ukuran *debris* sampel C2 yang diberi beban uji 6.32 kg menjadi sedikit lebih kecil pada *debris* sampel C3 yang diberi beban uji 18.96. Hal ini sesuai dengan H.R Lashgari *et al*<sup>[30]</sup> yang mendapatkan bahwa *debris* keausan pada komposit yang belum dimodifikasi memiliki ukuran yang lebih besar jika dibandingkan dengan yang telah dimodifikasi. Dapat dilihat bahwa bentuk dan ukuran dari partikel silikon memegang peranan yang sangat penting dalam menentukan ukuran dari *debris* keausan. Bentuk pipih (*flaky*) dari *debris* keausan mengindikasikan adanya proses delaminasi atau pengelupasan, hal ini melibatkan nukleasi dari retakan di bawah permukaan dan arah rambatannya yang sejajar ke permukaan dan akhirnya menghasilkan *debris* keausan<sup>[30]</sup>. Penambahan dari *modifier* Sr akan menyebabkan tambahan pembentukan *debris* keausan yang teroksidasi jika dibandingkan dengan *debris* keausan yang dihasilkan dari komposit yang belum dimodifikasi. Dapat dilihat, penambahan dari aluminium dan Silikon, senyawa intermetalik stronsium yang terbelah dapat mencapai permukaan luncur akibat aus dan ini dapat mengakibatkan kelebihan pembentukan dari lapisan oksida dan partikel oksida *debris*<sup>[30]</sup>.

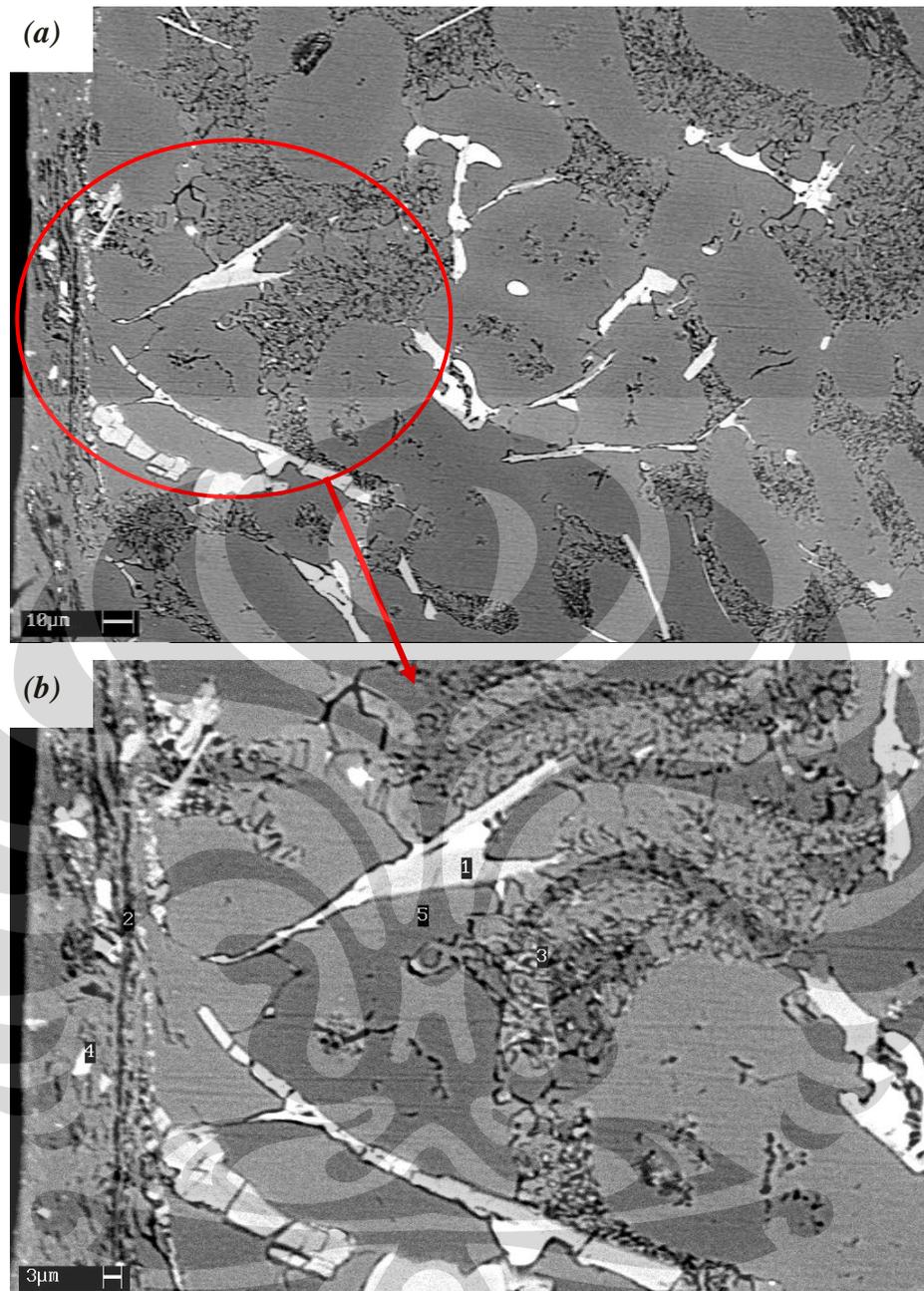
Lapisan oksida ini dapat juga dibuktikan dengan tingginya kadar oksigen pada hasil pengujian EDAX, titik-titik yang berwarna lebih gelap biasanya memiliki nilai kadar O dan C yang lebih tinggi dibandingkan dengan titik lainnya yang lebih terang. Unsur-unsur lain yang ditemukan pada titik-titik pengujian EDAX lainnya adalah antara lain Ca, Sn, Na, K, dan Cl. Tetapi jumlahnya masih dalam batas yang diizinkan dalam paduan aluminium AC4B. Dari penelitian H.R Lashgari *et al*<sup>[30]</sup>, telah dijelaskan tentang karakteristik dari *debris* keausan yang didapat dan perbedaannya antara paduan yang belum dimodifikasi dengan paduan yang sudah dimodifikasi. Demikian halnya yang terjadi pada *debris* keausan yang didapat pada penelitian saat ini, dapat dilihat bahwa bentuk *debris* keausan baik

pada sampel normal (sampel A2) maupun pada sampel yang telah ditambahkan *modifier* Sr dan penghalus butir Ti (sampel B2, C2, C3, dan D2), didapatkan bentuk *debris* yang sama yaitu bentuk serpihan (*flake-like*). Sedangkan ukuran dari *debris* keausan menjadi semakin kecil dan sedikit lebih halus jika dibandingkan dengan *debris* keausan pada sampel A2.

#### 4.3.3 Analisis Sub-Permukaan Keausan (*Worn Subsurface*)

Gambar 4.10 adalah hasil SEM dari sub-permukaan keausan yang diamati pada sampel hasil uji aus pada sampel C2, yang di uji aus dengan menggunakan beban 6.32 kg. Sebelum diamati menggunakan SEM, sampel terlebih dahulu dipotong tepat di bagian pinggir hasil uji aus, yang kemudian di amplas sampai grit 1500, dipoles, dan kemudian digunakan etsa Tucker. Grafik hasil pengujian EDAX terdapat pada lampiran 31. Bagian sebelah kiri adalah batas pengujian aus, kurang lebih 18  $\mu\text{m}$  dari ujung hasil uji aus terdapat garis hitam yang panjang yang menjalar searah dengan arah luncur pada saat dilakukan pengujian keausan. Garis hitam tersebut merupakan batas daerah MML (*Mechanically Mixed Layer*) yaitu batas dimana pembebanan yang terjadi dengan kecepatan luncur 2.38 m/s, jarak luncur 100 m, dan beban uji 6.32 kg hanya dapat merusak sampai pada bagian tersebut. Kerusakan yang terjadi telah diminimalisir oleh bentuk silikon yang sudah dimodifikasi sehingga konsentrasi tegangan yang ada tidak sebanyak jika belum dimodifikasi.

Dapat dilihat juga terjadi perubahan bentuk dari fasa  $\text{Al}_2\text{Cu}$  yang rusak akibat tekanan dari beban yang diberikan, sehingga fasa  $\text{Al}_2\text{Cu}$  yang berdekatan dengan daerah pengujian keausan berubah bentuk dari yang berbentuk bulat menjadi sedikit terpecah menjadi lebar dan kotak, jika dibandingkan dengan fasa  $\text{Al}_2\text{Cu}$  yang berjauhan dari daerah uji aus, fasa tersebut masih berbentuk bulat karena tidak ada tekanan dari beban yang diberikan. Lain lagi dengan fasa  $\text{Al}(\text{FeMn})\text{Si}$  yang terletak berdekatan dengan daerah uji aus mengalami perubahan bentuk, bentuk fasa  $\text{Al}(\text{FeMn})\text{Si}$  yang berbentuk jarum akan lebih mudah patah jika terletak berdekatan dengan daerah uji aus karena terjadi konsentrasi tegangan yang cukup tinggi.



**Gambar 4.10** Hasil pengamatan SEM dari sub-permukaan keausan sampel C2, etsa Tucker, detektor QBSD, (a) *Low Magnification*, (b) *High Magnification*, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX

**Tabel 4.9** Komposisi hasil analisis titik SEM/EDAX pada Gambar 4.10

No. Titik	Unsur (wt. %)									Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Al	Si	Ti	Cu	Fe	Mn	C	O	Na		
1	54.59	11.8	-	-	25.87	4.03	0.40	3.31	-	abu-abu muda	Al(FeMn)Si, AlFeSi
2	67.94	8.42	0.44	11.18	-	-	1.09	8.31	2.63	hitam	Al <sub>2</sub> Cu, Al-Si
3	49.18	23.19	0.87	12.10	-	-	1.12	13.54	-	hitam, abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu, Al-Si
4	47.96	3.63	0.15	42.95	-	-	0.80	4.51	-	putih	Al <sub>2</sub> Cu, Al-Si
5	89.19	1.67	0.54	7.20	-	-	1.06	0.34	-	abu-abu tua	Al <sub>2</sub> Cu, Al-Si

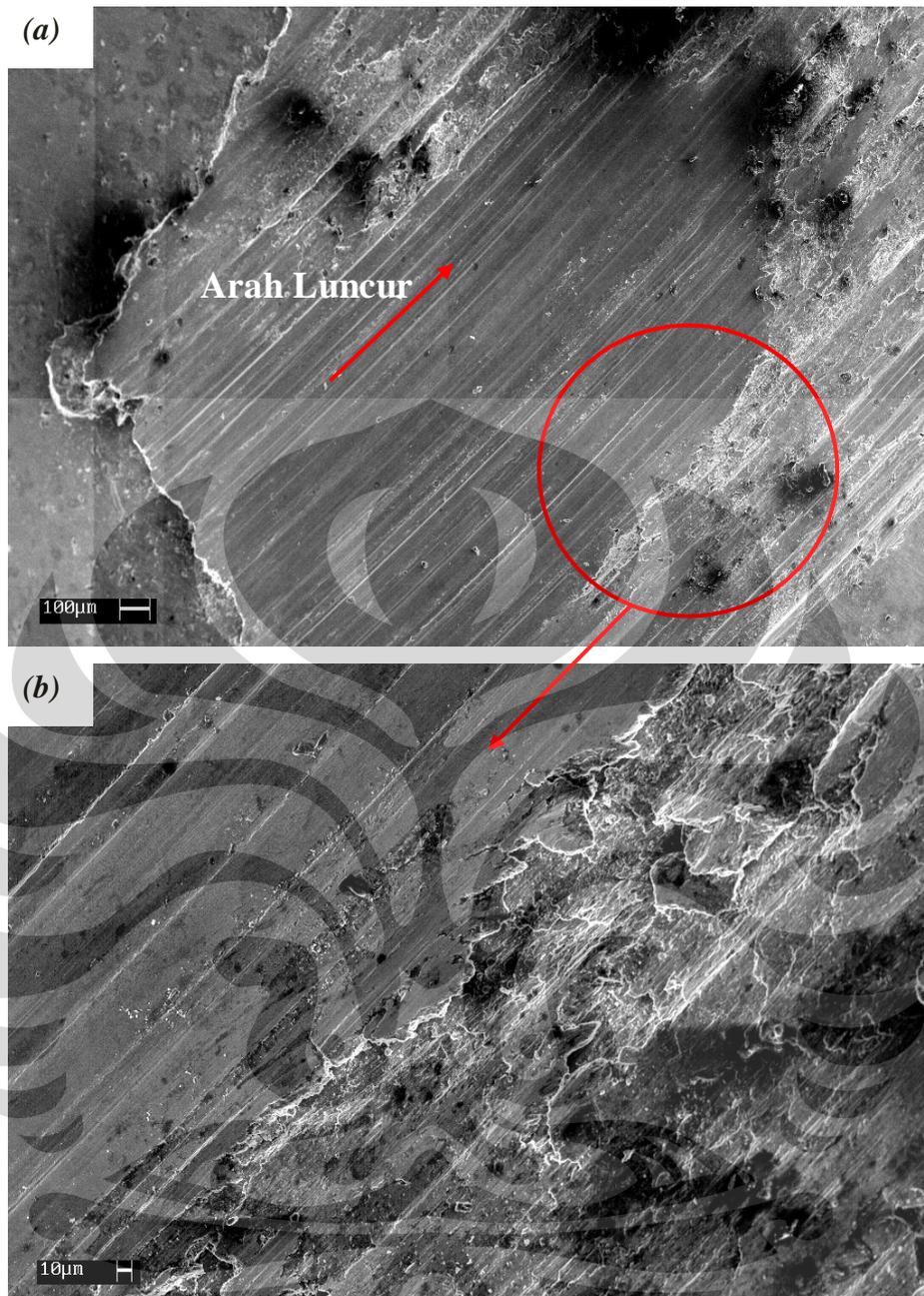
H.R Lashgari *et al*<sup>[30]</sup> menemukan bahwa partikel silikon eutektik yang berada di daerah sub-permukaan keausan membengkok dan terdeformasi, lalu terbelah secara lurus ke arah peluncuran, hal ini mengindikasikan terjadinya deformasi plastik dan regangan geser pada daerah sub-permukaan keausan yang dihasilkan pada saat pengujian keausan dilakukan. Kehadiran dari partikel silikon berbentuk *acicular* kasar dapat memudahkan terjadinya awal mula dan perambatan dari retakan mikro (*microcracks*) atau *microvoid* pada daerah sub-permukaan. Selanjutnya, retakan mikro ini dapat dengan mudah merambat melewati daerah antarmuka (*interfacial*) yang lemah (seperti partikel silikon *acicular*) dan akhirnya mencapai permukaan. Aspek perbandingan yang tinggi dari partikel silikon (pada sampel yang belum dimodifikasi) menghalangi pergerakan dari dislokasi dan memberikan konsentrasi tegangan yang tinggi pada partikel silikon. Oleh karena itu, modifikasi dari silikon eutektik dengan adanya penambahan *modifier* Sr dapat mengurangi pengaruh dari konsentrasi tegangan yang tinggi pada partikel silikon<sup>[30]</sup>. Sedangkan Ching-Yi Yang<sup>[5]</sup> mendapatkan bahwa ciri-ciri mikrostruktur dari daerah bawah permukaan bervariasi tergantung dari kedalamannya, dan berubah dari MML (*Mechanically Mixed Layer*) menjadi daerah deformasi plastik dan akhirnya daerah yang sebagian besar tidak mengalami deformasi. Pada daerah sub-permukaan, partikel silikon yang berukuran besar dari paduan yang belum dimodifikasi terbelah akibat aus, sebaliknya, tidak ada partikel silikon yang terbelah pada paduan yang telah dimodifikasi. Selama pengujian keausan, deformasi sepanjang permukaan dan sub-permukaan terjadi dengan adanya perpindahan material di antara dua permukaan yang saling kontak, menyebabkan pembentukan dari MML (*Mechanically Mixed Layer*) pada sampel uji. Bentuk dari MML ini tipis dan terputus-putus sepanjang jejak aus, yang mengandung partikel yang sangat halus dan gumpalan. Pada daerah deformasi plastik, partikel silikon yang lebih kasar dengan perbandingan yang lebih besar cenderung untuk membelah menjadi partikel yang lebih halus dan berada lurus dengan arah peluncuran. Selanjutnya, daerah MML sedikit lebih tebal, dan mengandung *debris* yang padat, retakan dan bagian dari partikel silikon yang terbelah. Retakan yang dihasilkan pada daerah MML dan partikel silikon yang terbelah seterusnya menggores MML pada

permukaan keausan. Retakan mikro juga didapatkan bernukleasi pada daerah bawah permukaan, retakan mikro ini kemudian bersatu, merambat dan meluas ke daerah MML selama proses pengujian keausan.

Dapat diamati secara jelas, unsur pokok dari MML adalah sebagian besar kaya akan Al dan Fe, O<sub>2</sub> yang rendah, dan kadar silikon yang rendah<sup>[5]</sup>. Sedangkan MML yang mengandung unsur dari kedua bagian luncur yang saling kontak terbentuk pada permukaan keausan.

#### 4.3.4 Analisis Permukaan Keausan (*Worn Surface*)

Gambar 4.11 adalah hasil SEM dari permukaan keausan yang diamati dari sampel hasil uji keausan sampel C2, yang diuji aus dengan menggunakan beban 6.32 kg. Terlihat jelas pada Gambar 4.11 arah luncur pada saat pengujian keausan, guratan-guratan yang terlihat adalah hasil gesekan dari baja perkakas yang digunakan untuk bergesekan dengan benda uji pada saat pengujian keausan. Pada komposisi Ti yang lebih tinggi ini hanya sedikit ditemukan jumlah lubang-lubang yang terjadi akibat gesekan, jika dibandingkan dengan guratan-guratan yang terjadi pada sampel yang belum dimodifikasi seperti penelitian Ching-Yi Yang *et al*<sup>[5]</sup> yang mendapatkan bahwa perbedaan dari permukaan aus antara paduan yang telah dimodifikasi dan belum dimodifikasi terletak pada bentuk dan jumlah lubang yang terlihat pada permukaan aus. Permukaan aus paduan yang telah ditambahkan *modifier* mempunyai karakteristik, yaitu berupa alur-alur keausan yang terus-menerus (tidak terputus) dan adanya tanda goresan. Ciri-ciri tersebut adalah karakteristik dari abrasi, utamanya memperlihatkan kekasaran pada daerah yang saling kontak atau partikel yang sangat halus diantara permukaan yang saling kontak. Dengan bertambahnya tekanan yang diberikan, maka permukaan aus memperlihatkan lubang-lubang yang lebih jelas dan alur-alur keausan. Lubang-lubang pada permukaan aus terbentuk akibat pelepasan dari MML. Lebih dari itu, ukuran dari lubang antara paduan yang telah dimodifikasi dan belum dimodifikasi akan berbeda, lubang-lubang yang terjadi pada sampel yang belum dimodifikasi akan lebih besar jika dibandingkan dengan lubang-lubang yang ada pada sampel yang telah ditambahkan *modifier* Sr.



**Gambar 4.11** Hasil pengujian SEM dari permukaan aus sampel C2, detektor SE, (a) *Low Magnification*, (b) *High Magnification*

K.G Basavakumar *et al*<sup>[29]</sup> mendapatkan pada pemberian beban yang sama paduan yang belum ditambahkan *modifier* akan mengalami retakan yang lebih banyak dibandingkan dengan yang telah ditambahkan *modifier* Sr, kerusakan ini kemungkinan disebabkan oleh abrasi atas terperangkapnya *debris*, dan lapisan pengerasan pengerjaan (*work-hardened*) pada permukaan yang saling kontak atau kekasaran pada baja yang terkena kontak. Retakan akan dimulai pada lapisan yang terkeraskan akibat pengerjaan yang lebih besar terjadi, diawali pada daerah sub-

permukaan. Saat retakan tumbuh dan terhubung dengan yang lain, maka lapisan logam akan terkelupas akibat aus, hal ini juga dimungkinkan bahwa partikel *dispersoid* yang keras atau bagian yang retak darinya secara mekanik tercabut selama pengujian aus. Lalu terbentuk *pinhole* yang bertindak sebagai tempat yang potensial sebagai tempat nukleasi dan pertumbuhan retak, menjadi jalan untuk pengelupasan aus. Selanjutnya, kelebihan dari adanya kenaikan pengerasan pengerjaan (*work hardening*) akan meningkat seiring dengan meningkatnya kadar penghalus butir dan *modifier*. Hal ini menandakan bahwa paduan yang telah ditambahkan penghalus butir dan *modifier* dengan partikel *dispersoid* yang lebih halus akan mengalami pengerasan regangan (*strain hardening*) yang lebih besar.

Sedangkan H.R Lashgari<sup>[30]</sup> mendapatkan, pada pemberian beban yang sama terdapat dua daerah berbeda yang dapat dibedakan pada permukaan aus yaitu rongga atau lubang dan daerah yang halus. Pada daerah yang halus, permukaan memperlihatkan guratan halus dan bentuk seperti bajakan yang menandakan bahwa mekanisme keausan abrasif terjadi pada daerah ini. Pelepasan lapisan dalam membentuk rongga atau lubang mengindikasikan keausan adesif lokal akibat pembentukan dan penghancuran dari sambungan mikro selama peluncuran. Pada pembebanan sebesar 60 N, mekanisme keausan utama diidentifikasi pada pelepasan. Pada beban ini, nukleasi retakan diamati dihubungkan dengan kekosongan nukleasi disekitar partikel seperti partikel silikon *acicular*, yang akhirnya retakan diamati untuk merambat pada kedalaman 10-15  $\mu\text{m}$  di bawah permukaan dan akhirnya mencapai permukaan yang menghasilkan pembentukan debris keausan yang berbentuk seperti serpihan. Dengan adanya penambahan *modifier* Sr, kehancuran dari partikel silikon tidak pernah terjadi dan ini dapat disebabkan oleh konsentrasi tegangan yang lebih rendah pada partikel dengan adanya penambahan *modifier*.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 KESIMPULAN

1. Peningkatan kadar Ti dari 0.055, 0.078, dan 0.087 wt.% dengan kadar Sr 0.02 wt.% akan meningkatkan kekerasan paduan aluminium AC4B.
2. Laju aus dari paduan aluminium AC4B memiliki nilai yang semakin rendah seiring dengan bertambahnya kadar penghalus butir yang diberikan, penurunan nilai laju aus yang terjadi rata-rata dimulai dari komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.055 wt.% Ti (Sampel B) dan memiliki nilai paling rendah pada komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.087 wt.% Ti (Sampel D) untuk setiap beban. Nilai laju aus yang rendah ini menandakan paduan pada butir yang lebih halus akan memiliki ketahanan aus yang lebih baik.
3. Semakin tinggi beban uji aus yang diberikan seharusnya akan meningkatkan laju aus dikarenakan lebih banyak material yang hilang, namun pada penelitian ini tidak ditemukan hal tersebut karena ketidaksempurnaan mesin uji aus pada penggunaan beban tinggi.
4. *Debris* keausan didapatkan menjadi lebih kecil dan mengandung oksida kompleks yang lebih banyak pada paduan yang telah ditambahkan penghalus butir dan *modifier* jika dibandingkan dengan sampel normal (0.0 wt.% Sr dan 0.0 wt.% Ti).
5. Selama pengujian keausan, lapisan MML ada di atas daerah yang terdeformasi plastik. MML ini kaya akan Al, kadar Fe, O<sub>2</sub>, dan silikon yang rendah, dan memegang peranan penting dalam mengatur material yang meluncur pada bidang aus. Kehadiran dari lapisan MML yang stabil akan memberikan ketahanan aus yang lebih baik (laju aus yang lebih rendah).
6. Bentuk dari permukaan aus juga berpengaruh dari bentuk partikel silikon yang ada, sehingga paduan aluminium AC4B yang telah ditambahkan *modifier* Sr akan memberikan efek pada permukaan aus yaitu lubang-lubang menjadi lebih sedikit jika dibandingkan dengan sampel normal.

7. Permukaan keausan yang memperlihatkan guratan halus dan bentuk seperti bajakan menandakan bahwa mekanisme keausan abrasif terjadi pada daerah ini, sedangkan pelepasan lapisan dalam membentuk rongga atau lubang mengindikasikan mekanisme keausan adesif terjadi akibat peluncuran.

## 5.2 SARAN

Adapun saran yang dapat diberikan adalah :

1. Untuk mesin uji aus sebaiknya dikalibrasi kembali agar pengujian yang dilakukan baik oleh mahasiswa maupun perusahaan dari luar yang meminta jasa dari jurusan akan mendapatkan data yang lebih valid dari hasil pengujian ini.
2. Untuk penelitian selanjutnya dengan menggunakan variabel sampel yang sama, pastikan bentuk dan ukuran dari sampel yang akan di uji keausan memiliki bentuk dan ukuran yang cukup agar pengujian yang dilakukan dapat berjalan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Kaufman, Gilbert J, Elwin L. Rooy. *Aluminum Alloy Casting : Properties, Processes, and Applications*. Ohio : ASM Internasional (The Materials Information Society). 2005.
2. Gruzleski, John E; Closset, Bernard M. *The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys*. Illinois : American Foundrymen Society, 1999.
3. Mondolfo, L.F. *Aluminium Alloys : Structure and Properties*. London : Butterworth.1979.
4. Falah, M. Azi. *Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt% Sr dan 0.063, 0.083, dan 0.108 wt% Ti Terhadap Karakteristik Paduan Aluminium AC4B Hasil Proses Low Pressure Die Casting*. Depok : Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. 2009.
5. Yang Ching-Yi, Lee Sheng-long, Lee Cheng-Kuo, Lin Jing-Chie. *Effects of Sr and Sb modifiers on the sliding wear behavior of A357 alloy under varying pressure and speed conditions*. *Journal of Material Science and Engineering*. *Wear* 261 (2006) 1348-1358.
6. B.N. Pramila Bai, S.K. Biswas. *Scanning electron microscopy study of worn Al-Si alloy surfaces*. *Journal of Material Science and Engineering*. *Wear* 87 (1983) 237-249.
7. [http://id.wikipedia.org/wiki/Cylinder\\_head/](http://id.wikipedia.org/wiki/Cylinder_head/) , diakses pukul 16.00/ 23 Mei 2009.
8. William D. Callister, jr, *Material Science and Engineering* (Utah: John Wiley & son,inc,1997)
9. Surdia, T. Chijiwa K. (1991). *Teknik Pengecoran Logam*, Jakarta: Pradnya Paramita.
10. ASM International. (1988). *ASM Handbook volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Metal Park, Ohio: ASM International.
11. Hatch, John E. *Aluminium Properties and Physical Metallurgy*. American Society for Metals : Metal Parks, Ohio. 1995.

12. ASM Handbook, *Casting*, Volume 15. Ohio : ASM International Metals Park. 1992.
13. Polmear, I.J. (2006). *Light Alloys : Metallurgy of the Light Metals*. Fourth Edition. Oxford : Butterworth-Heinemann.
14. Metallurg Aluminum. (1998). *A Guide to Melt Treatment in the Aluminum Foundry*. (n.d). London and Scandinavian Metallurgical.
15. Backeurd, Lennart; Chai, Goucai; Tamminen, Jarmo. *Solidification Characteristics of Aluminium Alloys : Volume 2 Foundry Alloys*. Stockholm : Skan Aluminium.1990.
16. ASM International. (1993). *ASM Specialty Handbook : Aluminum and Aluminum Alloys*. Ohio: American Society for Metals.
17. JIS Handbook. (1977). *Non Ferrous Metals & Metallurgy*. Tokyo: Japanese Standard Association.
18. Jorstad, John.L, Rasmussen, Wayne.M. (1993). *Aluminum Casting Technology-2nd edition*. Illinois: The American Foundry Society.
19. Bringas, John E. (2003). *Nonferrous Metals 4th Edition*. Kanada: CASTI Publishing.
20. Davis, J.R. (2001). *Alloying: Understanding The Basic*. Ohio: ASM International.
21. Suharno, Bambang. (2007). *Pengecoran Logam Aluminium*. Depok : Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
22. Key to Metals. (n.d). *Aluminum and Aluminum Alloys Casting Problems*. Oktober 10, 2008. <http://www.key-to-nonferrous.com>
23. *Babbit Alloys or Plain Bearing*. International Tin Research Institute. Publication No.149.(dalam skripsi: Sitorus, Reko. *Pengaruh Kadar Cu (4%-6%) Pada Paduan Sn-Sb Terhadap Sifat Mekanis dan Laju Keausan*. Depok : Jurusan Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. 1990.)
24. West, E.G., *Copper and Its Alloy*, Ellis Horwood Ltd., (this series), 1982. (dalam skripsi: Sitorus, Reko. *Pengaruh Kadar Cu (4%-6%) Pada Paduan Sn-Sb Terhadap Sifat Mekanis dan Laju Keausan*. Depok : Jurusan Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. 1990.)

25. Robinowicz, E., Kragelskii, I.V., *Friction and Wear*. Butterworth, London 1973. (dalam skripsi: Sitorus, Reko. *Pengaruh Kadar Cu (4%-6%) Pada Paduan Sn-Sb Terhadap Sifat Mekanis dan Laju Keausan*. Depok : Jurusan Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. 1990.)
26. ASM Handbook, *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, volume 18. Ohio : ASM International Metals Park. 1992.
27. Neale, M.J. *Tribology Handbook*. Butterworth, London 1973. (dalam skripsi: Sitorus, Reko. *Pengaruh Kadar Cu (4%-6%) Pada Paduan Sn-Sb Terhadap Sifat Mekanis dan Laju Keausan*. Depok : Jurusan Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. 1990.)
28. Stachowiak, Gwidon W. *Wear- Materials, Mechanisms, and Practice*. John Wiley & Sons, Ltd. 2005.
29. Basavakumar, K.G., Mukunda, P.G., Chakraborty, M., *Influence of grain refinement and modification on dry sliding wear behavior of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu cast alloys*. *Journal of Materials Processing Technology* 186 (2007) 236-245.
30. Lashgari, H.R., Sufizadeh, A.R., Emany, M. *The effect of strontium on the microstructure and wear properties of A356-10%B<sub>4</sub>C cast composites*. *Journal of Materials and Design* (2010) 2187-2195.
31. <http://www.300cforums.com/forums/srt8-specific-wheels-tires-brakes-suspension/58807-brembo-caliper-piston-corrosion.html> , diakses pada tanggal 15 Juni 2010 pukul 16.51 WIB.
32. Rao, A.K Prasada. Das, Karabi. Murty B.S. Chakraborty M. *Effect of Grain Refinement on Wear properties of Al and Al-7Si Alloy*. *Journal of Material Science*. *Wear* 257 (2004) 148-153.

## LAMPIRAN 1. Hasil Uji Komposisi Kimia Sampel A



CENTER FOR MATERIALS PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS  
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL-UNIVERSITAS INDONESIA  
**LABORATORIUM UJI MATERIAL**

Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia  
Phone : 021 - 788 49045, 786 3510 Fax : 021 - 78888 111, 7872 350 E-mail : cmpfa@metal.ui.ac.id, cmpfa.ui@gmail.com

**LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA**  
**COMPOSITION TEST REPORT**

Page 1 of 4

<b>No Laporan</b> <i>Report Nr</i>	0281 R	<b>Bahan</b> <i>Material</i>	Aluminum
<b>Pemakai Jasa</b> <i>Customer</i>	Mashudi Dart	<b>Identitas Bahan</b> <i>Material Identity</i>	Normal
<b>Alamat</b> <i>Address</i>	Departemen Metalurgi & Material FTUI	<b>Tanggal Terima</b> <i>Receiving Date</i>	March 8 <sup>th</sup> , 2010
<b>No Kontrak</b> <i>Contract Nr.</i>	0281/PT.02/FT04/P/2010	<b>Standar</b> <i>Standard</i>	ASTM E 34-94
<b>Tanggal Uji</b> <i>Date of Test</i>	March 11 <sup>th</sup> , 2010	<b>Mesin Uji</b> <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer

<b>Kode Sampel</b> <i>Sample Code</i>	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Sr (%)
Normal	9.58	0.746	2.78	0.307	0.261	0.555	< 0.0001
	Ti (%)	Cr (%)	Ni (%)	Pb (%)	Sn (%)	V (%)	Al (%)
	0.028	0.018	0.068	0.050	0.023	0.010	85.50

Depok, March 12<sup>th</sup>, 2010  
LABORATORIUM UJI MATERIAL  
Technical Manager,

(Ahmad Ivan Karayan, ST, M.Eng)

FF-26/Met-UI Rev 0

## LAMPIRAN 2. Hasil Uji Komposisi Kimia Sampel B



CENTER FOR MATERIALS PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS  
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL-UNIVERSITAS INDONESIA  
**LABORATORIUM UJI MATERIAL**

Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia  
Phone : 021 - 788 49045, 786 3510 Fax : 021 - 78888 111, 7872 350 E-mail : cmpfa@metal.ui.ac.id, cmpfa.ui@gmail.com

LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA  
COMPOSITION TEST REPORT

Page 2 of 4

<b>No Laporan</b> <i>Report Nr</i>	0281 R	<b>Bahan</b> <i>Material</i>	Aluminum
<b>Pemakai Jasa</b> <i>Customer</i>	Mashudi Darta	<b>Identitas Bahan</b> <i>Material Identity</i>	0.063% Wt Ti
<b>Alamat</b> <i>Address</i>	Departemen Metalurgi & Material FTUI	<b>Tanggal Terima</b> <i>Receiving Date</i>	March 8 <sup>th</sup> , 2010
<b>No Kontrak</b> <i>Contract Nr.</i>	0281/PT.02/FT04/P/2010	<b>Standar</b> <i>Standard</i>	ASTM E 34-94
<b>Tanggal Uji</b> <i>Date of Test</i>	March 11 <sup>th</sup> , 2010	<b>Mesin Uji</b> <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer

<b>Kode Sampel</b> <i>Sample Code</i>	<b>Si</b> <i>(%)</i>	<b>Fe</b> <i>(%)</i>	<b>Cu</b> <i>(%)</i>	<b>Mn</b> <i>(%)</i>	<b>Mg</b> <i>(%)</i>	<b>Zn</b> <i>(%)</i>	<b>Sr</b> <i>(%)</i>
<b>0.063% Wt Ti</b>	8.80	0.728	2.54	0.327	0.237	0.671	0.018
	<b>Ti</b> <i>(%)</i>	<b>Cr</b> <i>(%)</i>	<b>Ni</b> <i>(%)</i>	<b>Pb</b> <i>(%)</i>	<b>Sn</b> <i>(%)</i>	<b>V</b> <i>(%)</i>	<b>Al</b> <i>(%)</i>
	0.055	0.018	0.075	0.064	0.021	0.008	86.4

Depok, March 12<sup>th</sup>, 2010  
LABORATORIUM UJI MATERIAL  
Technical Manager,

(Ahmad Ivan Karayan, ST, M.Eng)

FF-26/Met-UI Rev 0

## LAMPIRAN 3. Hasil Uji Komposisi Kimia Sampel C



**CENTER FOR MATERIALS PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS**  
**DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL-UNIVERSITAS INDONESIA**  
**LABORATORIUM UJI MATERIAL**

Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia  
 Phone : 021 - 788 49045, 786 3510 Fax : 021 - 78888 111, 7872 350 E-mail : cmpfa@metal.ui.ac.id, cmpfa.ui@gmail.com

**LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA**  
**COMPOSITION TEST REPORT**

Page 3 of 4

No Laporan <i>Report Nr</i>	0281 R	Bahan <i>Material</i>	Aluminum
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Mashudi Darta	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	0.083% Wt Ti
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi & Material FTUI	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	March 8 <sup>th</sup> , 2010
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0281/PT.02/FT04/P/2010	Standar <i>Standard</i>	ASTM E 34-94
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	March 11 <sup>th</sup> , 2010	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Sr (%)
0.083% Wt Ti	9.28	0.668	2.61	0.258	0.223	0.693	0.019
	Ti (%)	Cr (%)	Ni (%)	Pb (%)	Sn (%)	V (%)	Al (%)
	0.078	0.019	0.065	0.057	0.030	0.009	85.9

Depok, March 12<sup>th</sup>, 2010  
 LABORATORIUM UJI MATERIAL  
 Technical Manager,

  
  
 Center for Materials Processing and Failure Analysis

(Ahmad Ivan Karayan, ST, M.Eng)

FF-26/Met-UI Rev 0

## LAMPIRAN 4. Hasil Uji Komposisi Kimia Sampel D



CENTER FOR MATERIALS PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS  
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL-UNIVERSITAS INDONESIA

### LABORATORIUM UJI MATERIAL

Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia

Phone : 021 - 788 49045, 786 3510 Fax : 021 - 78888 111, 7872 350 E-mail : cmpfa@metal.ui.ac.id, cmpfa.ui@gmail.com

#### LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA COMPOSITION TEST REPORT

Page 4 of 4

No Laporan <i>Report Nr</i>	0281 R	Bahan <i>Material</i>	Aluminum
Pemakai Jasa <i>Customer</i>	Mashudi Darta	Identitas Bahan <i>Material Identity</i>	0.108% Wt Ti
Alamat <i>Address</i>	Departemen Metalurgi & Material FTUI	Tanggal Terima <i>Receiving Date</i>	March 8 <sup>th</sup> , 2010
No Kontrak <i>Contract Nr.</i>	0281/PT.02/FT04/P/2010	Standar <i>Standard</i>	ASTM E 34-94
Tanggal Uji <i>Date of Test</i>	March 11 <sup>th</sup> , 2010	Mesin Uji <i>Testing machine</i>	Optical Emission Spectrometer

Kode Sampel <i>Sample Code</i>	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Sr (%)
0.108% Wt Ti	9.83	0.754	2.77	0.257	0.257	0.692	0.020
	Ti (%)	Cr (%)	Ni (%)	Pb (%)	Sn (%)	V (%)	Al (%)
	0.087	0.022	0.071	0.056	0.023	0.011	85.10

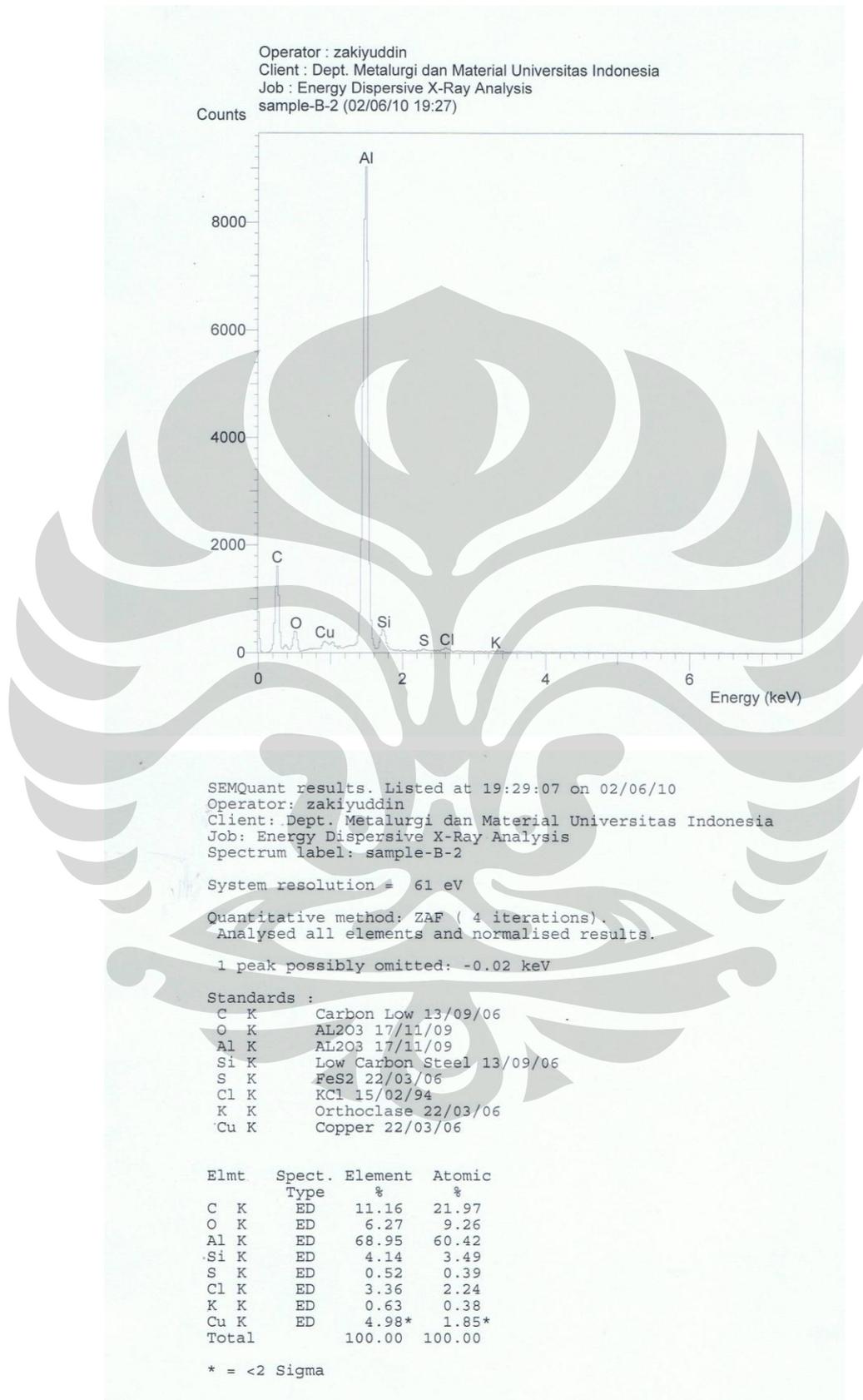
Depok, March 12<sup>th</sup>, 2010  
LABORATORIUM UJI MATERIAL  
Technical Manager,

(Ahmad Ivan Karayan, ST, M.Eng)

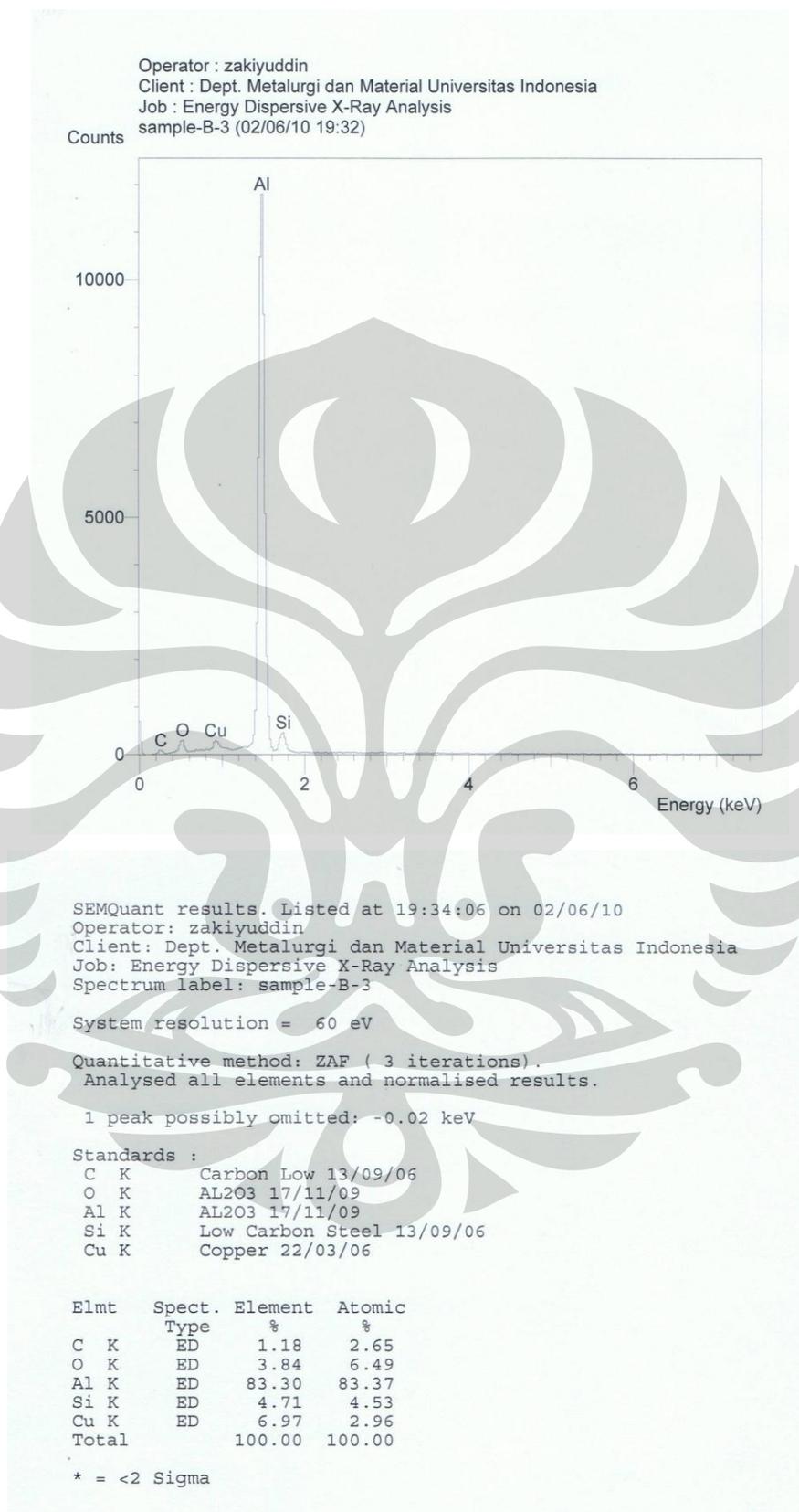
### LAMPIRAN 5. Hasil Pengujian EDAX Sampel A2



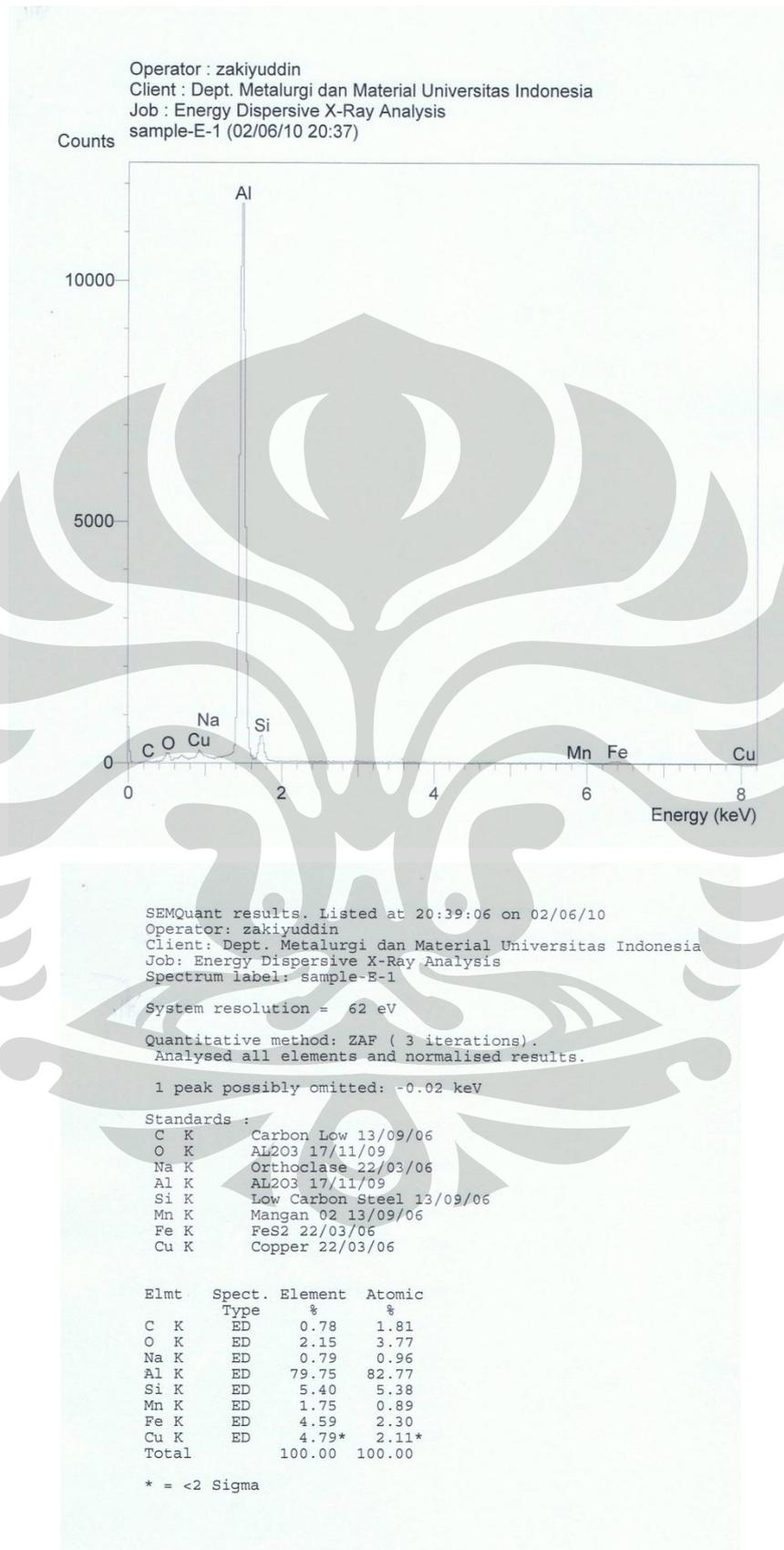
### LAMPIRAN 5. Hasil Pengujian EDAX Sampel A2 (Lanjutan)



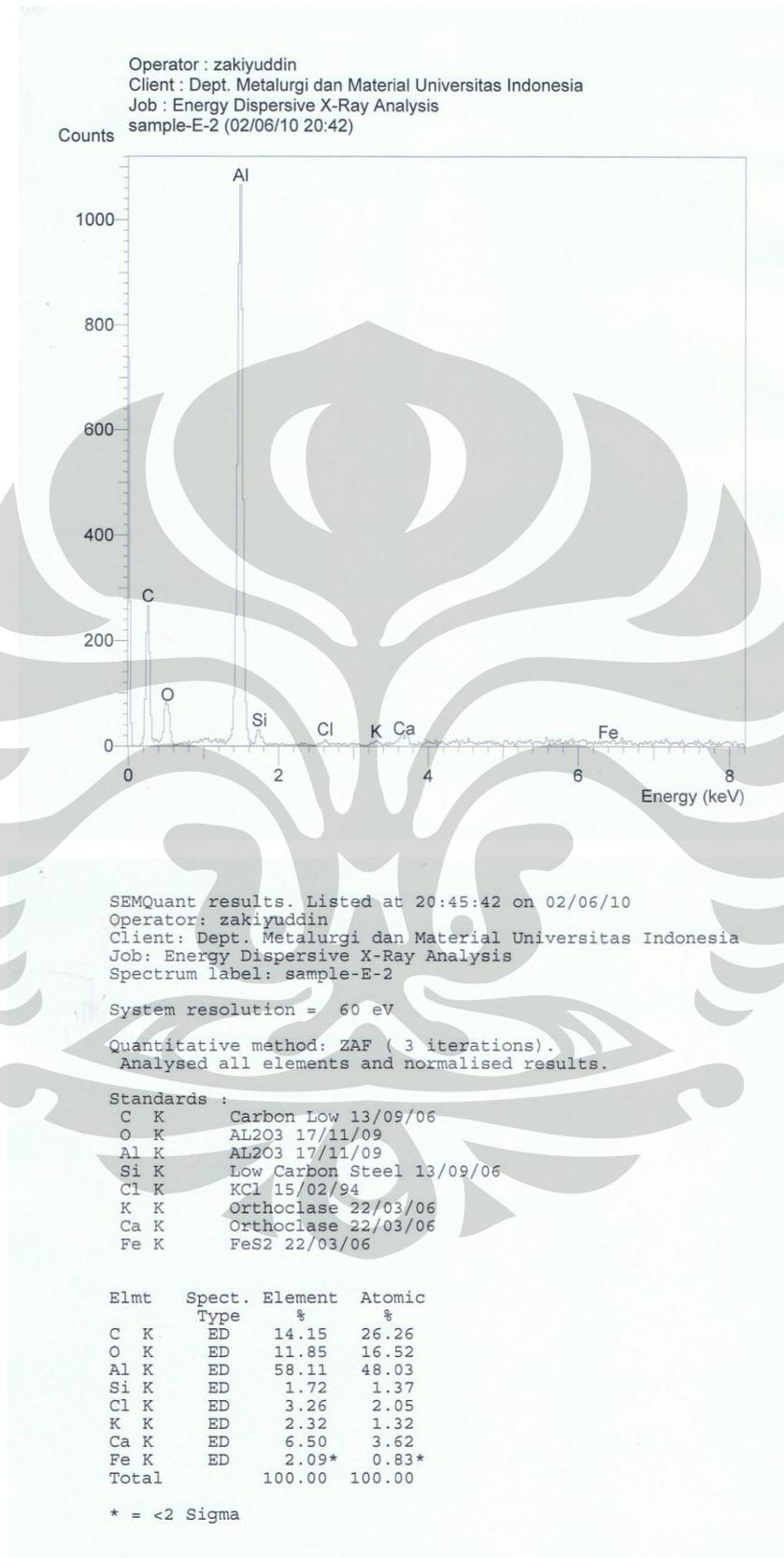
### LAMPIRAN 5. Hasil Pengujian EDAX Sampel A2 (Lanjutan)



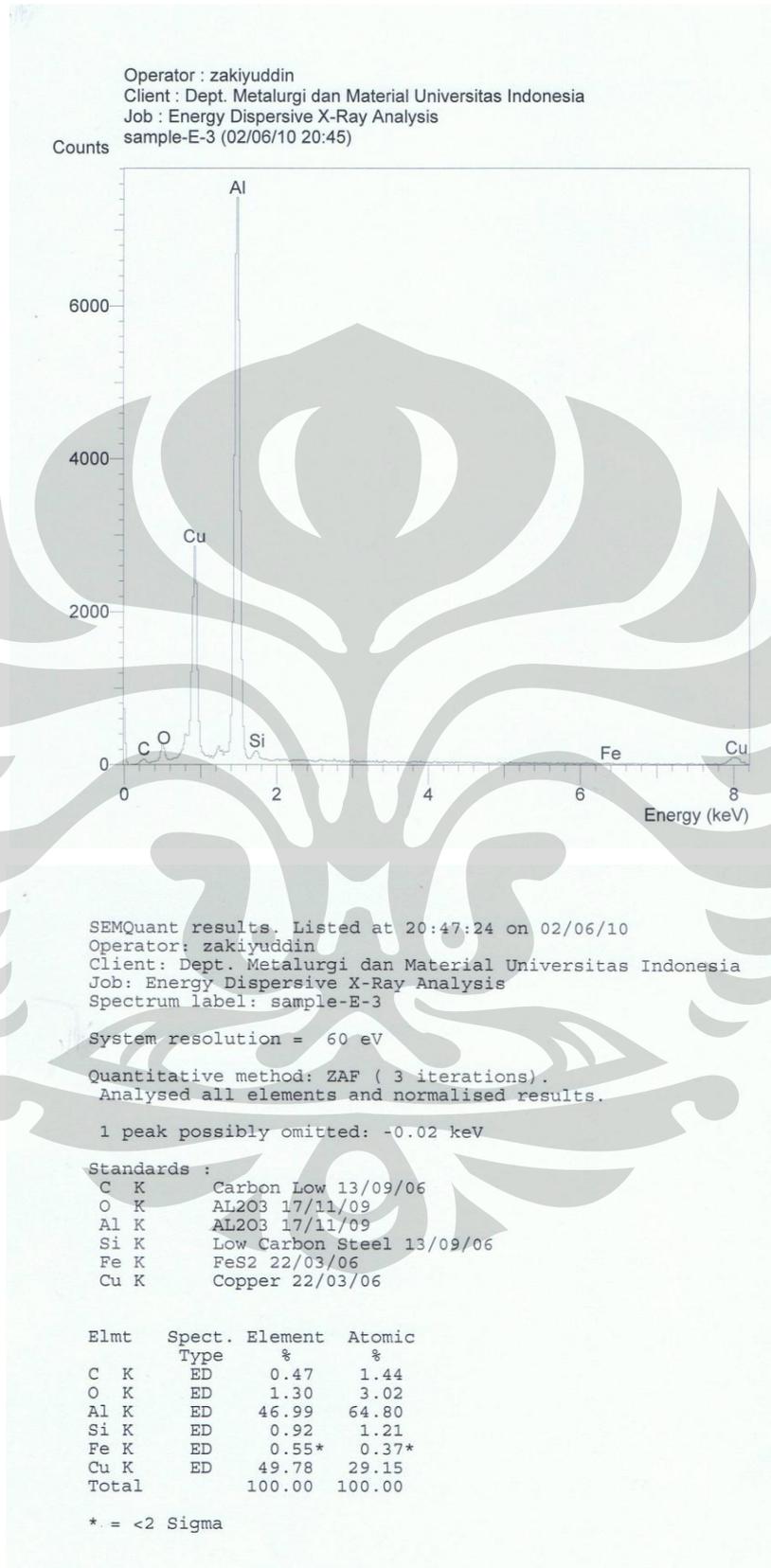
### LAMPIRAN 6. Hasil Pengujian EDAX Sampel B2



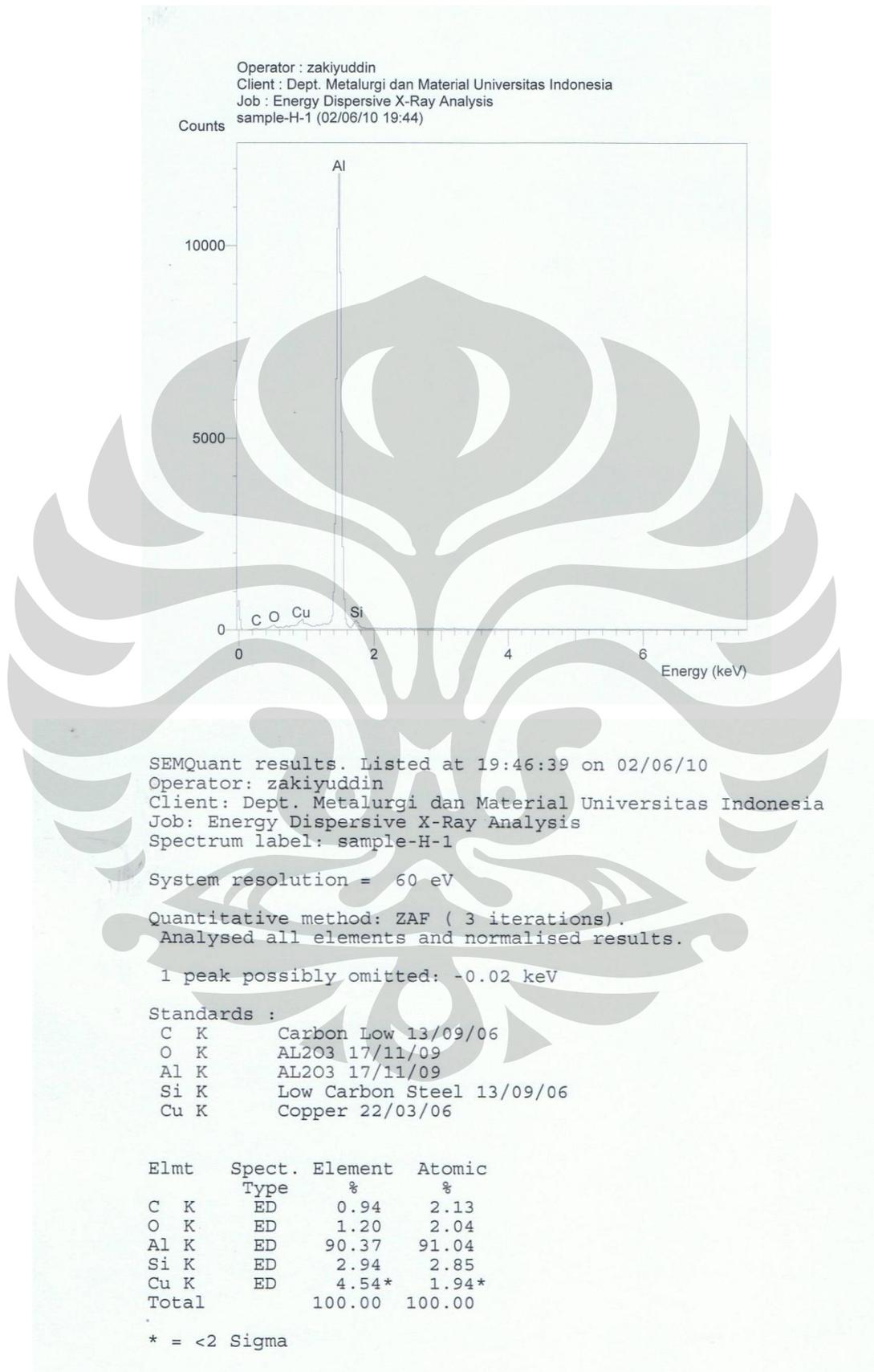
### LAMPIRAN 6. Hasil Pengujian EDAX Sampel B2 (Lanjutan)



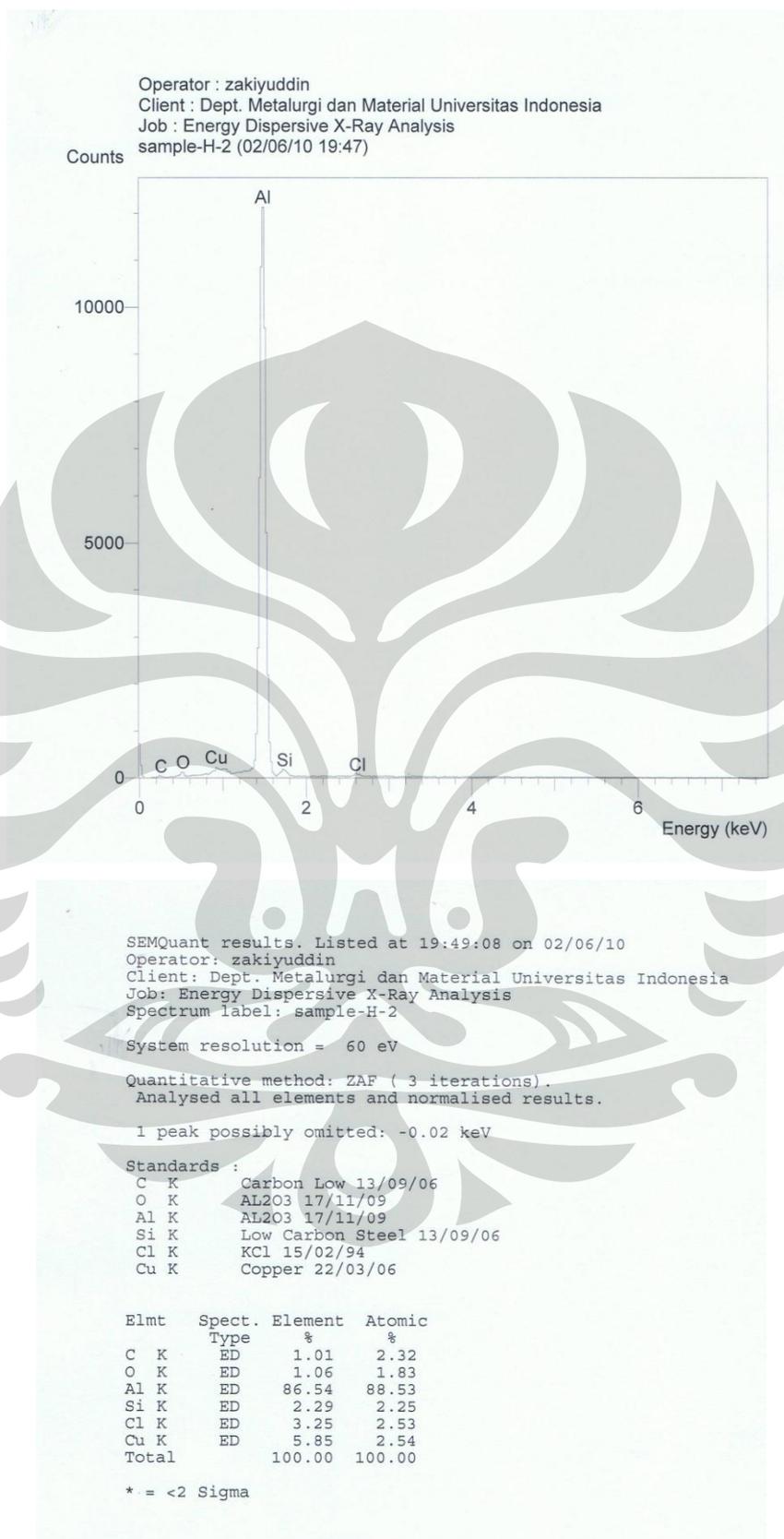
### LAMPIRAN 6. Hasil Pengujian EDAX Sampel B2 (Lanjutan)



### LAMPIRAN 7. Hasil Pengujian EDAX Sampel C2



### LAMPIRAN 7. Hasil Pengujian EDAX Sampel C2 (Lanjutan)



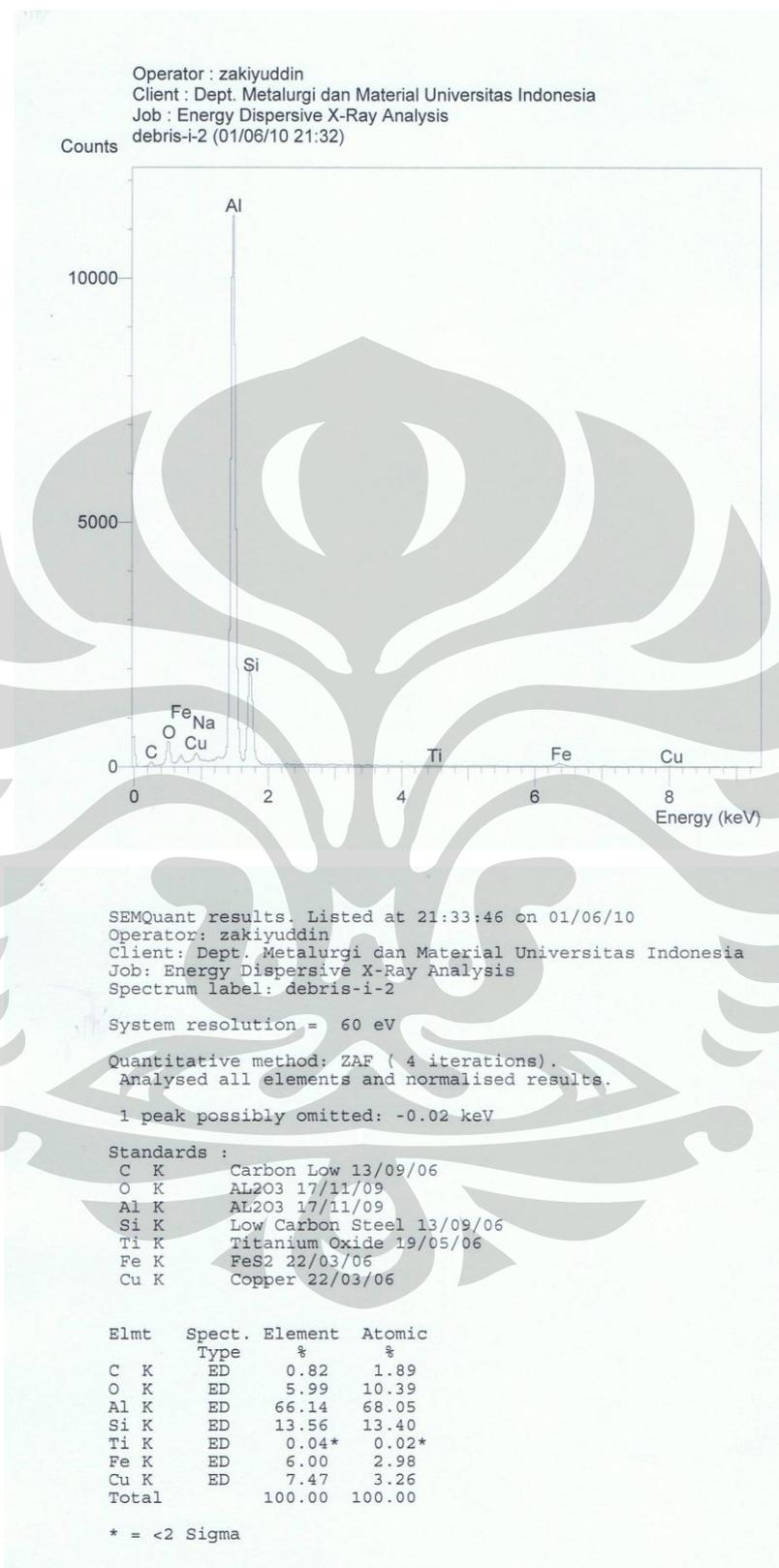
### LAMPIRAN 7. Hasil Pengujian EDAX Sampel C2 (Lanjutan)



### LAMPIRAN 8. Hasil Pengujian EDAX Sampel C3



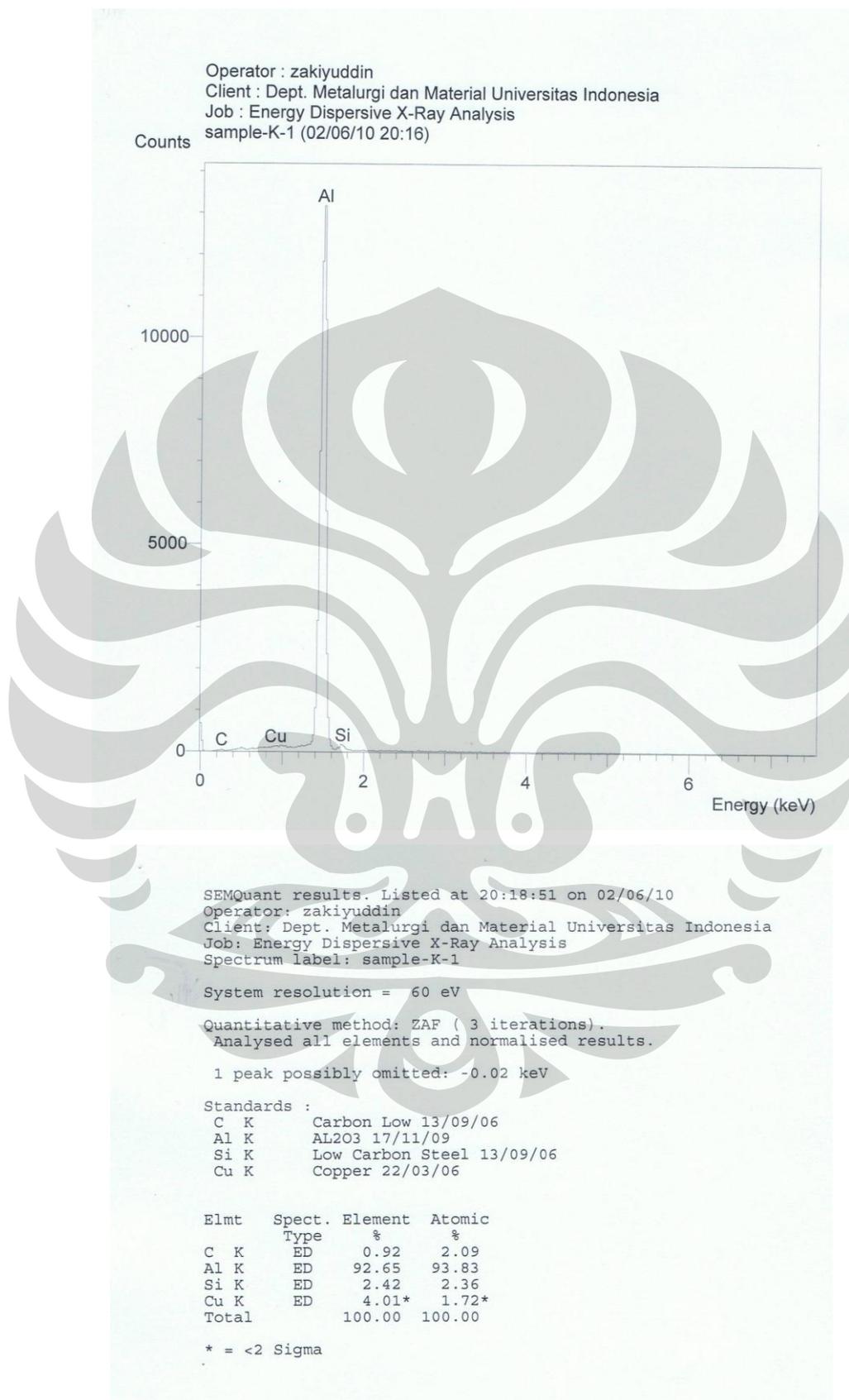
### LAMPIRAN 8. Hasil Pengujian EDAX Sampel C3 (Lanjutan)



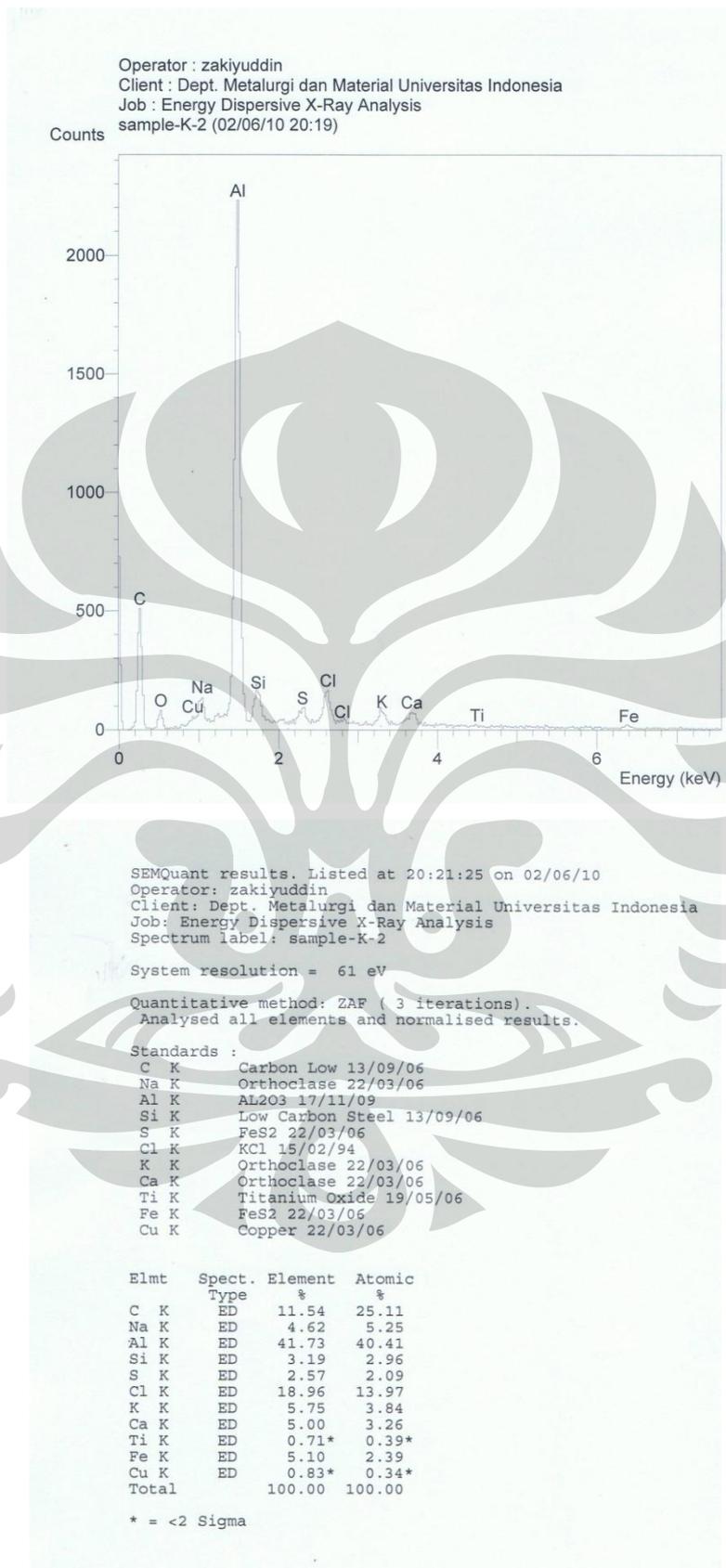
### LAMPIRAN 8. Hasil Pengujian EDAX Sampel C3 (Lanjutan)



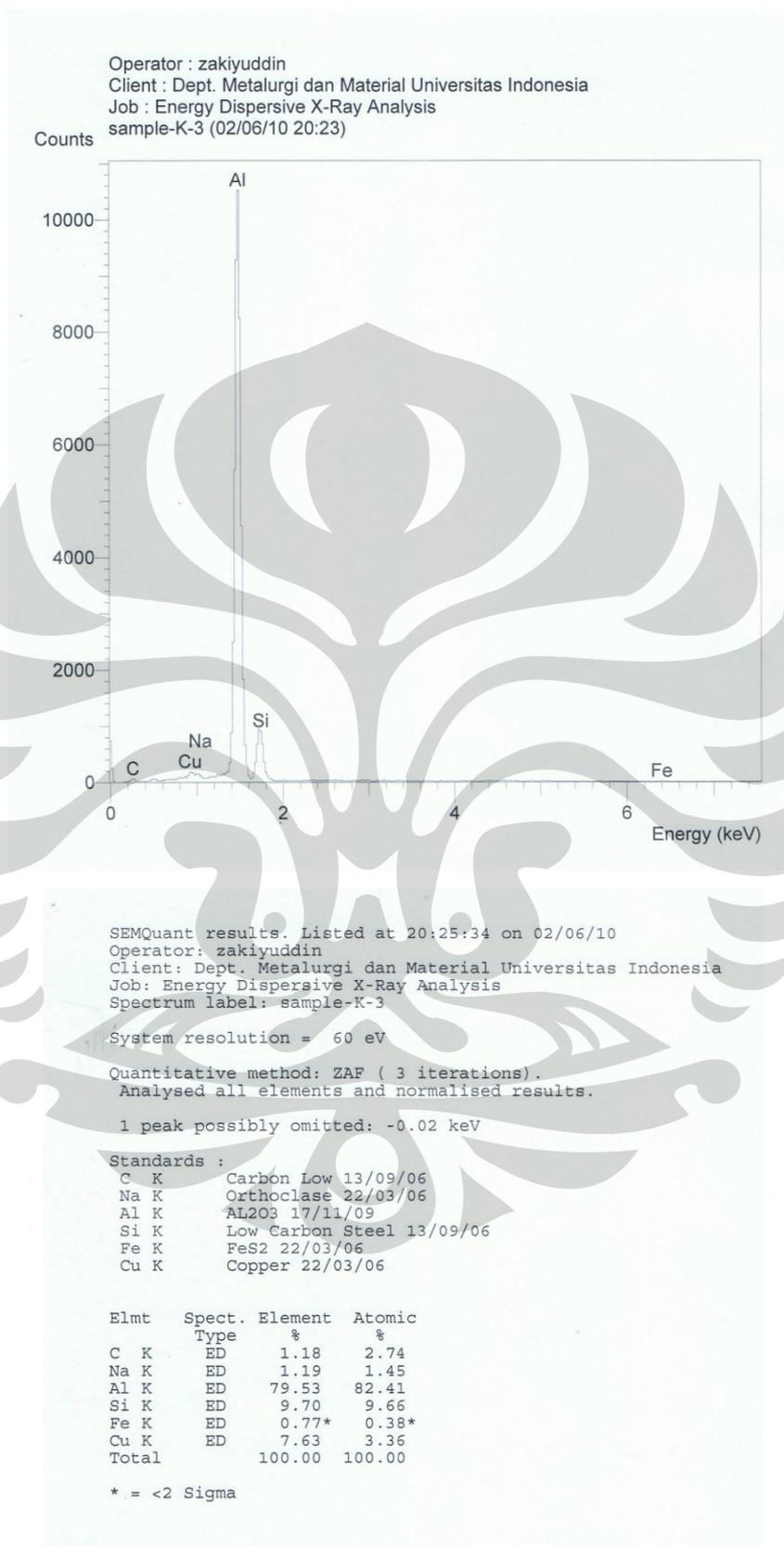
### LAMPIRAN 9. Hasil Pengujian EDAX Sampel D2



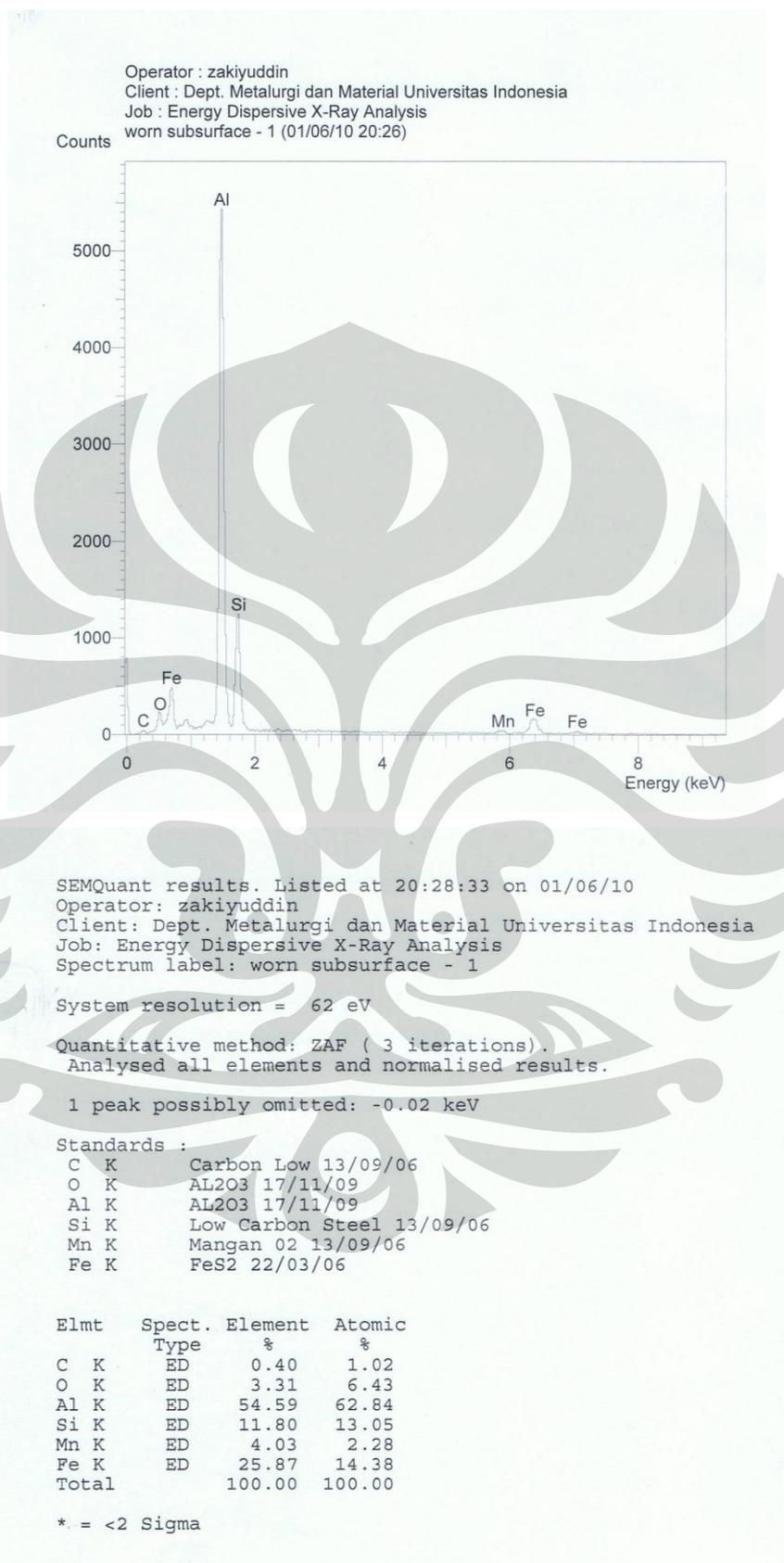
### LAMPIRAN 9. Hasil Pengujian EDAX Sampel D2 (Lanjutan)



### LAMPIRAN 9. Hasil Pengujian EDAX Sampel D2 (Lanjutan)



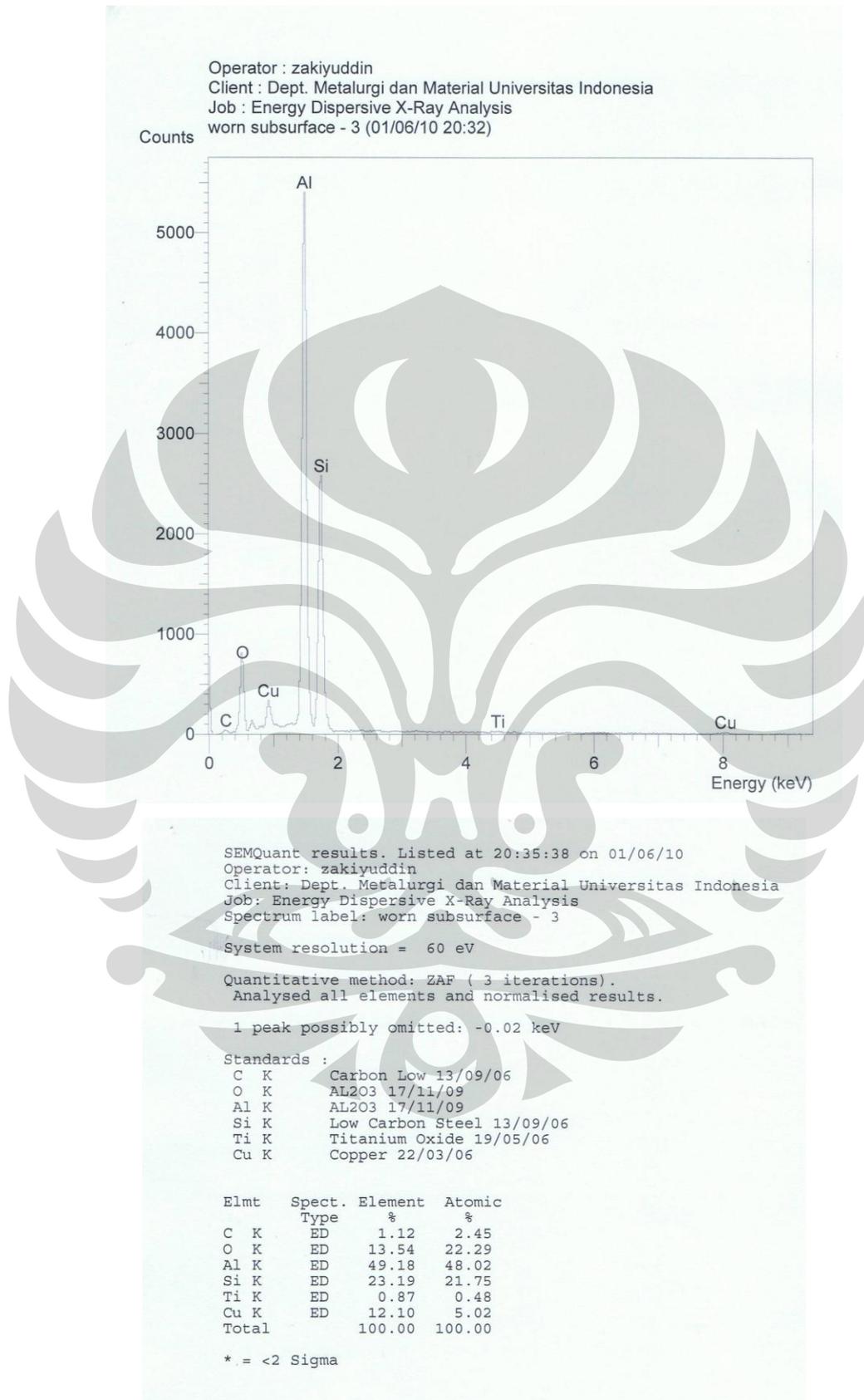
### LAMPIRAN 10. Hasil Pengujian EDAX Sub-Permukaan Sampel C2



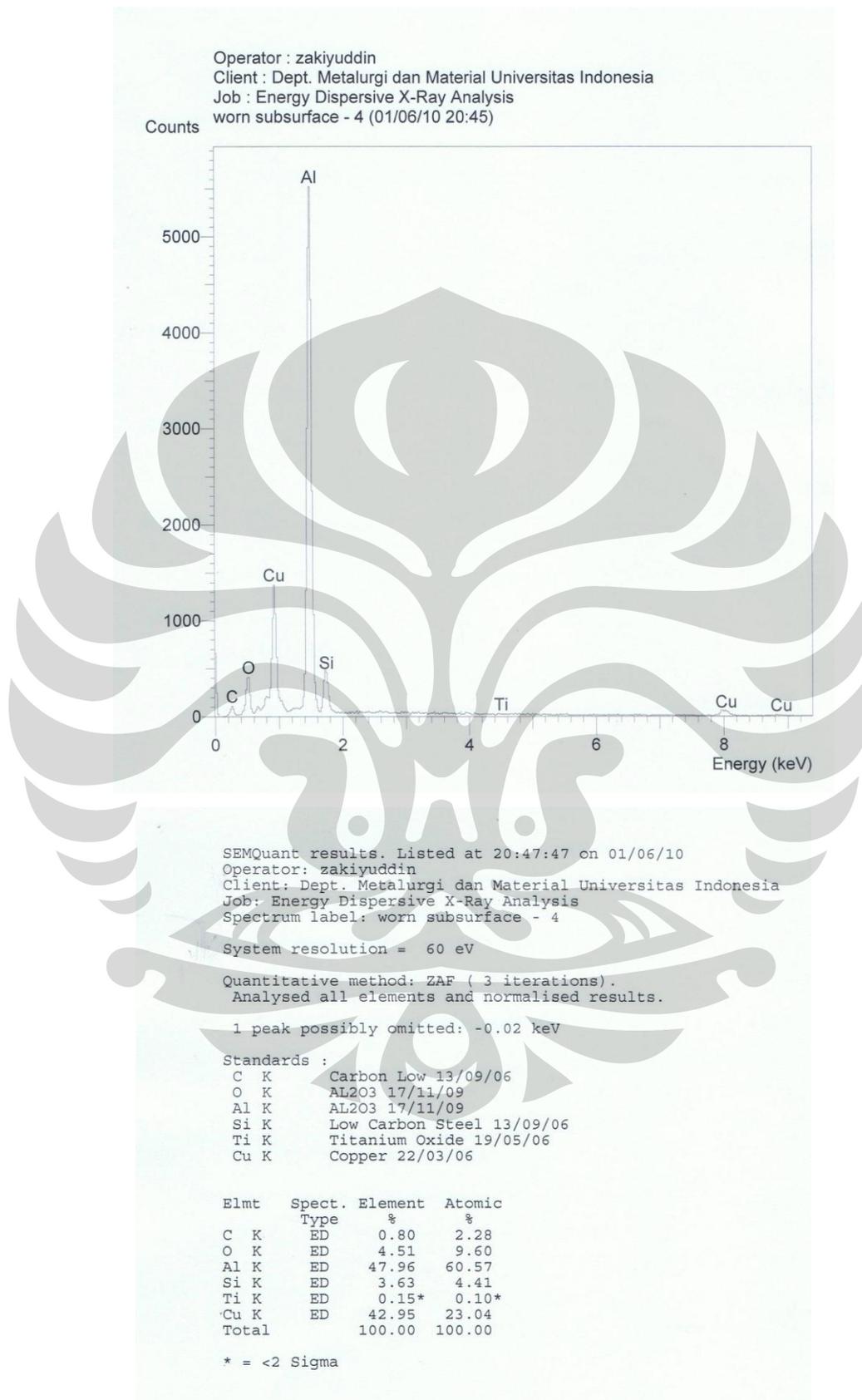
**LAMPIRAN 10.** Hasil Pengujian EDAX Sub-Permukaan Sampel C2 (Lanjutan)



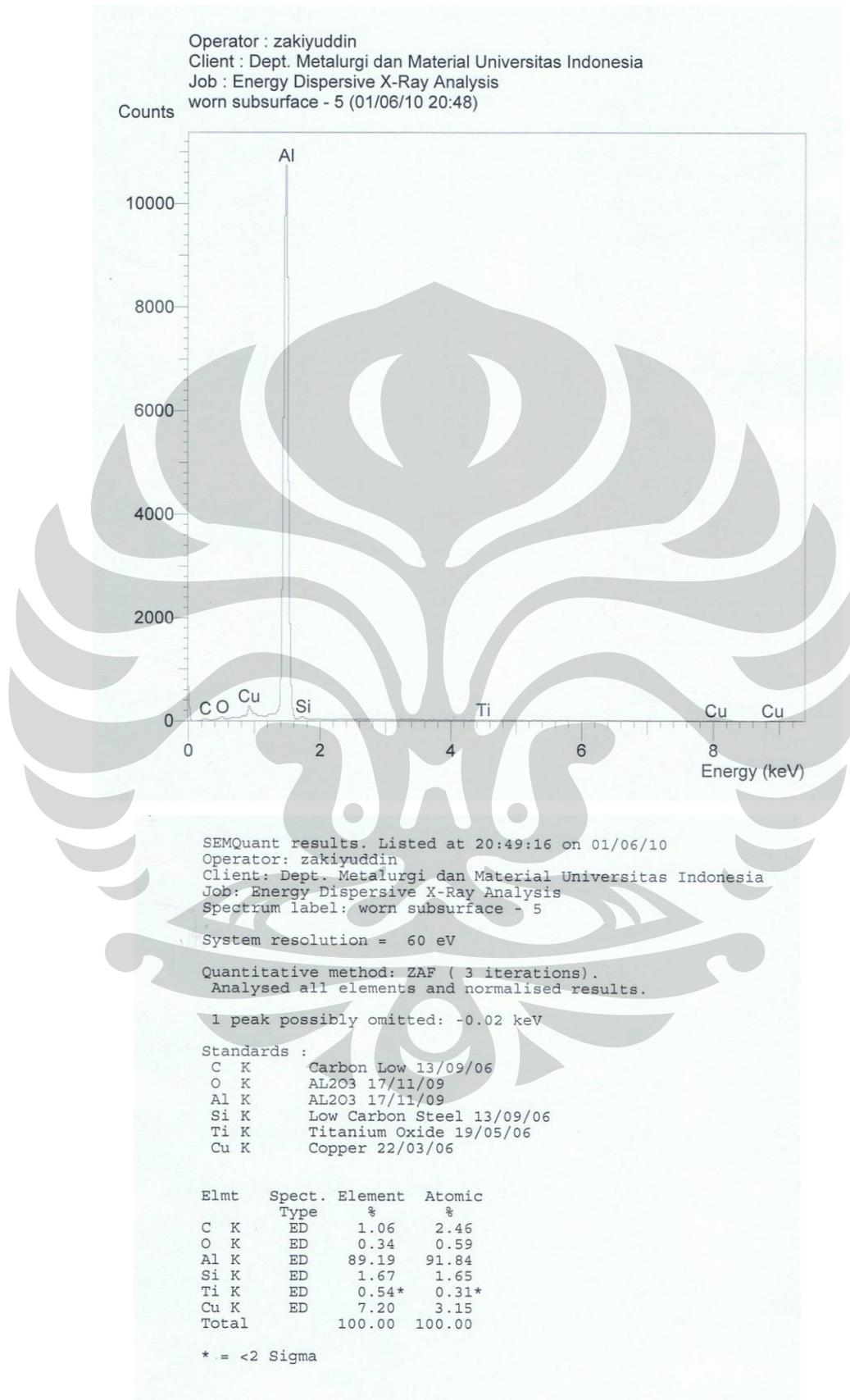
**LAMPIRAN 10.** Hasil Pengujian EDAX Sub-Permukaan Sampel C2 (Lanjutan)



**LAMPIRAN 10.** Hasil Pengujian EDAX Sub-Permukaan Sampel C2 (Lanjutan)



**LAMPIRAN 10.** Hasil Pengujian EDAX Sub-Permukaan Sampel C2 (Lanjutan)



**LAMPIRAN 11.** Tabel Data Hasil Uji Keausan dan Kekerasan

Tabel Hasil Uji Aus

Komposisi (wt.% Ti)	Beban (kg)	Laju Aus ( $10^{-5}$ mm <sup>3</sup> /mm)			average	standar deviasi
0	2,11	1,4	2,78	2,19	2,12	0,69
	6,32	2,39	3,76	2,24	2,79	0,83
	18,96	1,79	1,6	1,42	1,6	0,18
0,055	2,11	2,8	2,02	3,07	2,63	0,54
	6,32	3,37	2,52	2,21	2,70	0,60
	18,96	2,16	2,58	2,12	2,28	0,25
0,078	2,11	1,84	2,83	2,97	2,54	0,61
	6,32	1,73	1,65	1,71	1,69	0,04
	18,96	1,08	1,1	1,15	1,11	0,03
0,087	2,11	2,41	2,26	2,38	2,35	0,07
	6,32	1,62	1,58	1,85	1,68	0,14
	18,96	2,55	1,15	1,09	1,12	0,04

Tabel Hasil Uji Kekerasan

Komposisi (wt.% Ti)	Kekerasan (HRB)					Average	Standar Deviasi
	1	2	3	4	5		
0	40,6	43,3	41,7	40,5	43,2	41,86	1,35
0,063	40,1	41,1	42,4	41,4	41,9	41,38	0,87
0,083	46,5	48,1	50,5	51,1	68,6	52,96	8,93
0,108	63,9	73,4	50,3	49,5	52,3	57,88	10,43