



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH WAKTU TAHAN LELEHAN PADUAN  
ALUMINIUM AC4B DENGAN KANDUNGAN  
0.123 wt. % Ti DAN 0.003 wt. % Sr  
TERHADAP EFEKTIVITAS PENGHALUSAN BUTIR  
DAN MODIFIKASI SILIKON EUTEKTIK**

**SKRIPSI**

**ALFARISI  
0606074546**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
DESEMBER 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH WAKTU TAHAN LELEHAN PADUAN  
ALUMINIUM AC4B DENGAN KANDUNGAN  
0.123 wt. % Ti DAN 0.003 wt. % Sr  
TERHADAP EFEKTIVITAS PENGHALUSAN BUTIR  
DAN MODIFIKASI SILIKON EUTEKTIK**

**SKRIPSI**

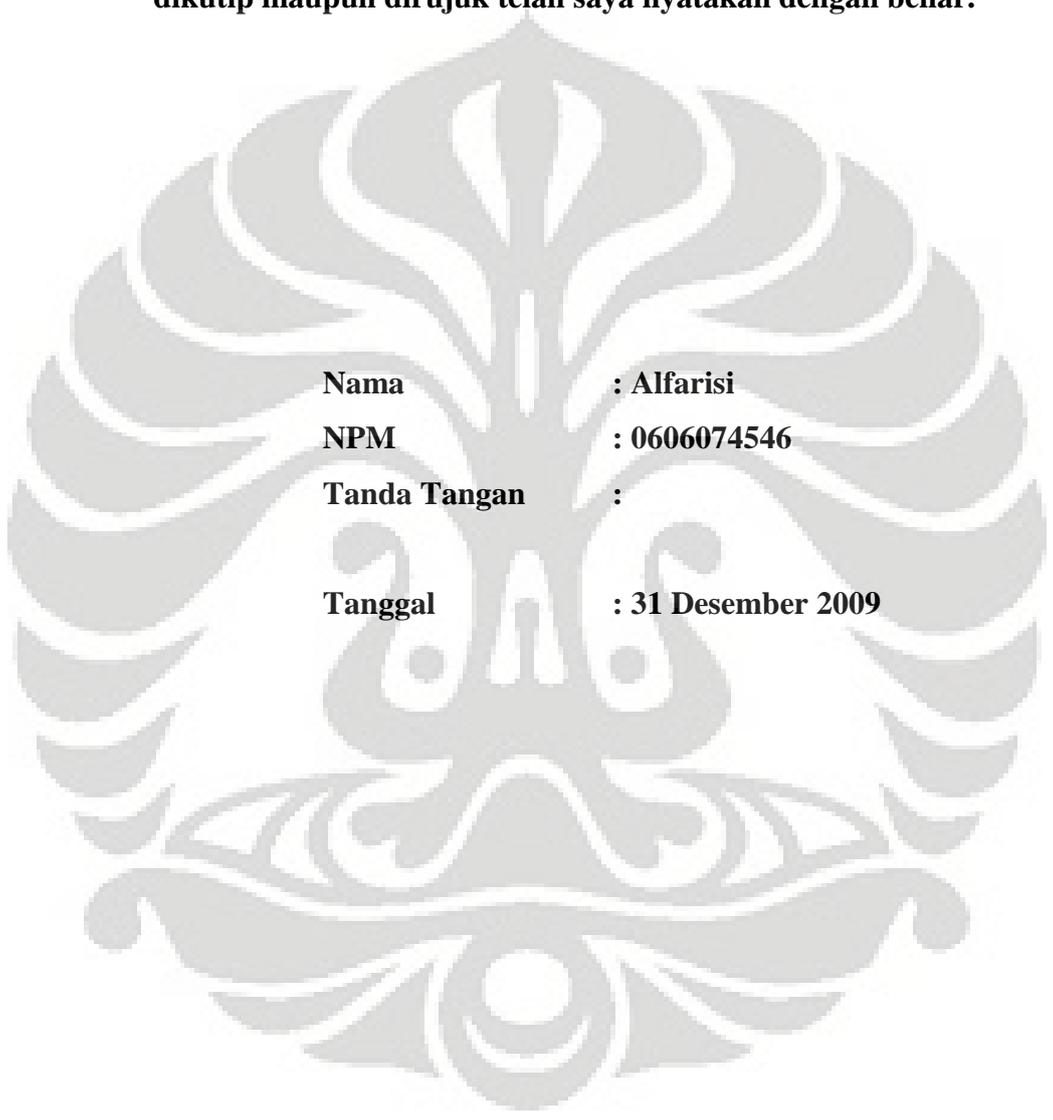
**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**ALFARISI  
0606074546**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
DESEMBER 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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



**Nama : Alfarisi**  
**NPM : 0606074546**  
**Tanda Tangan :**  
**Tanggal : 31 Desember 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Alfarisi  
NPM : 0606074546  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Waktu Tahan Lelehan Paduan  
Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. %  
Ti dan 0.003 wt. % Sr terhadap Efektivitas  
Penghalusan Butir dan Modifikasi Silikon Eutektik

**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 : Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Si (.....)  
Penguji 1 : Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng (.....)  
Penguji 2 : Ir. Rusman Kosasih (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 31 Desember 2009

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi yang berjudul **“Studi Pengaruh Waktu Tahan Lelehan Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr terhadap Efektivitas Penghalusan Butir dan Modifikasi Silikon Eutektik”** ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) pihak PT. AHM (Bapak Andhika, Bapak Hartono, Bapak Rizal, Bapak Asep, Bapak Hendra, Bapak Januar, Bapak Mul, Bapak Agus) yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data-data yang saya perlukan;
- (3) Almarhum ayah saya, ibu saya, kakak Beny, Iwan, Iis, Jihat dan adik saya Rahmi yang telah memberikan do'a, bantuan, dan dukungan baik moral maupun material; dan
- (4) The AHM'ers Azi, Nike dan Edo serta semua sahabat saya yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu metalurgi dan material ke depan.

Depok, 31 Desember 2009

Penulis

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

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Alfarisi  
NPM : 0606074546  
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 Waktu Tahan Lelehan Paduan Aluminium AC4B  
dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr  
terhadap Efektivitas Penghalusan Butir dan Modifikasi Silikon Eutektik

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 : Depok  
Pada tanggal : 31 Desember 2009

Yang menyatakan

(Alfarisi)

## ABSTRAK

Nama : Alfarisi  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Studi Pengaruh Waktu Tahan Lelehan Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr terhadap Efektivitas Penghalusan Butir dan Modifikasi Silikon Eutektik

Komponen *cylinder head* yang dihasilkan melalui proses *low pressure die casting* (LPDC) memiliki tingkat kegagalan yang cukup tinggi. Kegagalan tersebut diakibatkan oleh keberadaan cacat-cacat seperti misrun, porositas, bocor, dan penyusutan. Penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi bisa mengurangi cacat-cacat pada *cylinder head* tersebut dimana porositas menjadi terdistribusi lebih merata serta dapat memperbaiki mampu alir dari aluminium sehingga bisa meminimalisir terjadinya cacat misrun. Selain itu, dengan butir yang halus, fasa intermetalik yang tersebar merata, serta perubahan morfologi silikon dari bentuk yang panjang dan tajam menjadi lebih pendek dan halus, sehingga akan menghasilkan kekuatan mekanis yang lebih baik. Namun seiring dengan meningkatnya waktu tahan aluminium cair, efektivitas dari penghalus butir dan unsur modifikasi menjadi berkurang atau biasa disebut dengan pemudaran. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan pengaruh pemudaran pada paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.002 wt. % Sr dengan variabel waktu 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit.

Pengujian yang dilakukan antara lain pengujian kekerasan metode Rockwell B berdasarkan standar ASTM E18, pengujian porositas, serta fluiditas. Sampel pada bagian tipis dan tebal dari *cylinder head* diambil untuk mengamati mekanisme pemudaran penghalus butir dan unsur modifikasi untuk setiap interval waktu tahan. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik, sementara *scanning electron microscope* (SEM) dan *energy dispersive x-ray analysis* (EDAX) dilakukan untuk identifikasi terhadap fasa kedua yang terdapat pada paduan aluminium tersebut.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr meningkatkan kekerasan, dan fluiditas paduan aluminium AC4B jika dibandingkan dengan kondisi normal. Sejalan dengan itu, didapatkan nilai *dendrite arm spacing* (DAS) menurun secara signifikan. Namun dengan semakin lamanya waktu tahan, terjadi penurunan nilai kekerasan dan fluiditas serta meningkatnya nilai DAS, yang mengindikasikan telah terjadinya fenomena fading. Pemudaran telah terjadi setelah waktu tahan 10 menit, dan menjadi lebih cepat setelah waktu tahan 90 menit. Pengamatan dengan menggunakan SEM dan EDAX menunjukkan keberadaan titanium sebagai unsur penting pada proses penghalusan butir. Namun stronsium sebagai unsur modifikasi tidak ditemukan pada pengamatan tersebut, yang bisa disebabkan oleh kandungan stronsium yang rendah. Tidak terlihat adanya interaksi antara penghalus butir dan unsur modifikasi.

Kata kunci: Pemudaran, penghalus butir, unsur modifikasi, titanium, stronsium, AC4B, LPDC.

## ABSTRACT

Name : Alfarisi  
Major : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : Study on Effect of Holding Time of AC4B Aluminium Melt with 0.123 wt. % Ti and 0.003 wt. % Sr on Effectiveness of Grain Refinement and Modification of Eutectic Silicon

High level of reject is a problem in the production of cylinder head by low pressure die casting (LPDC) process. The reject is due to misrun, porosity, leakage, and shrinkage. Addition of grain refiner and modifier may decrease those defects where the porosity becomes uniformly distributed, and fluidity of aluminium melt increases. Aside from that, finer grains lead to more well distributed intermetallic phases, and change in silicon morphology from acicular to fibrous shape, that result in better mechanical properties. But the effectiveness of grain refiner and modifier decreases with longer holding time or usually called with fading. This research focused to observe the fading phenomenon in AC4B aluminium alloys containing 0.123 wt. % titanium and 0.003 wt. % strontium with holding time of 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, and 120 minutes.

A series of testing was conducted such as hardness testing based on ASTM E 18, porosity, and fluidity testing. Samples were taken from thick and thin sections of cylinder head to observe the fading mechanism of the grain refiner and modifier at each time interval. Microstructure examination was performed by optical microscope, while scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive x-ray analysis (EDAX) was conducted to determine the identity of second phases.

The experimental results show that addition of 0.123 wt. % titanium and 0.003 wt. % strontium increased hardness, fluidity, and porosity in AC4B aluminium alloys compared to normal condition. This was followed by a significant decrease of dendrite arm spacing (DAS) values. With longer holding time, hardness and fluidity decreased, while DAS increased, which indicated fading phenomenon. Fading started to at 10 minutes duration, and become faster at 90 minutes. This phenomenon was assumed to be due to settling of  $Al_3Ti$  and oxidation of strontium in the melt. SEM and EDAX results show the existence of titanium as important element in grain refinement. But strontium as element of modification could not be found, which may be caused by the low content of strontium. There was no indication of interaction between grain refiner and modifier.

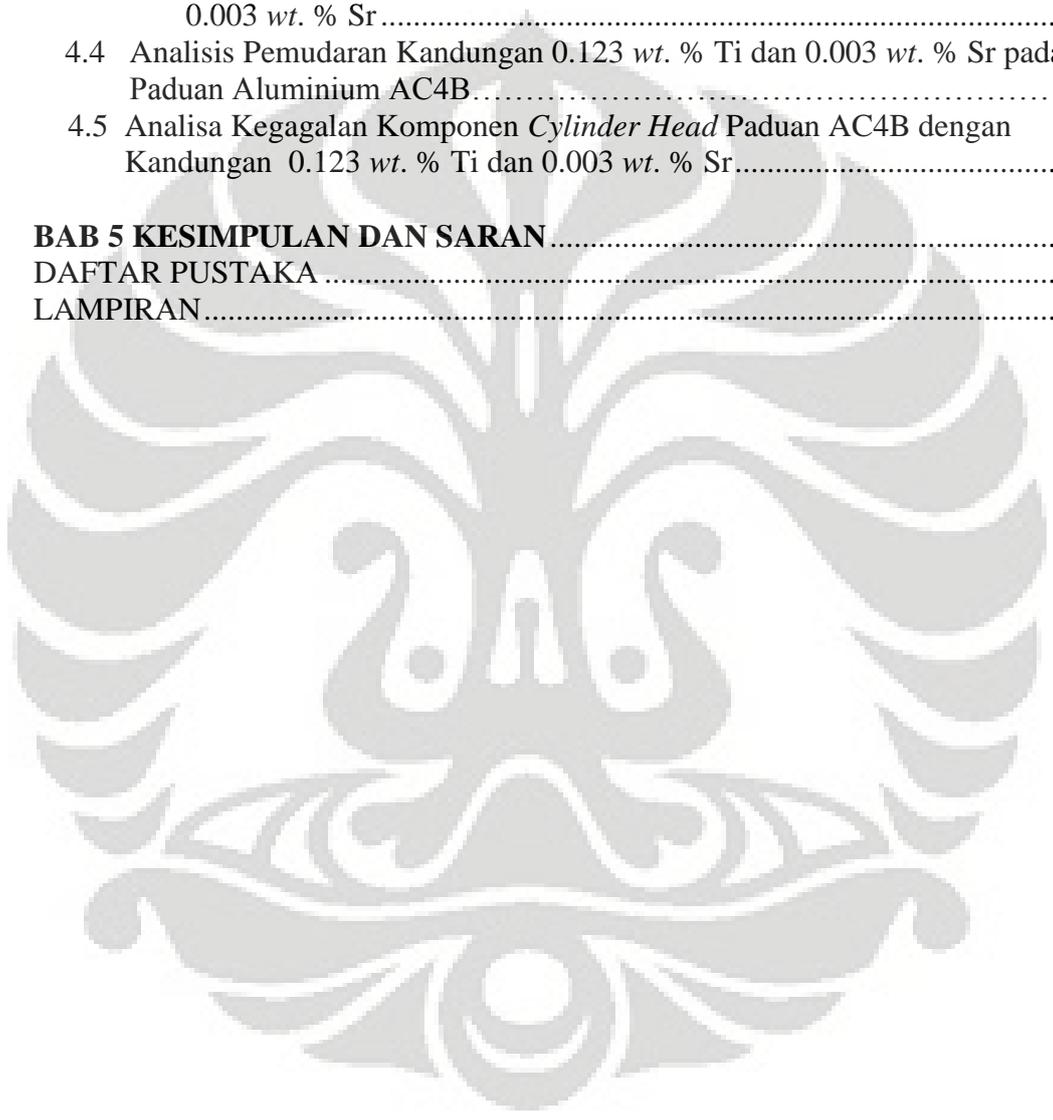
Keywords : Fading, grain refiner, modifier, titanium, strontium, AC4B, LPDC.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
<b>BAB 1 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
1.3.3 Tempat Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Cylinder Head</i> .....	5
2.2 Paduan Aluminium Tuang .....	6
2.2.1 Sistem Penamaan Aluminium Tuang.....	8
2.2.2 Pengaruh Unsur dalam Paduan Aluminium Tuang.....	8
2.2.2.1 Pengaruh Unsur Mayor dalam Paduan Aluminium Tuang .....	8
2.2.2.2 Pengaruh Unsur Minor dalam Paduan Aluminium Tuang.....	10
2.2.3 Aluminium Silikon.....	13
2.2.4 Paduan Aluminium AC4B .....	15
2.3 Teori Pembekuan Logam .....	16
2.3.1 Pembekuan Logam Murni.....	16
2.3.2 Pembekuan Paduan .....	17
2.4 Struktur Dendrit Aluminium-Silikon.....	18
2.5 Fluiditas.....	19
2.6 Proses Penghalusan Butir.....	22
2.6.1 Teori mengenai Mekanisme Penghalusan Butir .....	23
2.6.2 Karakteristik Penghalusan Butir .....	25
2.6.2.1 Pengaruh Penghalusan Butir terhadap Temperatur Nukleasi.....	25
2.6.2.2 Pengaruh Penghalusan Butir terhadap Ukuran Butir dan DAS....	26
2.6.2.3 Pengaruh Penghalusan Butir terhadap Porositas.....	27
2.6.3 Pemudaran pada Penghalusan Butir.....	25
2.7 Modifikasi .....	29
2.7.1 Teori Modifikasi.....	29
2.7.2 Karakteristik modifikasi.....	30

2.7.2.1 Pengaruh Modifikasi terhadap Temperatur dan Komposisi Eutektik .....	30
2.7.2.2 Pengaruh Modifikasi terhadap Struktur Mikro .....	30
2.7.2.3 Pengaruh Modifikasi terhadap Porositas .....	32
2.7.2.4 Pengaruh Modifikasi terhadap Jumlah Kembaran .....	33
2.7.3 Pemudaran pada Modifikasi.....	34
2.8 Penggabungan Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi .....	36
2.8.1 Karakteristik Penggabungan Penghalus butir dan Unsur Modifikasi ..	35
2.8.1.1 Pengaruh terhadap Struktur Mikro .....	35
2.8.1.2 Pengaruh terhadap Porositas .....	37
2.8.1.3 Pengaruh terhadap Kekuatan Mekanis .....	37
2.8.2 Pemudaran pada Kombinasi Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi ..	38
2.9 <i>Low Pressure Die Casting</i> .....	39
2.10 Cacat-cacat pada Pengecoran LPDC.....	41
<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.....	48
3.3.1 Peleburan .....	48
3.3.2 Penambahan Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi.....	49
3.3.3 Karakterisasi Paduan Aluminium AC4B .....	55
3.3.3.1 Pengujian Komposisi Kimia Paduan Aluminium AC4B .....	55
3.3.3.2 Pengujian Porositas Paduan Aluminium AC4B .....	55
3.3.3.3 Pengujian Tarik Paduan Aluminium AC4B .....	56
3.3.3.4 Pengujian Fluiditas Paduan Aluminium AC4B.....	57
3.3.3.5 Pengujian Kekerasan <i>Cylinder Head</i> AC4B .....	58
3.3.3.6 Pengamatan Struktur Mikro <i>Cylinder Head</i> AC4B dengan Mikroskop Optik .....	59
3.3.3.7 Pengamatan Struktur Mikro <i>Cylinder Head</i> AC4B dengan SEM dan EDAX .....	61
3.3.3.8 Karakterisasi Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi dengan XRD ....	62
<b>BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>64</b>
4.1 Analisis Komposisi Paduan Aluminium AC4B.....	64
4.2 Karakterisasi Penghalus Butir Fluks Coveral GR-2815 dan <i>Master Alloy</i> Al-10Sr	
4.2.1 Karakterisasi Penghalus Butir Fluks Coveral GR-2815 menggunakan SEM dan XRD .....	65
4.2.2 Karakterisasi <i>Master Alloy</i> Al-10Sr menggunakan Mikroskop Optik dan XRD .....	67
4.3 Perubahan Karakteristik Paduan Aluminium AC4B pada Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr.....	68
4.3.1 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Porositas Paduan Aluminium AC4B Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr .....	68

4.3.2 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Hasil Uji Tarik Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr .....	73
4.3.3 Pengaruh Waktu Tahan Terhadap Fluiditas Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr .....	77
4.3.4 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Kekerasan <i>Cylinder Head</i> Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr .....	80
4.3.5 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Struktur Mikro <i>Cylinder Head</i> Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr .....	82
4.4 Analisis Pemudaran Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada Paduan Aluminium AC4B.....	90
4.5 Analisa Kegagalan Komponen <i>Cylinder Head</i> Paduan AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr.....	91
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>94</b>
DAFTAR PUSTAKA .....	96
LAMPIRAN.....	99



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Posisi <i>cylinder head</i> pada sepeda motor .....	5
Gambar 2.2	Diagram fasa paduan Al-Si .....	13
Gambar 2.3	Struktur mikro paduan aluminium .....	14
Gambar 2.4	Kurva pendinginan logam murni.....	16
Gambar 2.5	Ilustrasi skematik pembekuan aluminium murni .....	17
Gambar 2.6	Struktur dendrit yang sedang tumbuh .....	18
Gambar 2.7	Ilustrasi <i>dendrite arm spacing</i> .....	18
Gambar 2.8	Proses pembekuan logam murni dan paduan eutektik pada uji fluiditas.....	20
Gambar 2.9	Proses pembekuan logam paduan pada uji fluiditas.....	20
Gambar 2.10	Fluiditas pada aluminium murni .....	21
Gambar 2.11	Pengaruh kandungan silikon terhadap fluiditas paduan aluminium ..	22
Gambar 2.12	Skematis perbedaan struktur tanpa penghalus butir dan dengan penghalus butir .....	22
Gambar 2.13	Zona <i>undercooled</i> mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit .....	25
Gambar 2.14	Kurva pendinginan paduan Al-Si dengan pengaruh penghalus butir .....	26
Gambar 2.15	Struktur makro aluminium murni dan dengan penambahan penghalus butir .....	26
Gambar 2.16	Efek penambahan penghalus butir terhadap nilai DAS .....	27
Gambar 2.17	Pemudaran pada proses penghalusan butir.....	28
Gambar 2.18	Ilustrasi pembentukan kembaran pada aluminium.....	29
Gambar 2.19	Kurva Pendinginan Al-Si dengan pengaruh modifikasi.....	
Gambar 2.20	Morfologi silikon pada aluminium silikon.....	31
Gambar 2.21	Pengaruh overmodifikasi terhadap struktur mikro aluminium .....	31
Gambar 2.22	Kelarutan hidrogen dalam aluminium.....	32
Gambar 2.23	Hasil TEM serat silikon yang sudah dimodifikasi .....	33
Gambar 2.24	Pemudaran pada modifikasi paduan Al-7Si .....	34
Gambar 2.25	Hasil SEM paduan Al-7Si tanpa penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi.....	36
Gambar 2.26	Hasil SEM paduan Al-7Si dengan penambahan 1 wt. % Al-1Ti-3B .....	36
Gambar 2.27	Hasil SEM paduan Al-7Si dengan penambahan 0.02 wt. % Sr.....	36
Gambar 2.28	Hasil SEM paduan Al-7Si dengan penambahan kombinasi 1 wt. % Al-1Ti-3B dan 0.02 wt. % Sr.....	36
Gambar 2.29	Pengaruh kombinasi penghalus butir dan unsur modifikasi terhadap ketahanan aus dan kekuatan tarik paduan Al-7Si .....	37
Gambar 2.30	Pengaruh penghalus butir terhadap kandungan Sr dalam aluminium cair.....	39
Gambar 2.31	Skematis proses LPDC.....	40
Gambar 2.32	Cacat misrun pada <i>cylinder head</i> .....	41
Gambar 2.33	Cacat porositas karena penyusutan .....	42

Gambar 2.34	Cacat porositas yang disebabkan oleh terperangkapnya gas.....	43
Gambar 2.35	Ilustrasi proses terbentuknya porositas gas pada logam.....	44
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian <sup>45</sup>	
Gambar 3.2	Dapur peleburan FCECO. ....	48
Gambar 3.3	Alat proses GBF. ....	49
Gambar 3.4	Mesin LPDC.....	50
Gambar 3.5	Penghalus butir dan unsur modifikasi .....	50
Gambar 3.6	Penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi ke dalam <i>holding furnace</i> .....	53
Gambar 3.7	Proses GBF manual .....	53
Gambar 3.8	Penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi ke dalam <i>crucible furnace</i> .....	54
Gambar 3.9	Cetakan, sampel dan mesin uji komposisi .....	55
Gambar 3.10	Alat uji vakum.....	56
Gambar 3.11	Bentuk dan ukuran sampel uji tarik standar JIS 2201 .....	56
Gambar 3.12	Cetakan, sampel, dan mesin uji tarik.....	57
Gambar 3.13	Cetakan dan proses pengambilan uji fluiditas.....	58
Gambar 3.14	Daerah pemotongan sampel pada <i>cylinder head</i> .....	58
Gambar 3.15	Alat uji kekerasan Rockwell B.....	59
Gambar 3.16	Mesin amplas dan poles .....	60
Gambar 3.17	Mikroskop optik. ....	60
Gambar 3.18	Struktur dendrit dalam sampel <i>cylinder head</i> .....	61
Gambar 3.19	<i>Scanning electron microscope</i> (SEM).....	63
Gambar 3.20	Difraktometer sinar-x .....	63
Gambar 4.1	Mikrostruktur dari penghalus butir Coveral GR-2815.....	65
Gambar 4.2	Hasil uji XRD Coveral GR-2815 .....	66
Gambar 4.3	Struktur mikro <i>master alloy</i> Al-10Sr. ....	67
Gambar 4.4	Hasil uji XRD sampel <i>master alloy</i> Al-10Sr.....	68
Gambar 4.5	Distribusi porositas pada sampel uji vakum AC4B .....	69
Gambar 4.6	Morfologi porositas mikro pada sampel fluiditas .....	72
Gambar 4.7	Pengaruh waktu tahan terhadap nilai UTS paduan aluminium AC4B .....	74
Gambar 4.8	Inklusi yang terdapat pada sampel uji tarik.....	75
Gambar 4.9	Pengaruh waktu tahan terhadap nilai elongasi paduan aluminium AC4B .....	75
Gambar 4.10	Sampel hasil uji fluiditas paduan aluminium AC4B.....	77
Gambar 4.11	Pengaruh waktu tahan terhadap fluiditas paduan aluminium AC4B .....	78
Gambar 4.12	Skematis model fluiditas pada A17Si dengan berbagai perlakuan	79
Gambar 4.13	Pengaruh waktu tahan terhadap nilai kekerasan komponen <i>cylinder head</i> .....	80
Gambar 4.14	Struktur mikro paduan aluminium AC4B .....	83
Gambar 4.15	Pengaruh waktu tahan terhadap nilai DAS komponen <i>cylinder head</i> .....	84
Gambar 4.16	Struktur mikro <i>cylinder head</i> AC4B bagian tipis dan tebal pada waktu tahan 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit. ....	87
Gambar 4.17	Hubungan kekerasan dan DAS <i>cylinder head</i> AC4B terhadap waktu tahan .....	87

Gambar 4.18 Hasil pengamatan SEM sampel *cylinder head*..... 89  
Gambar 4.19 Pengaruh kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr terhadap  
persentase kegagalan komponen *cylinder head* ..... 92

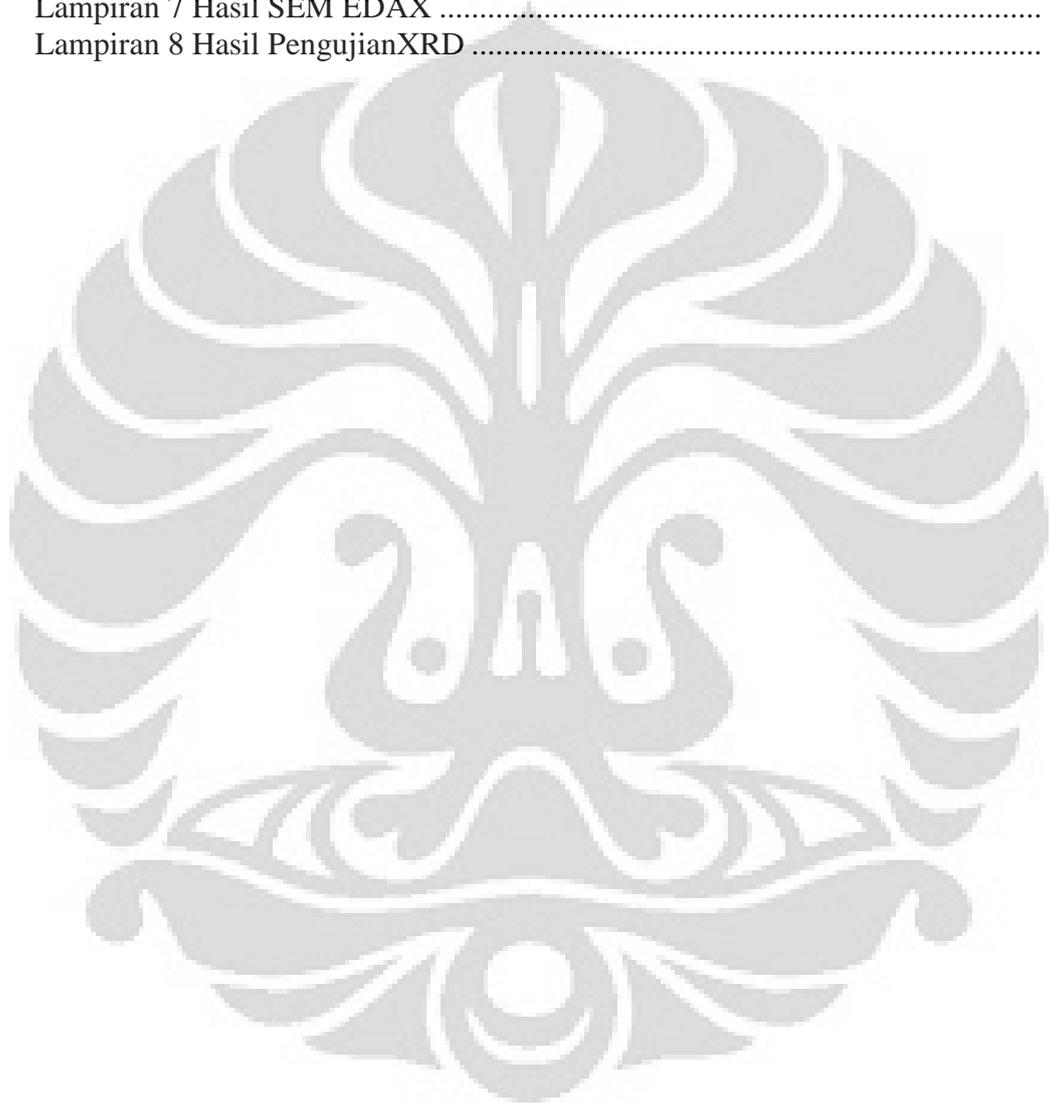


## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sistem Penamaan Aluminium Tuang.....	8
Tabel 2.2 Perbandingan unsur paduan pada paduan aluminium AC4B dan 333.0 .....	15
Tabel 2.3 Karakteristik yang dimiliki paduan aluminium AC4B .....	15
Tabel 2.4 Teori-teori mengenai mekanisme penghalusan butir .....	23
Tabel 2.5 Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut pada aluminium.....	24
Tabel 4.1 Hasil uji komposisi paduan aluminium AC4B pada keadaan sebelum dan sesudah penambahan 0.007 wt. % Ti dan 0.002 wt. % Sr.....	64
Tabel 4.2 Komposisi kimia penghalus butir Coveral GR 2815 berdasarkan analisis SEM <i>x-ray mapping</i> .....	66
Tabel 4.3 Hasil penghitungan fraksi volume porositas paduan Aluminium AC4B .....	70
Tabel 4.4 Hasil analisis SEM EDAX sampel tipis dan tebal <i>cylinder head</i> AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt.% Sr.....	90
Tabel 4.5 Hubungan antara fluiditas, kekerasan, DAS, dan GRF pada fenomena pemudaran kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr .....	91

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Pengujian Komposisi Kimia .....	99
Lampiran 2 Hasil Pengujian Pengujian Kekerasan.....	102
Lampiran 3 Hasil Pengukuran DAS.....	103
Lampiran 4 Hasil Pengujian Tarik .....	104
Lampiran 5 Hasil Pengujian Fluiditas.....	106
Lampiran 6 <i>Check Sheet</i> .....	107
Lampiran 7 Hasil SEM EDAX .....	109
Lampiran 8 Hasil PengujianXRD .....	124



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Penelitian

Industri otomotif merupakan salah satu jenis industri yang membutuhkan bahan dasar dari logam dalam jumlah yang cukup banyak untuk menghasilkan komponen otomotif. Oleh karena efisiensi bahan bakar dan kecepatan merupakan faktor yang sangat penting dalam pengaplikasiannya, tentu komponen otomotif tersebut membutuhkan bahan-bahan dalam hal ini logam yang cukup ringan, namun tetap memberikan performa yang terbaik. Sehubungan dengan hal itu, aluminium merupakan salah satu pilihan utama. Apalagi setelah krisis energi yang melanda dunia pada tahun 1970-an, membuat penggunaan aluminium cor pada banyak kendaraan menjadi semakin besar, karena aluminium diketahui memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang sangat tinggi<sup>[1]</sup>.

Banyak jenis logam yang dapat ditambahkan pada aluminium. Logam yang biasa ditambahkan ke dalam aluminium sebagai elemen paduan antara lain seng, magnesium, tembaga, silikon, besi, litium, mangan, nikel, perak, timah, dan titanium. Beberapa dari jenis logam tersebut berfungsi sebagai *solid solution strengthener*, dan yang lain dapat berfungsi sebagai pembentuk senyawa intermetalik<sup>[1]</sup>.

Paduan aluminium memiliki jenis yang cukup banyak. Diantara paduan tersebut yang sering digunakan dalam industri otomotif adalah paduan aluminium AC4B berdasarkan *Japan Industrial Standard (JIS)* atau setara dengan 333.0 *as-cast* berdasarkan standar *Aluminum Association (AA)*. Paduan aluminium AC4B ini lazim digunakan pada pengecoran aluminium dengan metode *low pressure die casting (LPDC)* dalam pembuatan *cylinder head* untuk komponen mesin sepeda motor. Produk *cylinder head* melalui proses LPDC ini ternyata memiliki tingkat kegagalan yang cukup tinggi dimana ketika melalui tahapan seleksi baik visual maupun alat uji khusus, didapatkan bahwa *cylinder head* tersebut memiliki cacat seperti bocor, misrun, porositas dan penyusutan. Keberadaan cacat dalam komponen *cylinder head* akan menurunkan sifat mekanisnya. *Cylinder head* yang memiliki cacat tidak diteruskan ke tahapan perakitan karena alasan keselamatan

pada waktu pemakaian, sehingga akan dilebur kembali. Walaupun demikian, proses pembuatan *cylinder head* dari peleburan hingga pengecoran tentunya telah memanfaatkan energi yang tidak sedikit. Tingginya jumlah *cylinder head* yang termasuk kategori produk gagal dan kemudian dilebur kembali mencerminkan proses produksi yang tidak efisien, dan mengakibatkan tingginya biaya produksi.

Untuk meningkatkan sifat mekanis dari *cylinder head*, metode yang dapat dilakukan antara lain dengan menambahkan penghalus butir dan unsur modifikasi. Penghalus butir merupakan bahan yang ditambahkan ke dalam suatu paduan untuk membantu proses nukleasi, sehingga bisa menghasilkan ukuran butir yang halus dan seragam<sup>[2]</sup>. Dengan butir yang halus akan dapat meningkatkan sifat mekanis seperti kekuatan tarik dan keuletan, ketahanan terhadap temperatur tinggi, mampu cor yang lebih baik, mengurangi kecenderungan retak panas dan porositas karena penyusutan, serta membuat porositas dan fasa intermetalik terdistribusi lebih merata<sup>[1][2][3]</sup>. Sementara itu unsur modifikasi merupakan suatu bahan yang ditambahkan ke aluminium cair untuk mengubah bentuk fasa silikon (silikon eutektik pada paduan hipoeutektik dan silikon primer pada paduan hipereutektik)<sup>[3]</sup>. Unsur modifikasi juga dapat meningkatkan sifat mekanis, mampu permesinan, mengurangi kecenderungan retak panas dan waktu perlakuan panas, mengontrol distribusi porositas, dan meningkatkan kemampuan pengisian cetakan<sup>[4]</sup>. Kemampuan pengisian cetakan sangat berhubungan dengan sifat fluiditas dari aluminium cair, sehingga cacat yang berhubungan dengan sifat fluiditas seperti misrun bisa dikurangi. Dengan penggabungan penghalus butir dan unsur modifikasi tersebut tentunya diharapkan dapat mengurangi cacat-cacat pada *cylinder head* sehingga pada akhirnya dapat meningkatkan sifat mekanis dari *cylinder head* tersebut.

Penelitian ini lebih dikhususkan pada pengamatan fenomena pemudaran pada kombinasi penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi pada aluminium cair dimana semakin lamanya waktu tahan maka efektivitas dari penghalus butir dan unsur modifikasi tersebut akan semakin menurun. Sehingga nantinya dapat menentukan waktu kontak yang paling efektif terhadap pemakaian penghalus butir dan unsur modifikasi tersebut. Waktu pengamatan yang dijadikan parameter untuk mengamati fenomena pemudaran tersebut adalah 0, 10, 20, 30,

40, 50, 60, 90, dan 120 menit. Nantinya akan dilakukan berbagai macam karakterisasi antara lain porositas, kekuatan tarik, fluiditas, kekerasan, dan struktur mikro untuk melihat fenomena pemudaran pada kombinasi penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi. Penghalus butir yang digunakan dalam bentuk fluks dan unsur modifikasi dalam bentuk *master alloy*.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian payung mengenai pengembangan material aluminium untuk aplikasi otomotif dengan cara penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi sehingga dapat dihasilkan produk komponen otomotif yang berkualitas.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

- 1) Mempelajari fenomena pemudaran paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr.
- 2) Mempelajari pengaruh kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr dan fenomena pemudaran terhadap sifat mekanis seperti kekerasan dan kekuatan tarik, porositas, fluiditas serta struktur mikro paduan aluminium AC4B.
- 3) Mempelajari mekanisme interaksi pada penggabungan penghalus butir dan unsur modifikasi pada paduan aluminium AC4B.

## **1.3 Ruang Lingkup Penelitian**

### **1.3.1 Material Penelitian**

- 1) Paduan aluminium tuang AC4B.
- 2) Penghalus butir yang digunakan adalah fluks Coveral GR-2815.
- 3) Unsur modifikasi yang digunakan adalah Master Alloy Al-10Sr.

### **1.3.2 Parameter Penelitian**

- 1) Variabel waktu pengamatan fenomena pemudaran pada paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr adalah 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit.
- 2) Proses LPDC dengan kapasitas *holding furnace* 500 kg, temperatur proses  $710 \pm 10^\circ\text{C}$ , dan tekanan mesin 250-268 kPa.

- 3) *Crucible Furnace* dengan kapasitas 200 kg, temperatur  $710\pm 10^{\circ}\text{C}$ .

### 1.3.3 Tempat Penelitian

- 1) Proses pengecoran dilakukan di *plant* LPDC PT AHM.
- 2) Pengujian komposisi, kekerasan, tarik dan fluiditas dilakukan di *plant* LPDC PT AHM.
- 3) Pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- 4) Analisa struktur mikro dengan menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) dilakukan di Laboratorium SEM Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- 5) Karakterisasi penghalus butir dan unsur modifikasi dengan menggunakan mesin *x-ray diffraction* (XRD) dilakukan di BATAN.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Melalui hasil penelitian yang telah dilakukan ini, diharapkan dapat memberikan salah satu jalan keluar untuk meningkatkan kualitas *cylinder head* hasil proses LPDC, yaitu dengan cara penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi. Sehingga dapat mengurangi cacat pada *cylinder head* tersebut yang pada akhirnya akan dapat menciptakan suatu proses produksi yang lebih efisien.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *Cylinder Head*

*Cylinder head* adalah bagian mesin yang berperan dalam mengatur proses pembakaran. *Cylinder head* berada pada bagian atas *cylinder (cyl comp)* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1. Konstruksi bagian dasar *cylinder head* terdiri atas ruang bakar (*combustion chamber*) dan dudukan *valve*. Pada bagian atas terdapat ruang untuk rantai keteng dan *rocker arm* yang berfungsi mentransfer gerakan berputar rantai keteng menjadi gerakan lurus untuk mengoperasikan *valve*<sup>[5]</sup>.

*Cylinder head* merupakan kunci dari kinerja mesin pembakaran internal (*internal combustion engine*) dimana bentuk *inlet* dan *port* sangat menentukan efisiensi *volumetric* mesin<sup>[5]</sup>.



**Gambar 2.1** Posisi *cylinder head* pada sepeda motor<sup>[5]</sup>.

## 2.2 Paduan Aluminium Tuang

Penggunaan aluminium tuang semakin meluas dan berkembang dalam berbagai bidang aplikasi, khususnya dalam industri manufaktur. Hal tersebut karena aluminium memiliki berat jenis yang rendah ( $2.57-2.95 \text{ gr/cm}^3$ ) dan sifat mekanis yang baik. Aluminium juga dapat dengan mudah dikombinasikan dengan unsur lain untuk meningkatkan sifat mekanis, mampu cor (*castability*), mampu mesin (*machinability*), ketahanan korosi, konduktivitas panas dan listrik, mampu las (*weldability*), dan ketahanan terhadap retak (*hot tear*). Kualitas dari produk cor tersebut masih dapat ditingkatkan dengan metode modifikasi, penghalusan butir, serta perlakuan panas (*heat treatment*)<sup>[6]</sup>.

Secara umum pengecoran aluminium bisa dilakukan dengan berbagai macam proses. Persyaratan kualitas, keterbatasan teknis serta faktor ekonomi yang dapat menentukan jenis proses yang akan dipilih. Ada tiga jenis proses pengecoran yang utama yaitu *sand casting*, *permanent mold casting* (*gravity* dan *low pressure*), serta *high pressure die casting*. *Sand casting* dipilih untuk produk cor dengan ukuran besar (diatas 1 ton) dan diproduksi dalam jumlah satu hingga beberapa ratus komponen. *Permanent mold casting* cocok untuk produk cor dengan ukuran menengah (sekitar 100 kg) dan diproduksi dalam jumlah seribu hingga seratus ribu komponen. Sementara *high pressure die casting* cocok untuk produk cor dengan ukuran kecil (sekitar 50 kg) dan diproduksi dalam jumlah sepuluh ribu hingga seratus ribu komponen<sup>[1]</sup>.

Sebagai material tuang, paduan aluminium memiliki karakteristik yang menunjang, yaitu<sup>[6][7]</sup> :

- 1) Sifat fluiditas yang baik sehingga dapat mengisi bagian yang tipis.
- 2) Temperatur lebur yang rendah yaitu sekitar  $650^{\circ}\text{C}-760^{\circ}\text{C}$  sehingga energi peleburannya tidak tinggi.
- 3) Titik uapnya cukup tinggi yaitu sekitar  $2000^{\circ}\text{C}$  sehingga tidak berbahaya dalam proses produksi yang temperaturnya berkisar dibawah  $1000^{\circ}\text{C}$ .
- 4) Siklus penuangan yang cepat, dikarenakan perpindahan panas dari aluminium cair ke cetakan relatif cepat, sehingga produktivitas dapat ditingkatkan.

- 5) Kelarutan hidrogen dalam aluminium dapat dikontrol dengan proses yang baik.
- 6) Mudah dipadu dengan elemen yang lain.
- 7) Memiliki permukaan *as-cast* yang baik, berkilat tanpa noda.
- 8) Memiliki stabilitas kimia yang baik.
- 9) Banyak jenis paduan aluminium yang bebas dari kecenderungan terjadinya keretakan akibat *hot shortness*.
- 10) Ramah lingkungan, hampir tidak ada yang terbuang.
- 11) Pasir cetak yang digunakan mudah direklamasi.
- 12) Peralatan peleburan tidak terlalu mahal.
- 13) Tahan korosi.

Disamping itu, aluminium tuang juga memiliki kelemahan-kelemahan antara lain [6][7].

- 1) Berat jenis yang rendah menyebabkan aluminium mudah tercampur dengan kotoran (oksida)  $Al_2O_3$  yang memiliki berat jenis yang hampir sama.
- 2) Mudah berikatan dengan gas terutama hidrogen pada kondisi cair sehingga harus dilakukan *degassing*, atau *Ar treatment*.
- 3) Penyusutan saat membeku cukup tinggi yaitu sekitar 6 %.

### 2.2.1 Sistem Penamaan Aluminium Tuang

Saat ini sistem klasifikasi yang umum dipakai untuk penamaan aluminium tuang adalah standar AA (*Aluminum Association*). Standar ini sudah mencakup klasifikasi berdasarkan cara pembuatan serta unsur paduan utamanya. Baik paduan tempa maupun paduan cor diklasifikasikan dengan empat digit, pada paduan cor digit keempat dipisahkan dengan tanda titik dari ketiga digit sebelumnya. 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)<sup>[7]</sup>. Klasifikasi dari paduan aluminium hasil pengecoran dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Sistem Penamaan Aluminium Tuang<sup>[7]</sup>

Seri	Unsur Paduan Utama
1xx.x	Aluminium murni ( $\geq 99\%$ )
2xx.x	Tembaga (Cu)
3xx.x	Silikon + Tembaga / Magnesium
4xx.x	Silikon (Si)
5xx.x	Magnesium (Mg)
6xx.x	Tidak dipakai
7xx.x	Seng (Zn)
8xx.x	Timah (Sn)
9xx.x	Unsur lain

## 2.2.2 Pengaruh Unsur dalam Paduan Aluminium Tuang

### 2.2.2.1 Pengaruh Unsur Mayor pada Paduan Aluminium Tuang

Unsur paduan utama yang terdapat pada aluminium memiliki pengaruh terhadap karakteristik dan sifat mekanis aluminium. Unsur paduan utama yang terdapat pada paduan aluminium diantaranya adalah Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Zn, Si, dan Sn.

- **Silikon (Si)**

Pada aluminium murni penambahan silikon akan dapat meningkatkan mampu alir (fluiditas) dan ketahanan terhadap retak panas pada hasil cor. Selain itu penambahan silikon juga akan berdampak terhadap perubahan sifat mekanis. Silikon ini juga memiliki berat jenis yang lebih rendah daripada aluminium sehingga tidak memberikan kontribusi penambahan berat produk. Silikon juga dapat mengurangi pemuaihan panas dan meningkatkan ketahanan korosi. Sifat silikon yang keras digunakan untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus pada aluminium, tetapi kadar paduan yang berlebih dapat menurunkan keuletan<sup>[5][7][8]</sup>.

- **Tembaga (Cu)**

Penambahan tembaga pada paduan aluminium cor berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan dalam kondisi *as-cast* ataupun saat perlakuan panas. Tembaga juga dapat mempermudah proses permesinan. Namun penambahan tembaga secara umum akan menurunkan ketahanan terhadap korosi

homogen. Selain itu tembaga juga dapat menurunkan ketahanan terhadap retak panas dan sifat mampu cor<sup>[5][7]</sup>.

- **Magnesium (Mg)**

Magnesium merupakan elemen yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium silikon. Hal tersebut disebabkan karena adanya fasa  $Mg_2Si$  yang berfungsi sebagai penguat. Fasa  $Mg_2Si$  tersebut memiliki batas kelarutan hingga 0.7 wt. % Mg. Biasanya komposisi paduan aluminium dengan kekuatan tinggi memiliki kandungan magnesium sekitar 0.4-0.7 wt. %<sup>[3]</sup>.

Paduan biner Al-Mg digunakan secara luas dalam aplikasi yang memerlukan hasil akhir permukaan yang halus dan ketahanan korosi serta kombinasi yang baik antara keuletan dan kekuatan. Magnesium meningkatkan kekuatan dengan penguatan *solid solution*, dan paduan yang mengandung lebih dari 7 % Mg akan mengalami pengerasan presipitasi. Selain itu magnesium juga meningkatkan mampu las dari aluminium cor<sup>[3]</sup>.

Kandungan magnesium yang berlebih maka yang terjadi bukannya mekanisme penguatan akan tetapi justru terjadinya pelunakan pada matriks aluminium. Selain itu magnesium juga dapat menurunkan ketangguhan material, menimbulkan *hardspot*, menurunkan ketahanan korosi dan meningkatkan kemungkinan cacat<sup>[5][7]</sup>.

- **Besi (Fe)**

Besi merupakan merupakan elemen paduan pada aluminium yang dapat meningkatkan ketahanan retak panas dan menurunkan kecenderungan *soldering* atau penempelan dengan cetakan pada *die casting*. Unsur besi akan bereaksi membentuk fasa-fasa yang tidak larut dalam leburan paduan aluminium, yang pada umumnya berupa  $FeAl_3$ ,  $FeMnAl_6$ , dan  $\alpha-AlFeSi$ . Fasa-fasa yang tidak larut ini berpengaruh pada peningkatan kekuatan, terutama pada kondisi kenaikan temperatur. Namun adanya kadar besi pada paduan yang berlebihan secara substansial akan menurunkan sifat keuletan pada paduan aluminium. Besi akan mendorong pembentukan fasa lumpur (*sludging phase*) dengan mangan, kromium, dan elemen lainnya<sup>[7]</sup>

- **Mangan (Mn)**

Mangan merupakan elemen penting dalam paduan aluminium. Dari beberapa bukti yang ada, jumlah  $MnAl_6$  dalam paduan aluminium yang mengandung mangan 0.5 wt. % dapat memberikan pengaruh mutu internal hasil coran yang baik. Mangan juga dapat meningkatkan daya tahan pada temperatur tinggi, mengurangi pengaruh besi, meningkatkan ketahanan korosi, meningkatkan temperatur rekristalisasi serta membentuk struktur berserat pada pengerjaan panas. Namun mangan dapat membentuk *hard spot*, dan mengkasarkan butir partikel dan permukaan<sup>[5][7]</sup>.

- **Seng (Zn)**

Seng dapat meningkatkan mampu cor. Namun dapat meningkatkan kerentanan terhadap *stress corrosion cracking* dan *hot cracking*, dan menurunkan kekuatan material apabila membentuk Mg-Zn. Maka dari itu paduan aluminium-seng sudah jarang digunakan. Namun apabila ditambahkan elemen lain seperti magnesium dan tembaga maka akan menghasilkan kombinasi sangat tinggi dari kekuatan tarik pada paduan aluminium tempa<sup>[5][7]</sup>.

- **Timah (Sn)**

Timah sangat efektif dalam meningkatkan sifat anti gesek dan umumnya banyak digunakan untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan aus. Penambahan timah juga dapat meningkatkan sifat mampu mesin paduan cor dengan berperan sebagai pemutus geram (*chip breaker*)<sup>[5][7]</sup>.

#### 2.2.2.2 Pengaruh Unsur Minor pada Aluminium

Selain unsur paduan utama, terdapat unsur paduan lain pada aluminium dalam jumlah kecil diantaranya boron, kalsium, karbon, kobalt, kromium, nikel dan titanium.

- **Boron (B)**

Boron digunakan pada aluminium dan paduannya sebagai penghalus butir dan untuk meningkatkan konduktivitas dengan cara mengendapkan vanadium,

titanium, kromium dan molibdenum. Boron bisa digunakan sendiri pada level 0.005-0.1 wt. % sebagai penghalus butir selama proses solidifikasi, namun akan menjadi lebih efektif jika digunakan bersamaan dengan titanium<sup>[8]</sup>.

- **Kalsium (Ca)**

Kalsium memiliki kelarutan yang sangat rendah dalam aluminium dan membentuk senyawa intermetalik  $\text{CaAl}_4$ . Kalsium berkombinasi dengan silikon akan membentuk  $\text{CaSi}_2$ , dimana senyawa ini hampir tidak larut dalam aluminium. Hal tersebut mengakibatkan akan meningkatkan konduktivitas dari paduan tersebut. Pada paduan aluminium-magnesium-silikon, kalsium akan menurunkan *age hardening*. Pada paduan aluminium-silikon, elemen ini akan meningkatkan kekuatan dan menurunkan elongasi, akan tetapi tidak membuat paduan ini *heat treatable*<sup>[8]</sup>.

- **Karbon (C)**

Karbon biasanya terdapat dalam aluminium sebagai pengotor dalam bentuk *oxycarbide* dan karbida seperti  $\text{Al}_4\text{C}_3$ . Namun pembentukan karbida pengotor lainnya bisa saja terjadi, seperti dengan titanium.  $\text{Al}_4\text{C}_3$  akan terurai dengan adanya air dan uap air, hal ini akan dapat memicu terjadinya *pitting* atau lubang-lubang kecil pada permukaan<sup>[8]</sup>.

- **Kromium (Cr)**

Kromium hadir sebagai unsur minor di dalam paduan aluminium yaitu sekitar 5-50 ppm. Kromium biasanya ditambahkan pada banyak paduan aluminium seperti aluminium-magnesium, aluminium-magnesium-silikon, dan aluminium-magnesium-seng, dimana penambahannya biasanya tidak melebihi 0.35 wt. %. Jika penambahannya melebihi batas tersebut maka akan menghasilkan konstituen yang kasar dengan pengotor lainnya atau penambahan elemen lain seperti mangan, besi dan titanium. Kromium memiliki laju difusi yang rendah dan membuat fasa halus yang terdispersi pada produk tempa. Fasa terdispersi ini akan mencegah nukleasi dan pertumbuhan butir. Kromium digunakan untuk

mengontrol struktur butir, untuk mencegah pertumbuhan butir pada paduan aluminium-magnesium-seng selama proses pengerjaan ataupun perlakuan panas<sup>[8]</sup>.

- **Kobalt (Co)**

Kobalt biasanya jarang ditambahkan pada paduan aluminium. Biasanya kobalt ditambahkan untuk beberapa paduan aluminium-silikon yang mengandung besi, dimana kobalt ini dapat mengubah morfologi dari *acicular*  $\beta$  menjadi fasa aluminium-kobalt-besi yang lebih bulat yang tentu nantinya akan meningkatkan kekuatan dan elongasi paduan aluminium<sup>[8]</sup>.

- **Nikel (Ni)**

Kelarutan nikel dalam aluminium tidak lebih dari 0.04 %. Nikel dapat meningkatkan kekuatan dan daya tahan pada temperatur tinggi dan mengurangi pengaruh besi. Jika lebih dari jumlah tersebut maka nikel akan hadir sebagai fasa intermetalik yang tidak larut yang berkombinasi dengan besi. Kenaikan nikel hingga 2 % akan meningkatkan kekuatan aluminium murni namun keuletannya akan berkurang. Nikel biasanya ditambahkan pada paduan Al-Cu dan Al-Si untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan temperatur tinggi dan bersamaan dengan tembaga akan dapat mengurangi koefisien ekspansi panas<sup>[5][8]</sup>.

- **Fosfor (P)**

Fosfor dalam aluminium tuang akan membentuk  $AlP_3$ , yang merupakan nuklean untuk modifikasi hipereutektik Al-Si agar silikon primer memiliki bentuk yang lebih bulat.

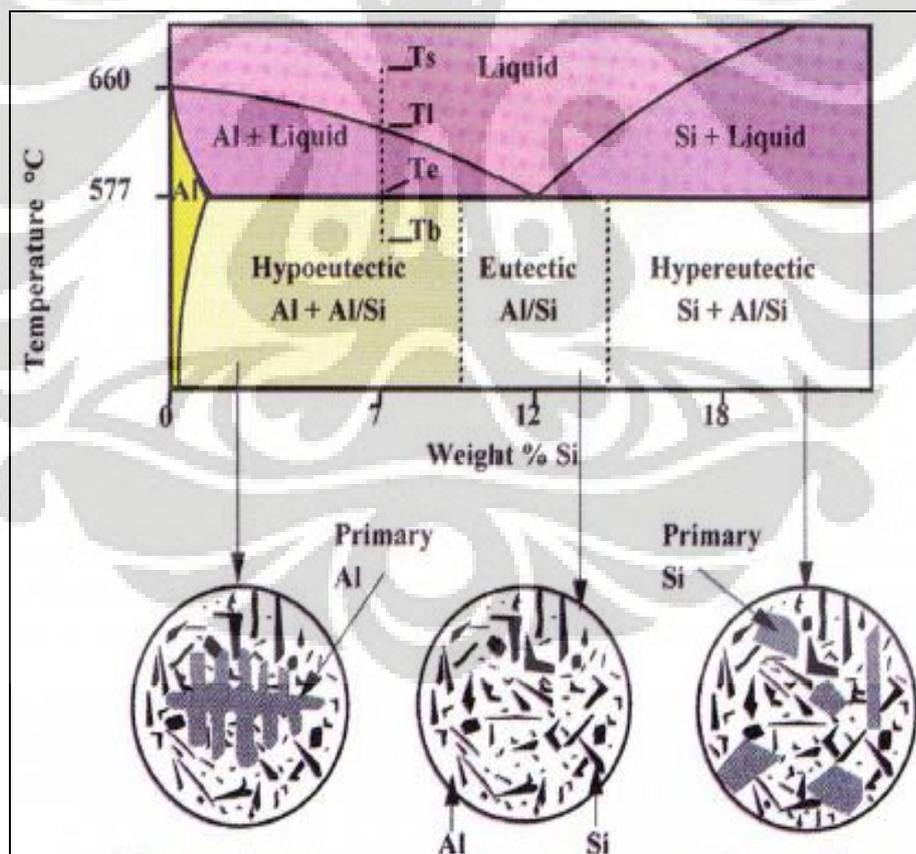
- **Titanium**

Titanium dapat meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi, memperhalus butir kristal dan permukaan serta mempermudah proses penuangan. Titanium yang merupakan unsur minor pada aluminium tuang bersamaan dengan boron berperan sebagai penghalus butir dengan membentuk  $TiAl_3$ ,  $AlB_2$  atau  $(Al,Ti)B_2$  sebagai nuklean pada solidifikasi aluminium tuang<sup>[5]</sup>.

### 2.2.3 Aluminium Silikon

Paduan aluminium-silikon merupakan jenis paduan aluminium yang telah digunakan sebanyak lebih dari 85 % hingga 90 % dari total semua komponen yang dihasilkan berbahan aluminium cor. Paduan aluminium yang terdiri atas silikon sebagai elemen paduan utama memiliki mampu cor yang sangat tinggi, ketahanan korosi yang cukup baik, serta bisa dilakukan proses permesinan dan pengelasan. Penguatan paduan aluminium silikon bisa dilakukan dengan menambahkan sejumlah kecil Cu, Mg, atau Ni<sup>[1]</sup>.

Aluminium-silikon merupakan contoh sederhana dari sistem eutektik biner dengan kelarutan terbatas silikon dalam aluminium dan aluminium dalam silikon. Kelarutan silikon dalam aluminium mencapai maksimal pada komposisi 1.5 % pada temperatur eutektik, dan kelarutan silikon meningkat jadi 0.016 % pada temperatur 1190°C<sup>[9]</sup>.

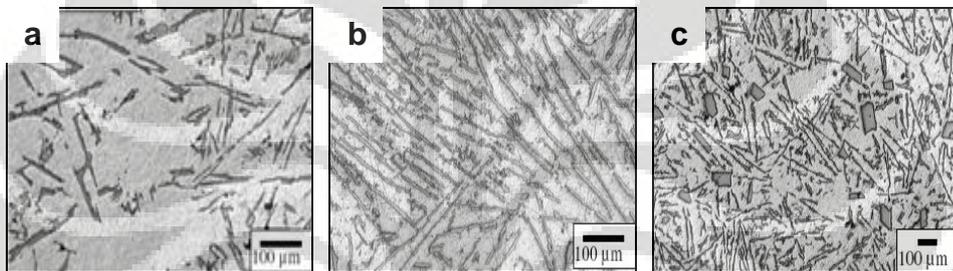


Gambar 2.2 Diagram fasa paduan Al-Si<sup>[2]</sup>.

Berdasarkan Gambar 2.2, paduan aluminium silikon bisa dibagi menjadi 3 jenis, yaitu :

### 1) Paduan Aluminium-Silikon Hipoeutektik

Merupakan paduan aluminium silikon dengan kadar silikon di bawah 12 wt. %. Pada daerah ini, pembekuan terjadi melalui fasa cair-padat. Struktur akhir dari komposisi ini adalah struktur yang kaya dengan aluminium, sebagai fasa utamanya adalah fasa  $\alpha$  dengan struktur eutektik sebagai tambahannya seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3.a. Material aluminium yang cukup dikenal dalam industri pengecoran untuk kategori ini adalah AC2B, AC4B, A.356<sup>[7]</sup>.



Gambar 2.3 Struktur mikro paduan aluminium (a) hipoeutektik, (b) eutektik, (c) hipereutektik<sup>[10]</sup>.

### 2) Paduan Aluminium-Silikon Eutektik

Merupakan paduan aluminium silikon dengan kadar silikon sekitar 11.7-12.2 wt. %. Pada daerah ini paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya. Proses pembekuan yang berlangsung menyerupai proses pembekuan logam murni, dimana temperatur awal dan temperatur akhir peleburan adalah sama. Struktur mikronya ditunjukkan oleh Gambar 2.3.b. Adanya struktur eutektik ini yang mengakibatkan paduan aluminium silikon memiliki karakteristik mampu cor yang baik<sup>[7]</sup>.

### 3) Paduan Aluminium-Silikon Hipereutektik

Merupakan paduan aluminium dengan kadar silikon diatas 12.2 % sehingga komposisi ini memiliki struktur yang kaya akan silikon dengan fasa eutektik sebagai unsur tambahan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3.c. Contoh yang cukup terkenal dengan tipe ini adalah AC8H, dan A390<sup>[7]</sup>.

### 2.2.4 Paduan Aluminium AC4B

Paduan aluminium AC4B merupakan paduan aluminium berdasarkan standar JIS H5202 (*Japan Industrial Standard*) atau setara dengan paduan aluminium tuang paduan 333.0 standar AA (*Aluminum Association*) seperti yang terlihat pada Tabel 2.2. Paduan aluminium AC4B terdiri atas tiga unsur yang dominan yaitu Al, Si, dan Cu. Dari Tabel 2.2 juga terlihat adanya unsur tambahan dalam jumlah yang kecil seperti Mg, Fe, Ni, Zn, Mn, dan Ti.

**Tabel 2.2** Perbandingan unsur paduan pada paduan aluminium AC4B dan 333.0<sup>[11][12]</sup>

Elemen Paduan	AC4B (wt. %)	333.0 (wt. %)
Si	7 – 10	8 – 10
Fe	0.8 maks	1 maks
Cu	2 – 4	3 – 4
Mn	0.5 maks	0.5 maks
Mg	0.5 maks	0.5 maks
Ni	0.35 maks	0.5 maks
Zn	1 maks	1 maks
Sn	0.1 maks	-
Ti	0.1 maks	0.25 maks

Sifat mekanis dari paduan aluminium AC4B ditunjukkan oleh Tabel 2.3. Salah satu aplikasi paduan aluminium tuang AC4B ini adalah dalam aplikasi otomotif yang membutuhkan sifat kekuatan dan kekerasan serta diimbangi karakteristik konduktivitas panas yang baik seperti *cylinder head*.

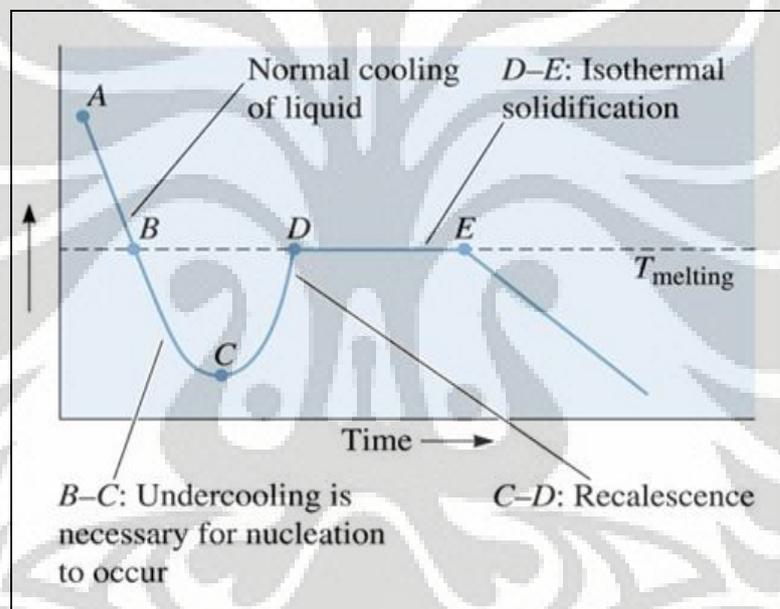
**Tabel 2.3** Karakteristik yang dimiliki paduan aluminium AC4B<sup>[13]</sup>

Karakteristik	Nilai	Satuan
Kekuatan Tarik	≥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 Teori Pembekuan Logam

### 2.3.1 Pembekuan Logam Murni

Proses pembekuan logam murni terjadi pada temperatur konstan. Namun, panas pembekuan yang dilepaskan pada saat proses pembekuan sangat besar sehingga permukaan luar produk cor akan menjadi sangat kasar. Pada kondisi kesetimbangan apabila temperatur logam cair diturunkan hingga titik beku, maka panas laten pembekuan akan dilepaskan sementara temperatur tetap konstan. Siklus perpindahan panas ini akan berakhir jika proses solidifikasi telah selesai. Kemudian setelah itu logam padat didinginkan hingga mencapai temperatur kamar<sup>[14]</sup>.

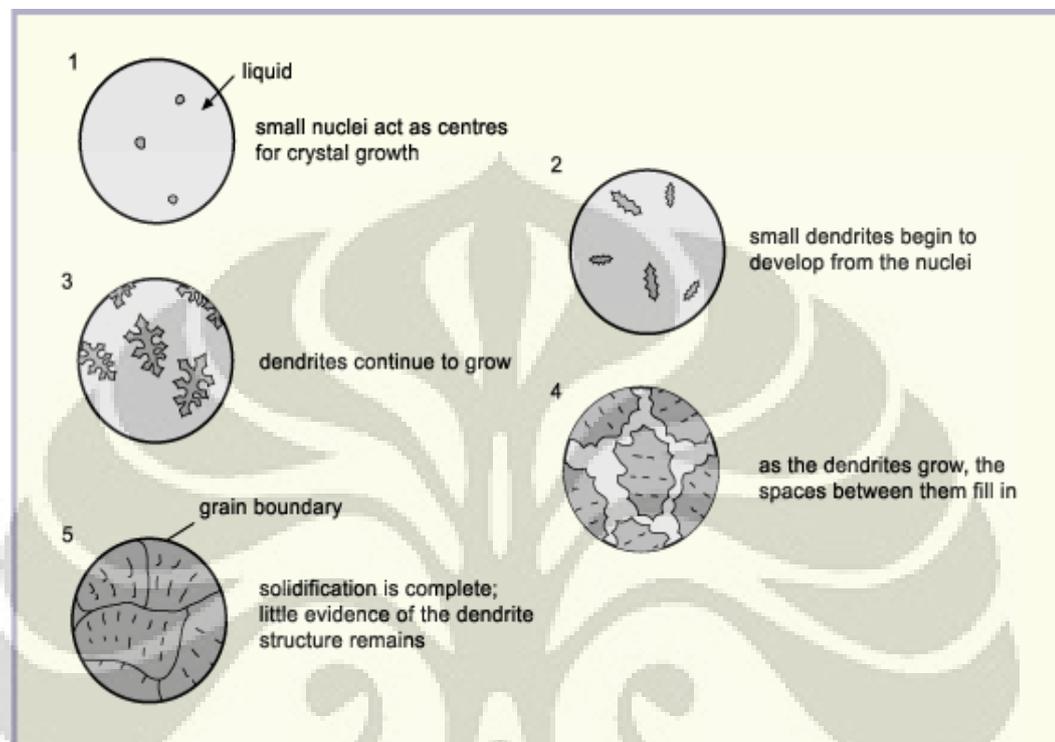


Gambar 2.4 Kurva pendinginan logam murni<sup>[15]</sup>.

Dari kurva pendinginan antara waktu dan temperatur, dapat dilihat bahwa untuk terbentuknya nukleasi dibutuhkan *undercooling* (titik B-C) seperti yang ditunjukkan Gambar 2.4. Nukleasi terjadi pada titik C, kemudian antara titik C-D terjadi *recalescence* yaitu melepaskan fusi panas laten karena meningkatnya temperatur pada fasa cair. Setelah itu pada titik E pembekuan selesai<sup>[15]</sup>.

Dalam pembekuan logam cair, permulaan dimulai dengan tumbuhnya inti-inti kristal. Kemudian kristal-kristal berkembang di sekiling inti tersebut, dan inti baru tumbuh pada saat yang sama. Akhirnya seluruhnya ditutupi oleh butir kristal

sampai logam cair habis. Hal ini mengakibatkan seluruh logam menjadi susunan kelompok-kelompok butir kristal dan batas-batas terjadi diantaranya yang disebut batas butir<sup>[16]</sup>. Proses pembekuan logam murni ditunjukkan oleh Gambar 2.5.



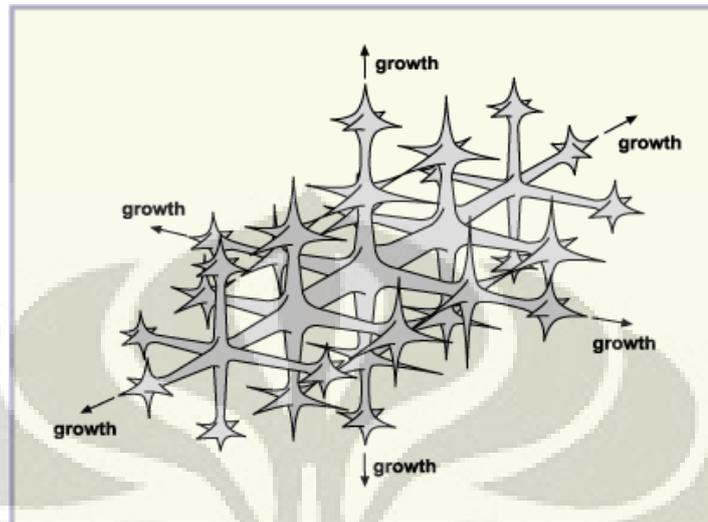
Gambar 2.5 Ilustrasi skematik pembekuan aluminium murni<sup>[17]</sup>.

Ukuran besar butir kristal sangat tergantung pada laju pengintian dan pertumbuhan inti. Bila laju pertumbuhan lebih besar dari laju pengintian, akan didapatkan kelompok butir-butir kristal yang besar. Sedangkan bila laju pengintian lebih besar dari laju pertumbuhan inti, akan didapati kelompok butir-butir kristal halus<sup>[16]</sup>.

### 2.3.2 Pembekuan Paduan

Proses pembekuan paduan aluminium silikon seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2, dimulai dari temperatur fasa cair ( $T_s$ ) kemudian pendinginan dimulai pada temperatur solidifikasi ( $T_l$ ) dan telah mulai terbentuknya dendrit. Perbedaan antara  $T_s$  dan  $T_l$  merupakan *superheat* pada logam cair yang akan memulai proses pendinginan. Pada paduan dengan komposisi eutektik,

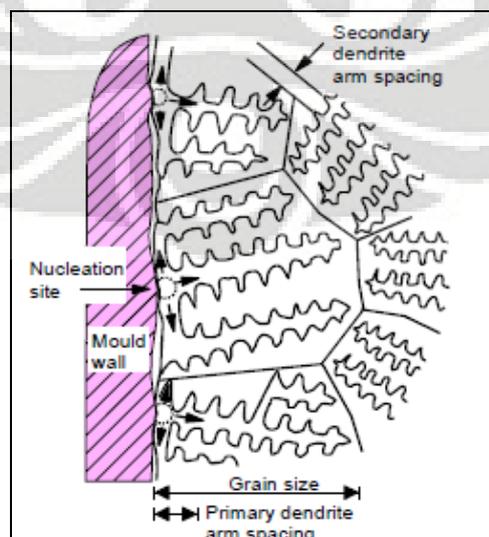
solidifikasi akan terjadi pada temperatur eutektik ( $T_e$ )<sup>[2]</sup>. Ilustrasi skematik pertumbuhan dendrit dapat terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Struktur dendrit yang sedang tumbuh<sup>[17]</sup>

#### 2.4 Struktur Dendrit Aluminium-Silikon

Dendrit merupakan suatu struktur yang menyerupai bentuk cabang pohon dan sangat jelas terlihat pada logam cor yang pendinginannya lambat atau perlahan<sup>[3]</sup>. Jarak antar lengan dendrit atau *dendrite arm spacing* (DAS) seperti yang tampak pada Gambar 2.7, dapat digunakan untuk menggambarkan struktur metalurgi dari material cor.



Gambar 2.7 Ilustrasi *dendrite arm spacing*<sup>[18]</sup>.

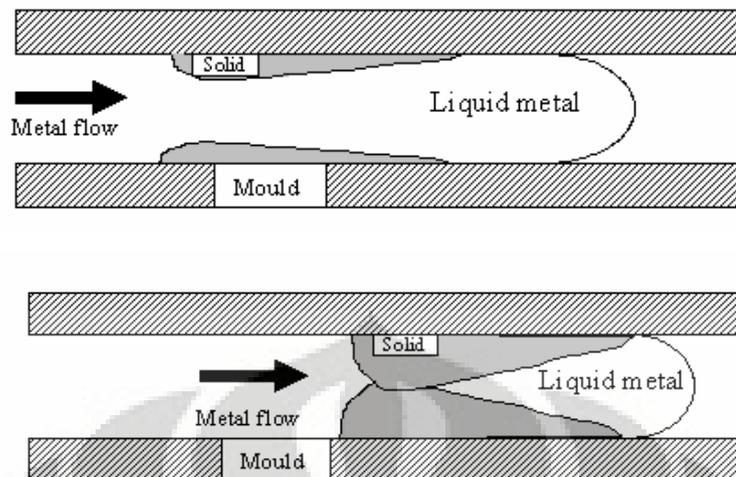
Sifat mekanis dari kebanyakan paduan sangat ditentukan oleh nilai DAS. Semakin kecil nilai DAS maka sifat mekanis seperti kekuatan tarik, keuletan, dan elongasi akan semakin besar. Selain itu, ukuran DAS yang kecil akan mengurangi waktu yang diperlukan untuk homogenisasi pada proses perlakuan panas karena *diffusion distances* yang lebih pendek<sup>[18]</sup>.

## 2.5 Fluiditas

Fluiditas dalam pengecoran digunakan untuk mengetahui jarak yang bisa ditempuh logam cair untuk dapat mengalir dalam suatu cetakan khusus sebelum logam cair tersebut membeku. Pengujian fluiditas bisa dilakukan dengan berbagai metode. Pengujian yang paling sering dilakukan adalah dengan menggunakan metode spiral dan vakum. Pada metode spiral, fluiditas logam ditentukan dari panjang aliran logam pada suatu cetakan berbentuk spiral. Sedangkan pada metode vakum, fluiditas logam ditentukan dari panjang aliran logam pada suatu saluran sempit. Logam masuk ke dalam saluran tersebut dengan cara dihisap menggunakan suatu pompa vakum. Metode spiral lebih sering digunakan dalam industri karena lebih ringkas, dan mudah untuk digunakan<sup>[26]</sup>.

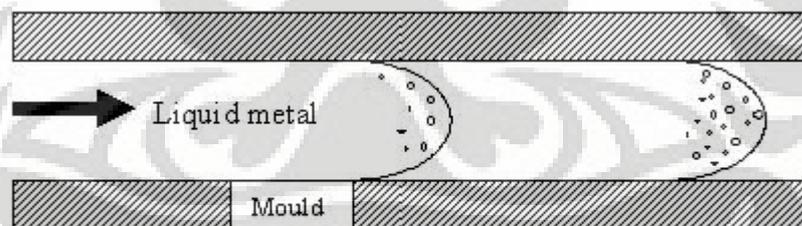
Ada beberapa faktor yang mempengaruhi fluiditas suatu logam, antara lain sifat dari logam (komposisi kimia, kisaran pembekuan, viskositas, *heat of fusion*), cetakan (koefisien transfer panas, konduktivitas termal cetakan dan logam, massa jenis cetakan dan logam, panas spesifik, dan tegangan permukaan), serta kondisi pengujian (diameter saluran, temperatur pengecoran, dan kandungan partikel oksida)<sup>[26]</sup>.

Solidifikasi logam murni dan paduan pada saluran dalam cetakan fluiditas menunjukkan adanya perbedaan. Ketika suatu logam murni atau paduan pada komposisi eutektik memasuki saluran pada cetakan uji tarik, pembekuan mulai terjadi pada dinding dan dilanjutkan dengan pertumbuhan butir-butir berbentuk kolom yang memiliki bagian antarmuka dengan aliran logam cair. Aliran logam akan terhenti ketika butir-butir kolom saling bertemu, seperti terlihat pada Gambar 2.8.



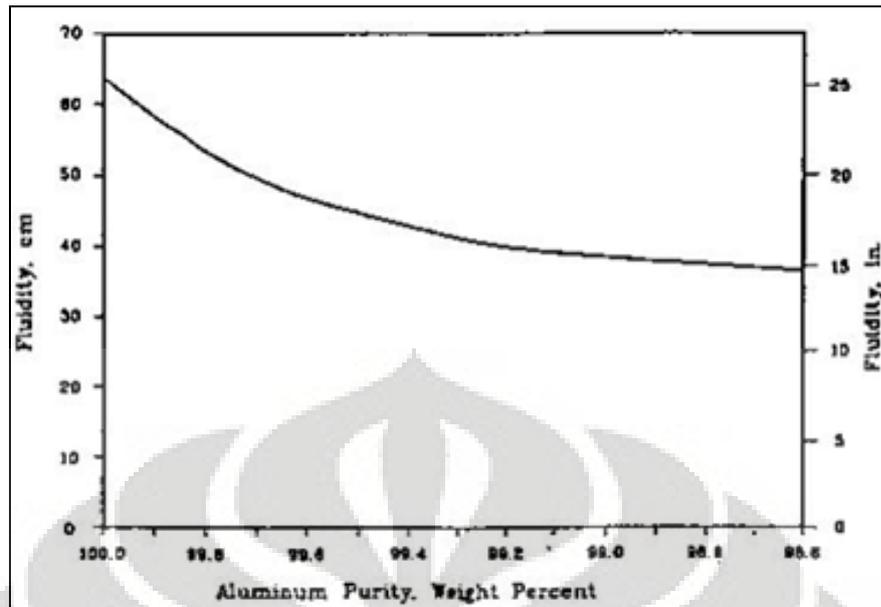
**Gambar 2.8** Proses pembekuan logam murni dan paduan eutektik pada uji fluiditas<sup>[29]</sup>.

Tidak seperti logam murni, aliran logam paduan (kecuali pada komposisi eutektik) akan terhenti pada ujung aliran seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9. Ketika konsentrasi terlarut semakin meningkat, tipe pembekuan berubah dari butir-butir kolom menjadi dendrit yang *equiaxed* atau dendrit kolom dimana lengan-lengan dendrit bisa patah membentuk butir yang *equiaxed*. Dendrit tersebut akan terus terbawa oleh aliran logam hingga mencapai fraksi padat kritis dan aliran akan berhenti.



**Gambar 2.9** Proses pembekuan logam paduan pada uji fluiditas<sup>[26]</sup>.

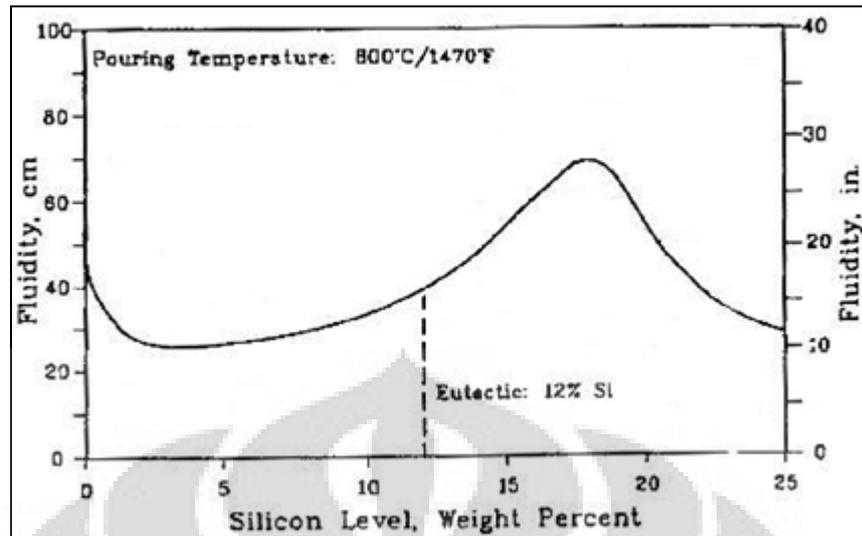
Komposisi merupakan faktor utama yang mempengaruhi fluiditas. Telah ditemukan bahwa penambahan sedikit unsur paduan ke dalam logam murni akan menurunkan fluiditas. Fluiditas aluminium yang tidak diberi paduan akan turun dengan menurunnya kemurnian. Gambar 2.10 memperlihatkan pengaruh kemurnian aluminium terhadap fluiditas yang diukur dengan metode pengujian spiral<sup>[26]</sup>.



Gambar 2.10 Fluiditas pada aluminium murni<sup>[26]</sup>.

Logam murni dan paduan pada komposisi eutektik memiliki fluiditas yang paling baik. Fluiditas aluminium murni secara signifikan sangat dipengaruhi oleh kehadiran pengotor, sementara untuk paduan fluiditasnya meningkat seiring dengan meningkatnya fraksi eutektik.

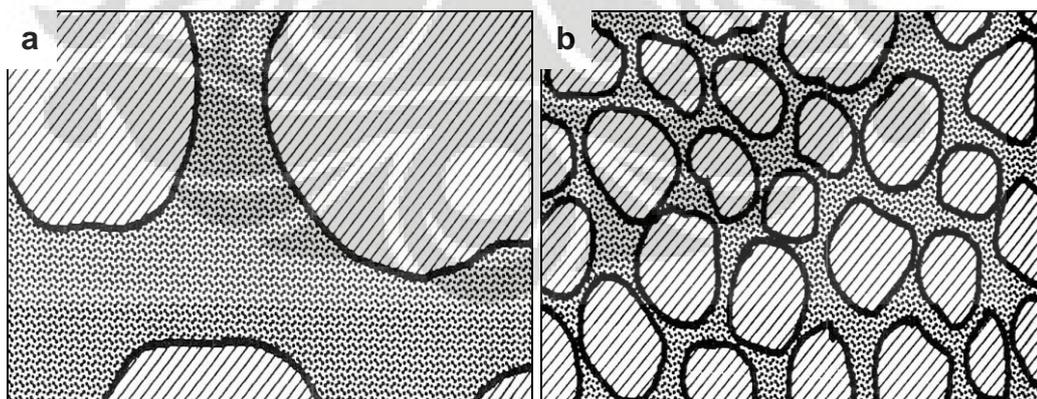
Fluiditas paduan Al-Si meningkat dengan bertambahnya kandungan silikon dan mencapai maksimum pada 17-18 wt. % silikon berdasarkan percobaan yang dilakukan oleh Lang<sup>[26]</sup>, dimana hasilnya tersebut terjadi di atas komposisi eutektik. Peningkatan kandungan silikon telah merubah temperatur *liquidus* paduan. Dari studi yang dilakukan oleh beberapa ahli, fluiditas yang dimiliki oleh paduan Al-Si hipereutektik lebih baik dari pada hipoeutektik bahkan eutektik sekalipun. Hal tersebut disebabkan oleh tingginya *heat fusion* yang dimiliki oleh silikon primer, sekitar 4.5 kali lebih tinggi jika dibandingkan dengan aluminium murni. Ketika telah mencapai nilai maksimum, peningkatan kadar silikon akan menurunkan fluiditas karena meningkatnya partikel silikon proeutektik yang akan mengganggu aliran logam. Pengaruh kandungan silikon terhadap fluiditas aluminium dapat terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Pengaruh kandungan silikon terhadap fluiditas paduan aluminium<sup>[26]</sup>.

## 2.6 Proses Penghalusan Butir

Penghalus butir merupakan bahan yang ditambahkan ke dalam suatu paduan untuk membantu proses nukleasi, sehingga bisa menghasilkan ukuran butir yang halus dan seragam<sup>[2]</sup>. Skematis struktur aluminium setelah ditambahkan penghalus butir ditunjukkan oleh Gambar 2.12. Ada beberapa jenis penghalus butir yang biasa digunakan untuk paduan aluminium-silikon, antara lain yang berbahan dasar *master alloy* aluminium-titanium atau aluminium-titanium-boron, dan titanium atau titanium-boron dalam bentuk fluks.



Gambar 2.12 Skematis perbedaan struktur (a) tanpa penghalus butir, (b) dengan penghalus butir<sup>[19]</sup>.

### 2.6.1 Teori mengenai Mekanisme Penghalusan Butir

Ada berbagai teori yang menjelaskan tentang mekanisme penghalusan butir pada paduan aluminium. Secara garis besar teori tersebut terbagi atas dua jenis yaitu teori *nucleant paradigm* dan teori *solute paradigm*. Teori mengenai mekanisme penghalusan butir tersebut ditunjukkan oleh Tabel 2.4.

**Tabel 2.4** Teori-teori mengenai mekanisme penghalusan butir<sup>[20]</sup>

Teori	Substrat penginti
<u><i>The Nucleant Paradigm</i></u>	
Teori borida/karbida	Terjadi pada borida atau karbida
Teori diagram fasa	melalui reaksi peritektik
<i>Peritectic hulk</i>	Terjadi dalam kulit borida yang kaya Ti melalui reaksi peritektik
<i>Hypernucleation</i>	Terjadi pada borida
<i>Duplex nucleation</i>	Terjadi pada borida atau karbida Al <sub>3</sub> Ti yang terbentuk pada permukaan partikel TiB <sub>2</sub>
<u><i>The Solute Paradigm</i></u>	
Dikendalikan oleh mekanisme <i>undercooling</i>	Terjadi pada borida atau partikel lain

Dari teori-teori yang terdapat pada tabel tersebut, teori yang paling baru dikemukakan mengenai mekanisme penghalusan butir adalah teori paradigma unsur terlarut. Pada teori tersebut, borida dan partikel-partikel lainnya termasuk TiAl<sub>3</sub> adalah pembentuk inti yang efektif. Teori ini sekaligus membantah teori-teori sebelumnya yang mengatakan bahwa borida bukan pembentuk inti yang baik. Lebih jauh menurut teori ini, keberadaan unsur-unsur terlarut pada aluminium cair sangat mempengaruhi pembentukan inti dari borida dan partikel-partikel lainnya.

Alasan mengapa unsur-unsur terlarut sangat penting dalam mekanisme penghalusan butir adalah bahwa unsur-unsur terlarut mampu membatasi laju pertumbuhan butir. Besarnya kemampuan untuk membatasi laju pertumbuhan butir atau disebut juga kemampuan segregasi dapat dihitung melalui *growth restriction factor (GRF)*<sup>[30]</sup>. GRF dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$GRF = m \cdot C_0 \cdot (k-1) \quad (2.1)$$

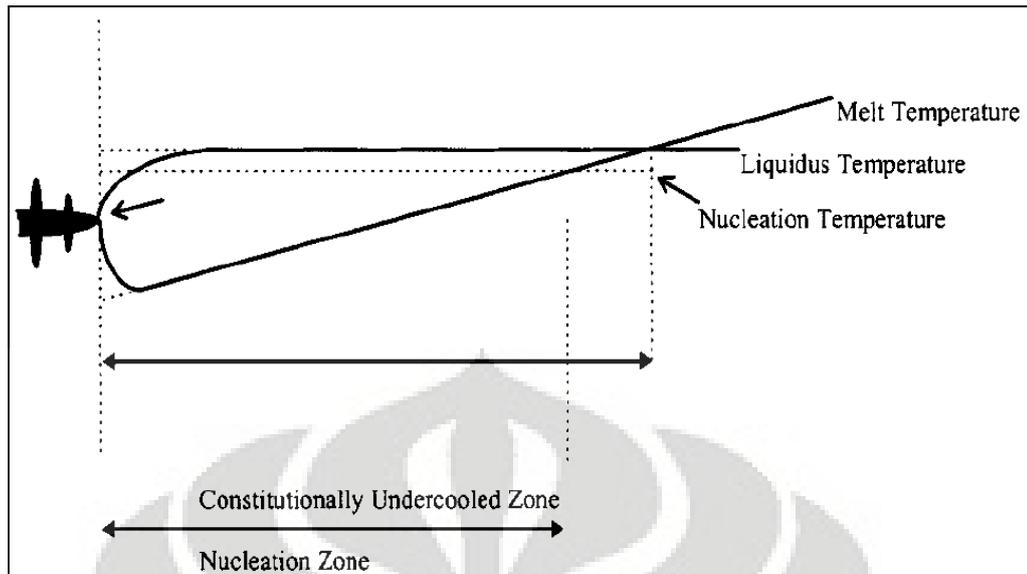
dimana  $m$  adalah kemiringan dari garis *liquidus*,  $C_0$  adalah konsentrasi unsur terlarut, dan  $k$  adalah koefisien partisi kesetimbangan antara logam cair dan padatan pada daerah antarmuka pertumbuhan butir. Pada tabel 2.5 diperlihatkan kemampuan segregasi beberapa unsur terlarut pada paduan aluminium. Titanium diketahui sebagai unsur yang memiliki daya segregasi terbesar karena memiliki nilai  $k$  terbesar yaitu 9. Dengan nilai  $k$  yang besar, keberadaan Ti sebagai unsur terlarut pada aluminium cair mampu membatasi laju pertumbuhan butir pada daerah antarmuka pertumbuhannya<sup>[20]</sup>.

**Tabel 2.5** Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut pada aluminium<sup>[20]</sup>

Unsur	k	m	(k - 1)m	Konsentrasi	Tipe
				Maksimum (wt%)	Reaksi
Ti	~ 9	30.7	245.6	0.15	Peritektik
Ta	2.5	70	105	0.1	Peritektik
V	4	10	30	~ 0.1	Peritektik
Hf	2.4	8	11.2	~ 0.5	Peritektik
Mo	2.5	5	7.5	~ 0.1	Peritektik
Zr	2.5	4.5	6.8	0.11	Peritektik
Nb	1.5	13.3	6.6	~ 0.15	Peritektik
Si	0.11	-6.6	5.9	~ 12.6	Eutektik
Cr	2	3.5	3.5	~ 0.4	Peritektik
Ni	0.01	-3.3	3.3	~ 6	Eutektik
Mg	0.51	-6.2	3	~ 3.4	Eutektik
Fe	0.02	-3	2.9	~ 1.8	Eutektik
Cu	0.17	-3.4	2.8	33.2	Eutektik
Mn	0.94	-1.6	0.1	1.9	Eutektik

Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut terjadi karena unsur-unsur tersebut menciptakan zona *undercooled* mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan butir. Zona *undercooled* mendasar tersebut mengaktifkan partikel pembentuk inti lain di depan daerah antarmuka pertumbuhan butir, sehingga mengganggu pertumbuhan dari butir tersebut dan memberikan waktu kepada butir lain untuk tumbuh<sup>[20]</sup>.

Pada Gambar 2.13 diperlihatkan adanya zona *undercooled* mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dimana pertumbuhan butir baru dapat terjadi dengan adanya unsur-unsur terlarut. Besarnya zona ini bergantung pada kemampuan dari pembentuk inti dan keadaan logam cair.



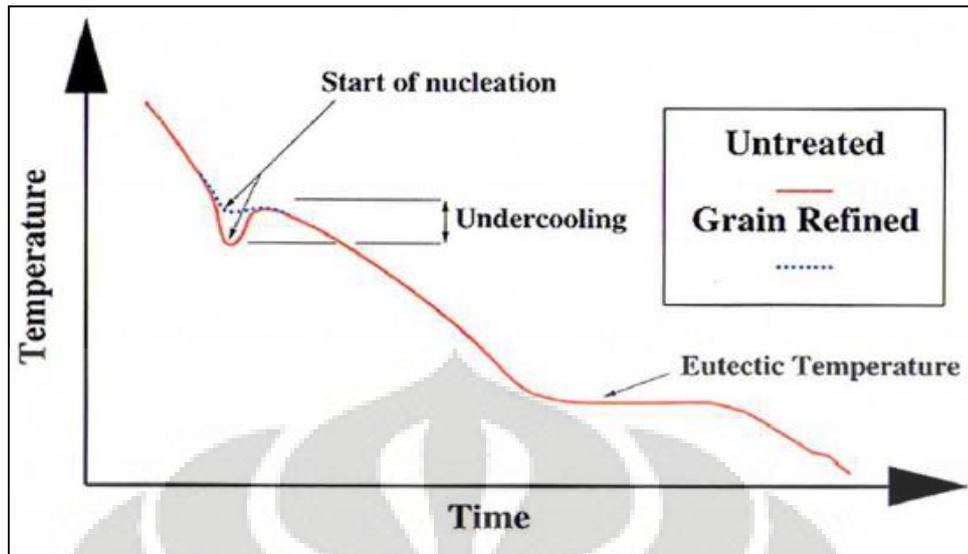
**Gambar 2.13** Zona *undercooled* mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit<sup>[20]</sup>.

Jadi, teori paradigma unsur terlarut menambahkan sekaligus melengkapi dari teori-teori sebelumnya.  $TiB_2$  dan  $TiAl_3$  merupakan partikel pembentuk inti yang efektif.  $TiAl_3$  tidak akan terbentuk jika tidak ada unsur-unsur terlarut seperti titanium dalam jumlah berlebih.  $TiB_2$  juga tidak akan efektif sebagai penghalus butir jika tidak ada unsur-unsur terlarut yang mampu menghambat pertumbuhan butir.<sup>[20]</sup>

## 2.6.2 Karakteristik Penghalusan Butir

### 2.6.2.1 Pengaruh Penghalusan Butir terhadap Temperatur Nukleasi

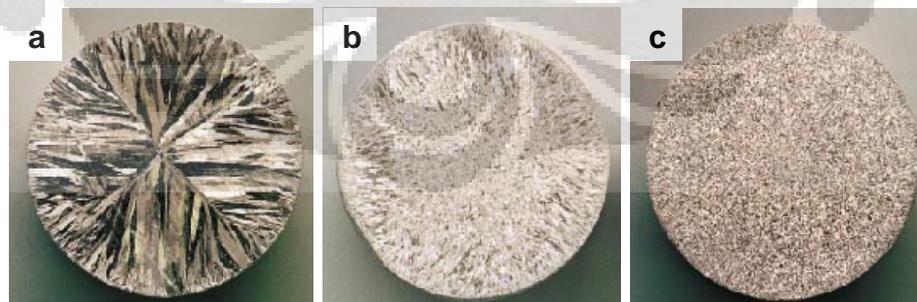
Pemberian penghalus butir terhadap aluminium akan dapat menaikkan temperatur nukleasi  $\alpha$ -Al. Seperti pada paduan A356, penambahan penghalus butir menyebabkan temperatur nukleasi  $\alpha$ -Al naik sekitar  $4-5^\circ C$ <sup>[21]</sup>. Pengaruh penghalus butir terhadap temperatur nukleasi  $\alpha$ -Al ditunjukkan oleh Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Kurva pendinginan paduan Al-Si dengan pengaruh penghalus butir<sup>[2]</sup>.

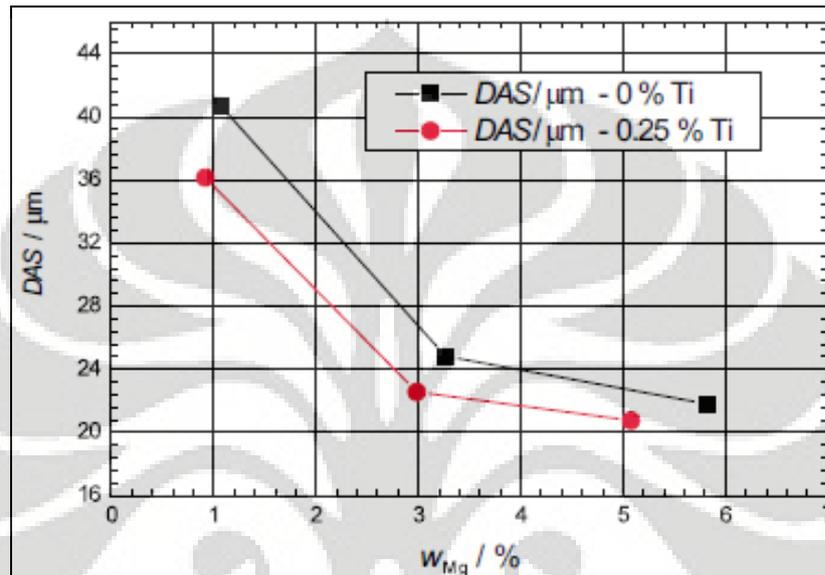
### 2.6.2.2 Pengaruh Penghalusan Butir terhadap Ukuran Butir dan DAS

Mengacu pada mekanisme penghalusan butir yang dikemukakan oleh Easton dan St.John<sup>[20]</sup>, partikel nuklean dan segregasi unsur terlarut merupakan hal yang penting pada efektivitas penghalusan butir. Pelarutan diperlukan untuk membentuk suatu zona *constitutional undercooling* di depan pertumbuhan antarfasa padat-cair untuk memfasilitasi nukleasi selanjutnya pada substrat yang ada. Meningkatnya laju perkembangan zona *constitutional undercooling* ini akan menurunkan waktu yang dibutuhkan untuk nukleasi pada antarfasa, dan kemudian akan menghasilkan ukuran butir yang lebih kecil seperti yang terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Struktur makro aluminium (a) murni, dan dengan penambahan penghalus butir (b) 0.05 wt. % NUCLEANT GRi 2850 dan (c) 0.08 wt. % NUCLEANT GRi 2850<sup>[22]</sup>.

Penambahan penghalus butir akan menghasilkan laju pembekuan yang lebih cepat yang akan menghasilkan *dendrite arm spacing* (DAS) yang lebih kecil jika dibandingkan dengan tanpa penambahan penghalus butir. Seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.16, yang memperlihatkan perbandingan nilai DAS pada paduan dengan dan tanpa menggunakan penghalus butir.



Gambar 2.16 Efek penambahan penghalus butir terhadap nilai DAS<sup>[23]</sup>.

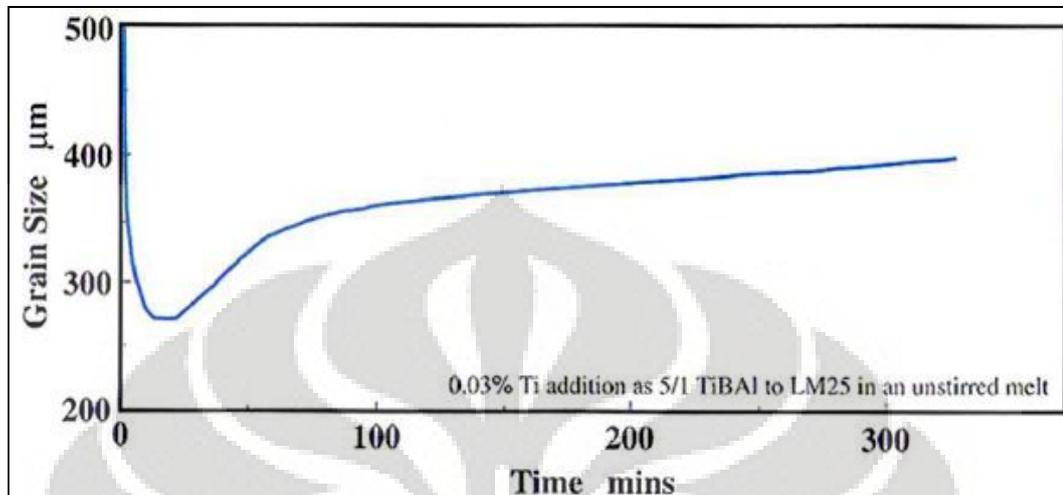
### 2.6.2.3 Pengaruh Penghalusan Butir terhadap Porositas

Aluminium cair akan menyerap hidrogen dari uap air yang terdapat di atmosfer peralatan atau apapun yang ditambahkan ke dalam aluminium cair. Selanjutnya hidrogen tersebut akan ikut dalam proses solidifikasi dan menghasilkan porositas pada coran. Dalam hal ini, penghalus butir dapat menjadi cara untuk menanggulangi dampak tersebut, karena penghalus butir akan menghasilkan porositas yang halus dan terdistribusi lebih merata pada hasil coran.

### 2.6.3 Pemudaran pada Penghalusan Butir

Jika waktu kontak antara penghalus butir dan logam cair terlalu singkat maka ukuran partikel yang halus tidak tercapai. Namun jika waktunya terlalu lama maka efektivitas dari penghalus butir akan semakin berkurang atau biasa disebut dengan pemudaran. Terjadinya pemudaran pada suatu paduan logam dapat terlihat dari ukuran butir. Seiring dengan berjalannya waktu, ukuran butir

akan semakin bertambah besar, yang berarti bahwa fungsi penghalus butir berkurang atau memudar seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.17.



**Gambar 2.17** Pemudaran pada proses penghalusan butir<sup>[2]</sup>.

Ada tiga alasan yang menjelaskan bagaimana peristiwa pemudaran itu terjadi, yaitu karena pengendapan (*settling*), penggumpalan (*agglomeration*), dan pencemaran (*poisoning*). Pengendapan merupakan masalah umum yang terjadi pada logam cair yang tidak dilakukan pengadukan. Hal ini terjadi karena berat jenis dari  $TiB_2$  ( $4.5 \text{ gr/cm}^3$ ) yang lebih besar daripada aluminium cair ( $2.3 \text{ gr/cm}^3$ ). Sedangkan penggumpalan terjadi karena partikel-partikel borida berkumpul dan menggumpal sehingga terjadi pengendapan yang lebih cepat<sup>[24]</sup>.

Pencemaran pada penghalus butir merupakan masalah yang lebih serius karena dapat terjadi dengan sangat cepat dan tidak dapat dikembalikan. Pencemar kimia seperti zirkonium dipercaya dapat mensubstitusi titanium pada partikel  $TiAl_3$  atau pun  $TiB_2$  menjadi  $(Zr,Ti)Al_3$  atau  $(Zr,Ti)B_2$ . Dengan terbentuknya partikel-partikel pengganti tersebut efek pembentukan inti menjadi berkurang. Selain itu, penambahan silikon lebih 3 wt. % juga dapat menyebabkan efek pencemaran<sup>[24]</sup>.

## 2.7 Modifikasi

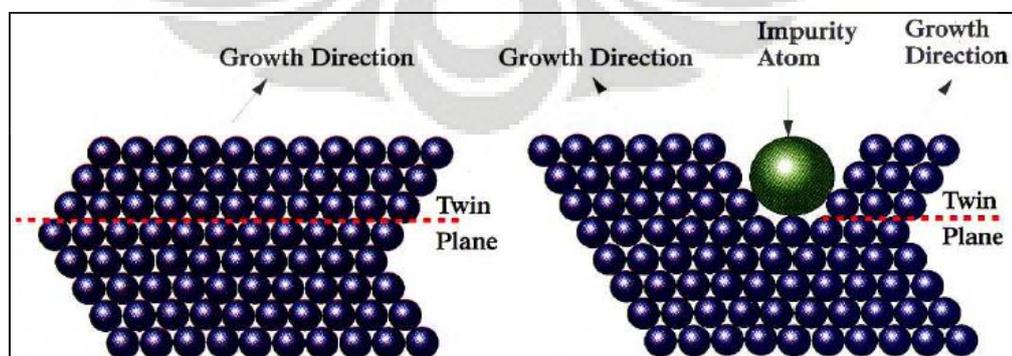
Panambahan beberapa elemen paduan seperti strontium atau sodium pada jumlah tertentu akan mengakibatkan perubahan dalam solidifikasi, serta karakteristik morfologi silikon dalam bentuk eutektik maupun primer. Perubahan itulah yang disebut dengan modifikasi<sup>[9]</sup>.

Dengan adanya penambahan unsur modifikasi, maka hal yang diharapkan antara lain<sup>[9]</sup> :

- 1) Mengontrol morfologi silikon.
- 2) Meningkatkan sifat mekanisnya.
- 3) Meningkatkan ketahanan terhadap retak panas.
- 4) Mengontrol distribusi porositas.
- 5) Meningkatkan kemampuan pengisian cetakan.
- 6) Menekan pertumbuhan silikon primer.

### 2.7.1 Teori Modifikasi

Salah satu hal penting pada kristal silikon adalah mudah terbentuknya *twinning* atau kembaran seperti yang tampak pada Gambar 2.18. Kembaran tersebut merupakan cacat kristalografis yang terjadi ketika sejumlah kelompok atom secara bersamaan bergeser melewati suatu bidang dalam struktur kristal, yang selanjutnya dikenal dengan bidang kembaran. Peristiwa tersebut terjadi secara alami, tapi juga dapat dilakukan dengan cara memberikan atom asing ke dalam bidang pertumbuhan atom silikon, yang dapat mengganggu struktur kristal silikon<sup>[4]</sup>.



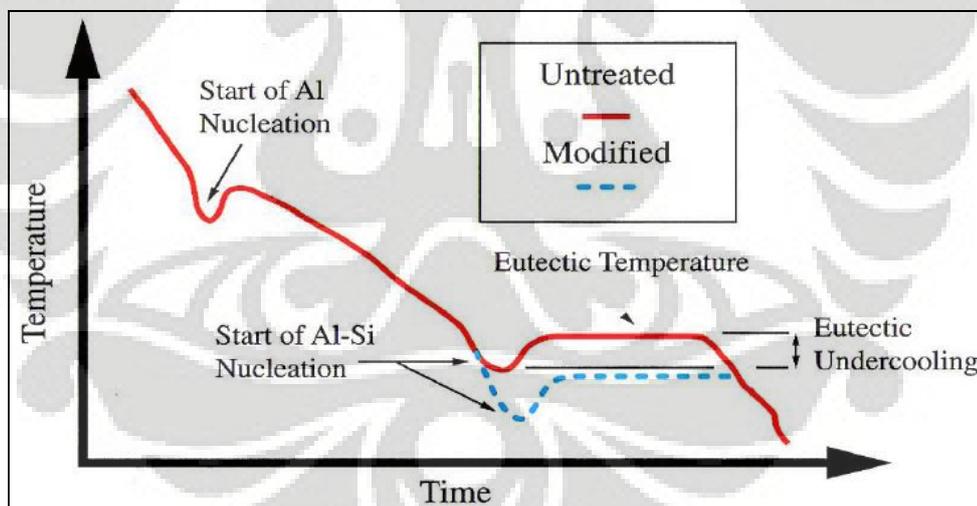
**Gambar 2.18** Ilustrasi pembentukan kembaran pada aluminium tanpa modifikasi dan dengan modifikasi yang memperlihatkan mekanisme *impurities induced twinning*<sup>[4]</sup>.

Struktur silikon yang diperoleh dari peristiwa modifikasi berbeda, yang artinya telah terjadi mekanisme proses pertumbuhan kristal silikon yang berbeda pula. Pada saat digunakan unsur modifikasi, maka akan dihasilkan struktur kristalografi dengan jumlah bidang kembar yang lebih banyak daripada tanpa modifikasi<sup>[9]</sup>. Mekanisme modifikasi ini biasa disebut *impurity induced twinning*, dimana unsur modifikasi seperti stronsium mengganggu tahapan pertumbuhan dari kristal silikon, inilah yang menyebabkan terjadinya kembaran tersebut.

## 2.7.2 Karakteristik modifikasi

### 2.7.2.1 Pengaruh Modifikasi terhadap Temperatur dan Komposisi Eutektik

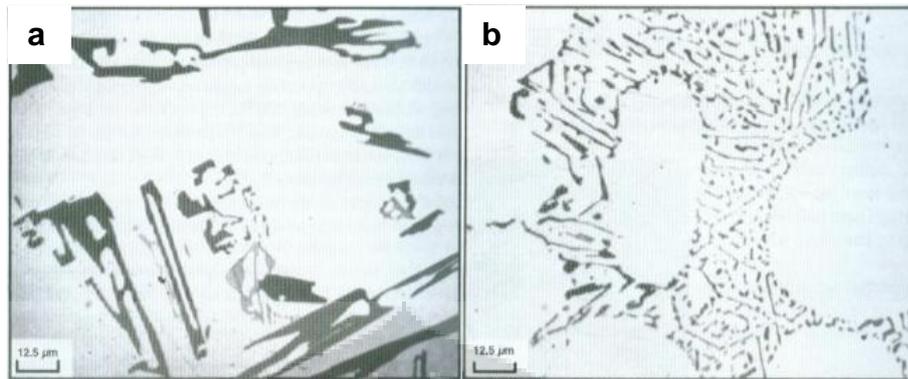
Penambahan unsur modifikasi ke dalam paduan aluminium dapat mengubah temperatur dan komposisi eutektik<sup>[9]</sup>. Temperatur eutektik akan turun dan komposisi eutektiknya pun akan bergeser ke komposisi silikon yang lebih tinggi pada diagram fasa Al-Si. Pengaruh penambahan unsur modifikasi terhadap temperatur eutektik ditunjukkan oleh Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Kurva Pendinginan Al-Si dengan pengaruh modifikasi<sup>[4]</sup>.

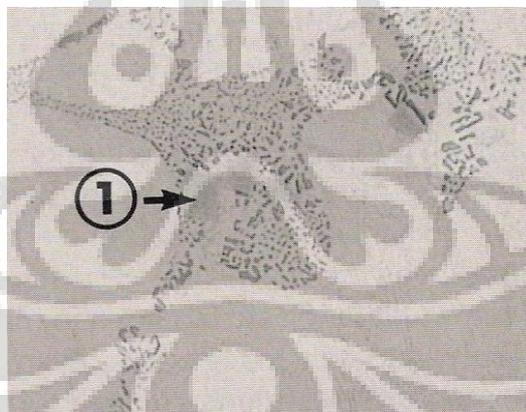
### 2.7.2.2 Pengaruh Modifikasi terhadap Struktur Mikro

Penambahan sejumlah sodium atau strontium akan merubah morfologi silikon eutektik dan silikon primer<sup>[9]</sup>. Dimana morfologi kristal silikon tersebut akan berubah dari bentuk seperti jarum menjadi bentuk serat. Perbedaan morfologi silikon tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.20.



**Gambar 2.20** Morfologi silikon pada aluminium silikon eutektik pada kondisi (a) tidak dimodifikasi, (b) dimodifikasi<sup>[25]</sup>.

Penambahan unsur modifikasi dalam jumlah yang besar ( $\text{Na} > 0.02\%$  dan  $\text{Sr} > 0.1\%$ ) akan menyebabkan perubahan morfologi silikon pada bagian tertentu di struktur mikronya. Pita-pita dari fasa aluminium akan berasosiasi dengan fasa silikon yang kasar. Pita-pita tersebut akan mengarah pada pembentukan fasa terner  $\text{AlSiNa}$  dan  $\text{Al}_4\text{SrSi}_2$  yang nukleasi silikon kasar<sup>[9]</sup>. Peristiwa tersebut disebut dengan overmodifikasi seperti terlihat pada Gambar 2.21.



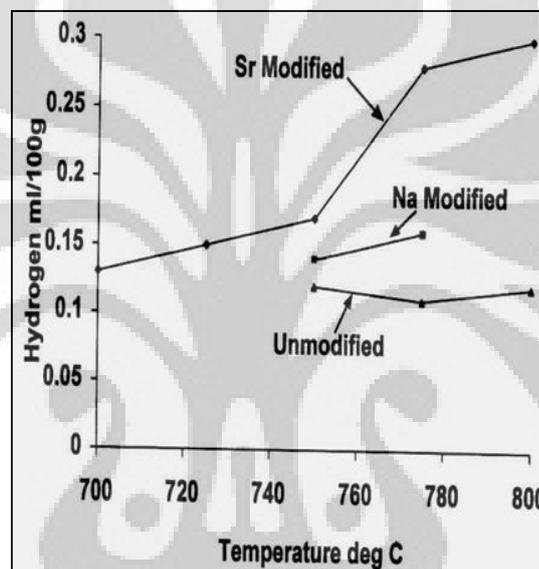
**Gambar 2.21** Pengaruh overmodifikasi terhadap struktur mikro aluminium<sup>[1]</sup>.

### 2.7.2.3 Pengaruh Modifikasi terhadap Porositas

Modifikasi dengan suatu elemen akan menghasilkan perubahan pada porositas benda cor. Coran yang tidak dimodifikasi biasanya memiliki porositas yang besar serta adanya penyusutan. Dengan modifikasi, porositas yang berukuran besar akan berubah menjadi lebih terdistribusi pada hasil coran. Perbedaan

distribusi porositas antara cairan logam yang dimodifikasi dan yang tidak dimodifikasi dijelaskan dalam beberapa hal berikut<sup>[9]</sup>:

- a) Besarnya perbedaan kelarutan hidrogen dalam keadaan padat dan cair menyebabkan gas hidrogen terperangkap ketika aluminium cair membeku. Kehadiran stronsium cenderung akan meningkatkan kelarutan hidrogen dalam logam cair yang akan menyebabkan peningkatan porositas. Pengaruh temperatur terhadap kelarutan hidrogen dalam aluminium cair dengan berbagai kondisi modifikasi ditunjukkan oleh Gambar 2.22.



**Gambar 2.22** Kelarutan hidrogen dalam aluminium cair yang dimodifikasi dan tidak dimodifikasi<sup>[6]</sup>.

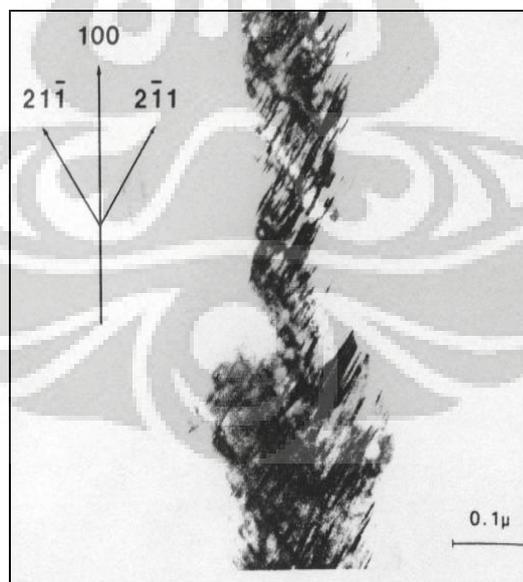
- b) Rendahnya kemampuan pengisian dalam suatu coran maka akan menuju pada adanya daerah yang tidak terisi dalam area interdendritik yang akan dapat menyebabkan pembentukan porositas. Kemampuan pengisian dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti kisaran pembekuan, energi antarmuka padat-cair. Stronsium telah diketahui dapat mempengaruhi kisaran pembekuan dan energi antarmuka padat-cair pada paduan aluminium-silikon. Dimana nantinya stronsium tersebut akan dapat merubah distribusi porositas pada paduan aluminium-silikon yang sudah dimodifikasi.

- c) Kehadiran inklusi seperti oksida dan stronsium yang berbahan dasar oksida akan bertindak sebagai nuklea pada porositas yang disebabkan karena adanya gas hidrogen.

#### 2.7.2.4 Pengaruh Modifikasi terhadap Jumlah Kembaran

Modifikasi akan meningkatkan jumlah kembaran dalam paduan aluminium-silikon ketika silikon dalam bentuk tajam seperti jarum berubah menjadi bentuk serat. Jarak rata-rata antara kembaran dalam silikon normal antara 0.4 sampai 1.0  $\mu\text{m}$ , dimana ketika silikon telah berubah bentuk menjadi serat, jarak antara kembarannya kurang dari 5 nm<sup>[9]</sup>.

Arah pertumbuhan silikon normal adalah  $\langle 211 \rangle$ , sedangkan untuk silikon yang sudah dimodifikasi arahnya adalah  $\langle 100 \rangle$ . Satu hal yang lebih penting pada perbedaan dua struktur tersebut adalah jumlah sistem kembaran yang aktif. Dalam silikon normal hanya dua dari empat kemungkinan sistem kembaran  $\langle 111 \rangle$  yang bisa teramati. Sementara itu pada silikon yang sudah dimodifikasi, keempat dari sistem kembaran  $\langle 111 \rangle$  dapat diamati. Hasil pengamatan silikon yang sudah dimodifikasi dengan menggunakan TEM dapat dilihat pada Gambar 2.23.

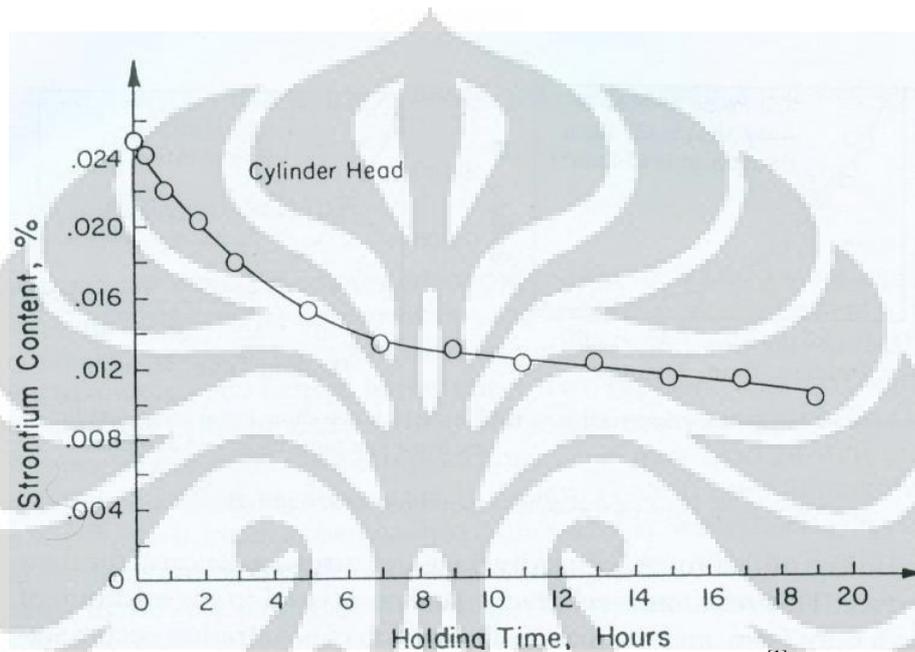


Gambar 2.23 Hasil TEM serat silikon yang sudah dimodifikasi<sup>[9]</sup>.

#### 2.7.3 Pemudaran pada Modifikasi

Pemudaran pada modifikasi sangat berhubungan dengan kandungan stronsium dalam cairan logam. Dengan pemberian stronsium, intensitas dari

modifikasi akan menurun dengan semakin bertambahnya waktu tahan. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.24, level modifikasi menurun seiring dengan meningkatnya waktu tahan setelah penambahan sejumlah kecil *master alloy* modifikasi. Ketika penambahan stronsium pada kadar yang tinggi, derajat modifikasi akan tetap seperti periode awal, dan kemudian akan menurun dengan bertambahnya waktu tahan<sup>[21]</sup>.



Gambar 2.24 Pemudaran pada modifikasi paduan Al-7Si<sup>[1]</sup>.

Dari literatur didapat bahwa pemudaran stronsium bisa terjadi karena tiga hal berikut<sup>[21]</sup> :

- Menguap karena tingginya tekanan uap pada temperatur peleburan
- Teroksidasi karena tingginya afinitas oksigen
- Bereaksi dengan elemen lain yang memiliki afinitas yang tinggi

Partikel intermetalik tipe  $Al_2SrSi_2$  akan terbentuk pada kadar stronsium 500 ppm. Yang kemudian akan menurunkan jumlah stronsium dalam larutan logam cair dan tentunya mempengaruhi proses modifikasi.

## 2.8 Penggabungan Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi

Pada paduan A356, penambahan penghalus butir akan menaikkan temperatur nukleasi  $\alpha$ -Al sekitar 4-5°C, sementara penambahan unsur modifikasi seperti stronsium akan menurunkan temperatur eutektik sekitar 7-8°C. Dengan

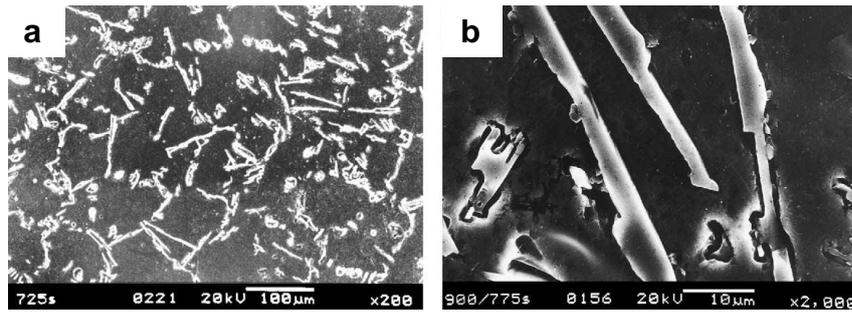
kata lain, jika kedua jenis zat tersebut dikombinasikan, kisaran solidifikasi, atau perbedaan temperatur dari temperatur nukleasi  $\alpha$ -Al ke temperatur eutektik, akan terjadi peningkatan sekitar 11-13°C<sup>[21]</sup>.

Penambahan sejumlah kecil titanium dan boron akan menyebabkan pergeseran kurva pendinginan ke atas. Penambahan penghalus butir akan dapat mempercepat nukleasi  $\alpha$ -Al primer karena adanya nuklea yang banyak dalam aluminium cair. Temperatur nukleasi dan pertumbuhan partikel  $\alpha$ -Al akan meningkat walaupun peningkatan tersebut lebih besar pada kasus nukleasi. Hal tersebut mengindikasikan ada lebih banyak nuklea dengan kesempatan tumbuh yang rendah pada waktu yang diberikan selama proses nukleasi dan pertumbuhan awal fasa  $\alpha$ -Al. Perubahan pada parameter temperatur eutektik merupakan hal yang sama, baik penambahan secara sendiri-sendiri ataupun kombinasi kedua perlakuan tersebut, yang mengindikasikan bahwa penghalus butir dan unsur modifikasi tersebut bisa bertindak sendiri selama proses solidifikasi<sup>[21]</sup>.

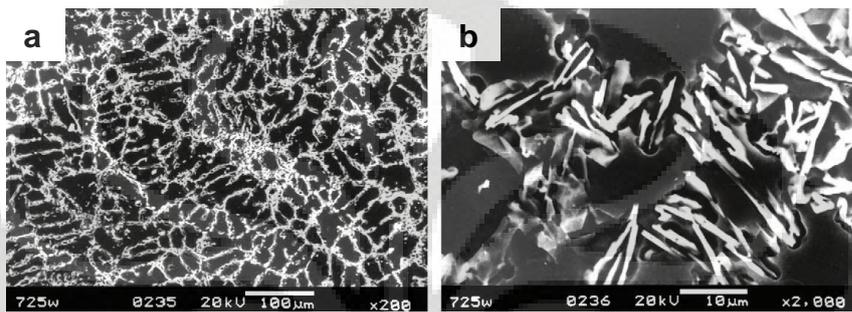
## **2.8.1 Karakteristik Penggabungan Penghalus butir dan Unsur Modifikasi**

### **2.8.1.1 Pengaruh terhadap Struktur Mikro dan SDAS**

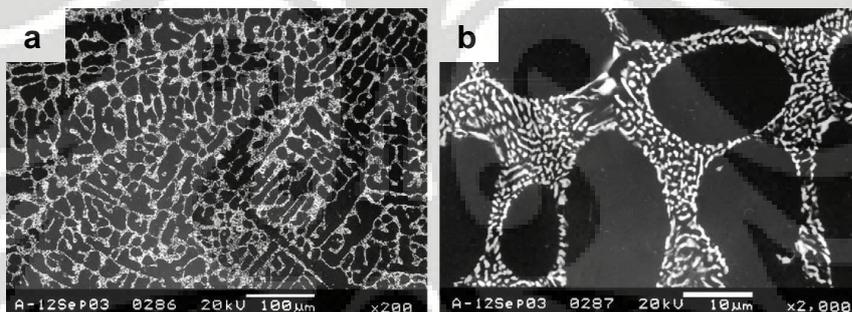
Dalam suatu penelitian yang dilakukan oleh A.K. Prasada Rao *et al*<sup>[27]</sup>, pada paduan aluminium Al-7Si tanpa penambahan penghalus butir ataupun unsur modifikasi, didapatkan nilai *secondary dendrite arm spacing* (SDAS) sekitar 60  $\mu\text{m}$  (Gambar 2.25). Ketika dilakukan penambahan penghalus butir 1 wt. % Al-1Ti-3B, nilai SDAS pada paduan aluminium tersebut menjadi 24  $\mu\text{m}$  (pada Gambar 2.26), dan dengan penambahan unsur modifikasi 0.02 wt. % Sr, nilai SDAS menjadi 51  $\mu\text{m}$  (Gambar 2.27). Dan ketika dilakukan penambahan kombinasi antara 1 wt. % Al-1Ti-3B dan 0.02 wt. % Sr didapatkan nilai SDAS pada paduan aluminium tersebut menjadi 22  $\mu\text{m}$  (Gambar 2.28), yang memperlihatkan struktur mikro dendrit yang halus serta partikel eutektik silikon yang memiliki bentuk seperti serat.



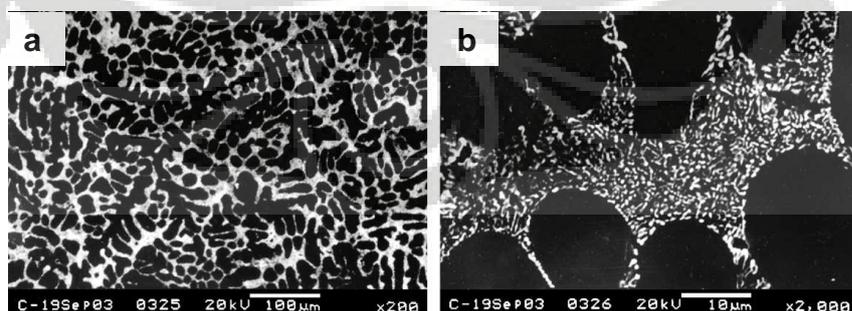
**Gambar 2.25** Hasil SEM paduan Al-7Si tanpa penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi pada (a) perbesaran rendah dan (b) perbesaran tinggi<sup>[27]</sup>.



**Gambar 2.26** Hasil SEM paduan Al-7Si dengan penambahan 1 wt. % Al-1Ti-3B (a) perbesaran rendah dan (b) perbesaran tinggi<sup>[27]</sup>.



**Gambar 2.27** Hasil SEM paduan Al-7Si dengan penambahan 0.02 wt. % Sr pada (a) perbesaran rendah dan (b) perbesaran tinggi<sup>[27]</sup>.



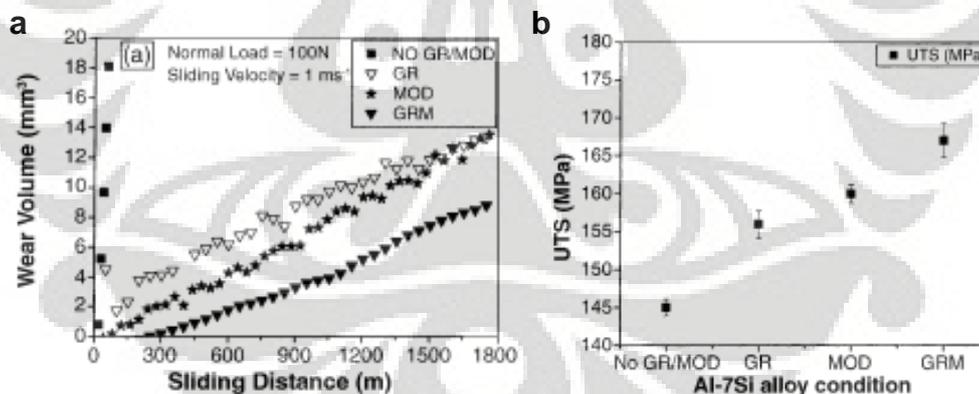
**Gambar 2.28** Hasil SEM paduan Al-7Si dengan penambahan kombinasi 1 wt. % Al-1Ti-3B dan 0.02 wt. % Sr pada (a) perbesaran rendah dan (b) perbesaran tinggi<sup>[27]</sup>.

### 2.8.1.2 Pengaruh terhadap Porositas

Pada penggabungan penghalus butir dan unsur modifikasi, zona *mushy* akan menjadi lebih panjang, dan radius cairan pada saluran akan semakin mengecil ketika jumlah aliran meningkat. Hal inilah sebagai salah satu penyebab meningkatnya porositas. Dari studi yang dilakukan oleh Shivkumar<sup>[21]</sup>, didapat bahwa jumlah porositas dalam paduan yang mengkombinasikan penghalus butir dan unsur modifikasi lebih sedikit dari paduan yang hanya dimodifikasi saja tapi lebih banyak dari pada paduan yang dilakukan proses penghalusan butir saja.

### 2.8.1.3 Pengaruh terhadap Kekuatan Mekanis

Dari pengujian keausan pada paduan Al-7Si didapatkan bahwa volume aus pada spesimen dengan penggabungan penghalus butir dan unsur modifikasi, memiliki nilai yang paling rendah jika dibandingkan dengan paduan aluminium yang tidak diberikan penghalus butir atau unsur modifikasi, ataupun tanpa pemberian keduanya. Hal ini berarti paduan Al-7Si dengan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi memiliki ketahanan aus yang paling tinggi dibandingkan dengan yang lainnya, seperti yang terlihat pada Gambar 2.29.a<sup>[27]</sup>.



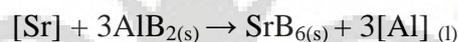
Gambar 2.29 Pengaruh kombinasi penghalus butir dan unsur modifikasi terhadap (a) ketahanan aus dan (b) kekuatan tarik paduan Al-7Si<sup>[27]</sup>.

Pada uji kekuatan tarik paduan Al-7Si didapatkan paduan tanpa penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi memiliki kekuatan tarik yang rendah. Dengan penambahan penghalus butir atau unsur modifikasi terjadi peningkatan UTS yang cukup signifikan. Nilai UTS yang paling tinggi berada pada paduan Al-7Si yang ditambahkan dengan kombinasi penghalus butir dan unsur modifikasi, seperti yang terlihat pada Gambar 2.29.b. Peningkatan sifat

mekanis melalui kombinasi penghalus butir dan unsur modifikasi bisa terjadi antara lain karena adanya pembentukan dendrit dan silikon eutektik yang halus melalui kedua perlakuan tersebut<sup>[27]</sup>.

### 2.8.2 Pemudaran pada Kombinasi Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi

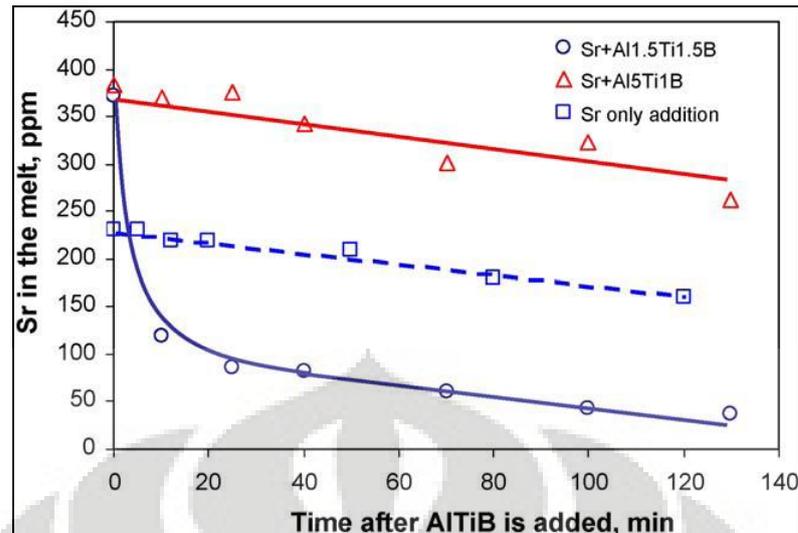
Liao dan Sun<sup>[21]</sup> menyimpulkan bahwa pada paduan sekitar eutektik, efek penghalusan dari boron akan berkurang dengan adanya penambahan stronsium, dengan kata lain, kemampuan boron untuk menghaluskan butir telah tercemar oleh stronsium. Efek pencemaran juga bisa diamati jika kandungan stronsium dan boron melebihi batas tertentu, dimana nantinya efek penghalusan dari boron dan modifikasi dari stronsium akan berkurang. Interaksi ini bisa dihubungkan dengan adanya pembentukan senyawa  $\text{SrB}_6$ . Dengan adanya kelebihan boron dalam aluminium cair dalam bentuk  $\text{AlB}_2$ , akan bereaksi dengan stronsium membentuk  $\text{SrB}_6$  melalui reaksi seperti berikut ini,



Partikel  $\text{SrB}_6$  yang terbentuk memiliki berat jenis yang tinggi sekitar  $3.422 \text{ g/cm}^3$  dan kemudian akan mengendap di bagian bawah cairan. Partikel  $\text{SrB}_6$  tersebut akan terus tumbuh ketika mengendap di bagian bawah cairan. Sebagai hasilnya, maka senyawa intermetalik yang kaya akan stronsium dan boron akan berada dilapisan pada bagian bawah logam cair dan tentunya kadar stronsium dalam logam cair akan menurun secara drastis.

Hal yang sama juga terjadi pada penurunan efektivitas stronsium sebagai unsur modifikasi dalam aluminium cair ketika meningkatnya penambahan penghalus butir Al-5Ti-1B. Hal tersebut terjadi karena adanya efek pencemaran dari penghalus butir terhadap modifikasi.

Lu dan Dahle<sup>[21]</sup> dari penelitiannya didapat bahwa paduan aluminium A356 yang ditambahkan Al-1.5Ti-1.5B akan kehilangan stronsium dengan cepat jika dibandingkan dengan menggunakan Al-5Ti-1B seperti terlihat pada Gambar 2.30. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pada aluminium yang ditambahkan Al-1.5Ti-1.5B akan ada stronsium bebas yang tidak cukup untuk memodifikasi semua silikon eutektik pada logam tersebut.

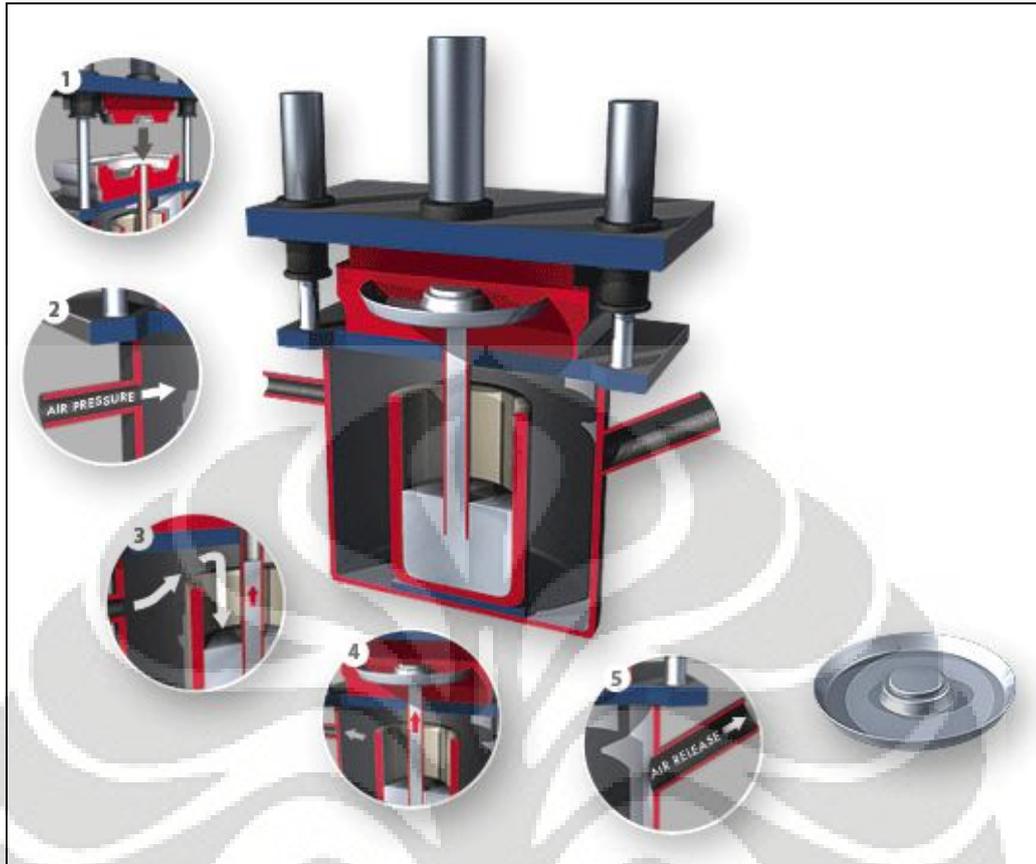


Gambar 2.30 Pengaruh penghalus butir terhadap kandungan Sr dalam aluminium cair<sup>[21]</sup>.

## 2.9 Low Pressure Die Casting

*Low pressure die casting* (LPDC) merupakan pengembangan dari proses cetakan permanen dimana logam dialirkan dari bawah ke dalam cetakan. Secara sederhana mesin LPDC terdiri atas *holding furnace* yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan logam cair yang akan dicor. Cetakan logam berada di bagian atas *holding furnace*. Sebagai tempat untuk mengalirkan logam cair antara *holding furnace* dan cetakan logam dihubungkan oleh suatu *refractory-line tube* yang biasa disebut *riser tube* atau *stalk*.

Ketika udara diberikan ke dalam *furnace* pada tekanan rendah sekitar 15-100 kPa atau 2-15 psi, logam cair yang berada dalam *holding furnace* akan naik melalui *riser tube* untuk kemudian masuk ke dalam rongga cetakan dengan turbulensi yang rendah. Udara akan keluar melalui *vents* dan *parting line* yang terdapat pada cetakan. Ketika logam mulai membeku, tekanan udara akan dilepaskan dan logam yang terdapat dalam *riser tube* akan kembali ke *holding furnace*. Setelah beberapa waktu dimana logam telah membeku, cetakan akan terbuka dan produk cor dikeluarkan. Skematis proses LPDC dapat terlihat pada Gambar 2.31.



Gambar 2.31 Skematis proses LPDC<sup>[29]</sup>.

Keunggulan proses LPDC<sup>[28]</sup> :

- 1) Sifat mekanis produk cor yang baik.
- 2) Yield yang tinggi pada produk cor yaitu sekitar di atas 90 %.
- 3) Keakuratan dimensi yang tinggi.
- 4) Kontrol proses yang sangat baik karena parameter proses yang bisa ditentukan.
- 5) Pembekuan yang terarah bisa didapatkan sehingga dapat mengurangi kebutuhan akan penggunaan *riser*.
- 6) Disain yang bervariasi.
- 7) Kualitas permukaan hasil cor yang baik.
- 8) Pengisian yang seragam menghasilkan kualitas metalurgi yang baik.
- 9) Sangat cocok untuk produksi massal.
- 10) Semua proses bisa dijalankan secara otomatis.

Kelemahan proses LPDC<sup>[28]</sup> :

- 1) Kecenderungan cacat porositas.
- 2) Kecenderungan cacat penyusutan.
- 3) Solidifikasi prematur.
- 4) Tidak bisa untuk pengecoran benda yang tipis.
- 5) Waktu alir yang lama.

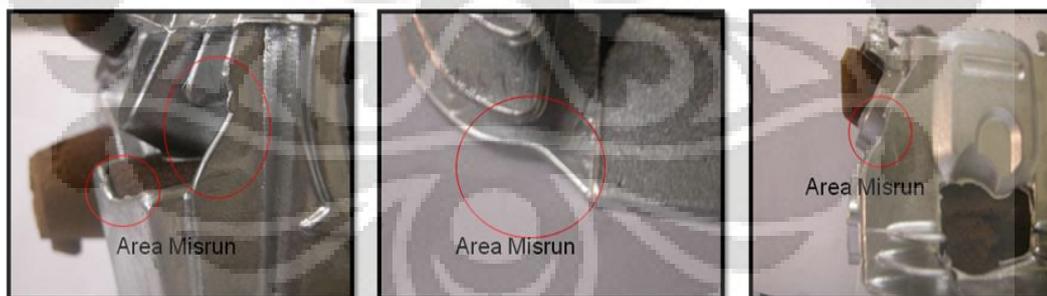
### 2.10 Cacat-cacat pada Pengecoran LPDC

Komponen *cylinder head* yang dihasilkan melalui proses LPDC memiliki tingkat kegagalan yang cukup tinggi karena keberadaan berbagai cacat pada komponen tersebut. Cacat tersebut antara lain *misrun*, penyusutan dan porositas.

#### a) *Misrun*

*Misrun* merupakan suatu cacat yang terjadi karena logam cair tidak mengisi seluruh rongga cetakan sehingga benda cor menjadi tidak lengkap atau ada bagian yang hilang dari benda cor seperti yang tampak pada Gambar 2.32.

Jenis *misrun* yang paling sering ditemui pada pengecoran *cylinder head* AC4B adalah *misrun* sirip dimana aluminium tidak mengisi penuh seluruh rongga cetakan terutama pada bagian sirip.



Gambar 2.32 Cacat *misrun* pada *cylinder head*<sup>[30]</sup>.

Penyebab terjadinya *misrun*<sup>[6]</sup> :

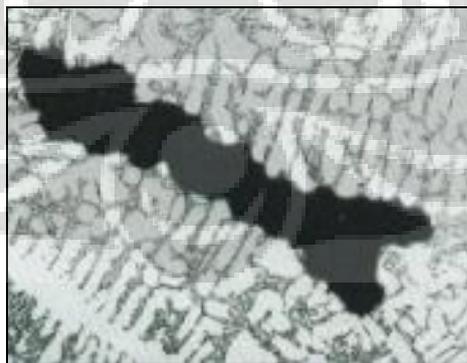
- Fluiditas cairan logam kurang baik (banyak inklusi)
- Ketidakteraturan dimensi benda cor
- Benda cor terlalu tipis
- Temperatur terlalu rendah

- Kecepatan penuangan yang terlalu lambat
- Lubang angin yang kurang pada cetakan
- *Coating* terlalu tipis
- *Riser* yang tidak sempurna
- Ukuran saluran masuk, *runner* dan *sprue* tidak sesuai

#### b) Penyusutan

Kebanyakan logam cair memiliki sifat akan menepati ruang yang lebih sedikit ketika mengalami perubahan kondisi atau keadaan. Dengan kata lain, ketika suatu logam mengalami perubahan dari cair menjadi padat, logam tersebut mengambil sedikit ruang dari pada ketika dalam keadaan cair. Aluminium merupakan logam dengan tingkat penyusutan yang paling tinggi yaitu sekitar 7 %.

Tempat atau ruang terjadinya penyusutan dalam produk cor disebut dengan cacat *shrink porosity* atau cacat porositas karena penyusutan seperti yang terlihat pada Gambar 2.33. Ruangan kosong yang terdapat pada penyusutan porositas biasanya akan diisi oleh suatu gas, dan bisa juga tidak ada gas yang mengisi ruangan kosong tersebut atau berada dalam kondisi vakum. Selain di bagian dalam produk cor, cacat porositas karena penyusutan juga bisa terbentuk di luar atau di permukaan hasil pengecoran. Cacat ini akan terus terjadi pada bagian logam yang mengalami pembekuan yang paling terakhir.



**Gambar 2.33** Cacat porositas karena penyusutan<sup>[1]</sup>

### c) Porositas Gas

Porositas gas merupakan salah satu masalah utama dalam *die casting*. Penyebabnya adalah terperangkapnya gas ketika logam cair mulai membeku. Porositas gas bentuknya selalu merupakan gelembung-gelembung yang secara khas terlihat sebagai rangkaian lubang-lubang yang bulat pada produk casting seperti yang tampak pada Gambar 2.34. Hal inilah yang menjadi perbedaan utama pada porositas yang disebabkan oleh penyusutan. Dimana pada penyusutan, porositas yang dihasilkan memiliki bentuk yang tidak beraturan.

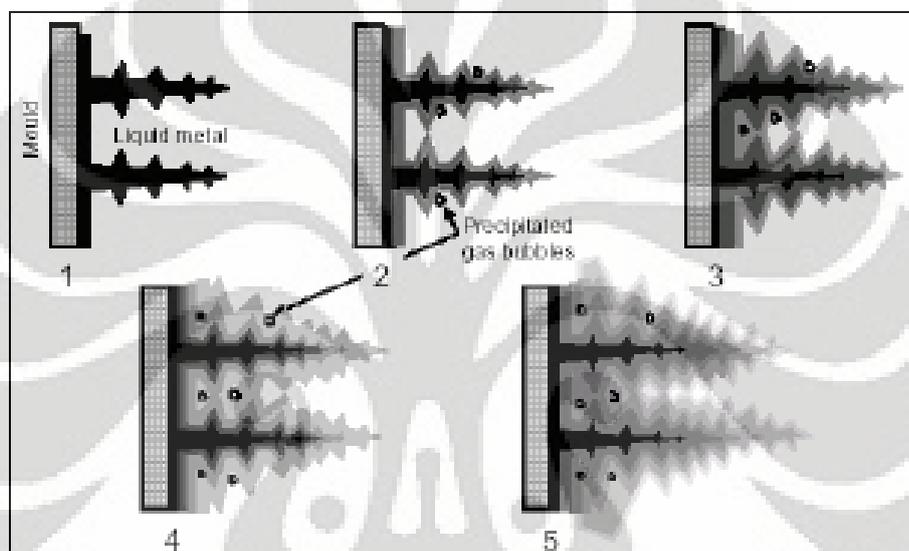


**Gambar 2.34** Cacat porositas yang disebabkan oleh terperangkapnya gas<sup>[1]</sup>

Gas yang menyebabkan porositas pada produk cor dapat berasal dari gas hidrogen yang berasal dari atmosfer. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, kelarutan hidrogen dalam aluminium akan semakin besar seiring dengan bertambah tingginya temperatur aluminium cair. Pada proses penuangan, hidrogen akan tertinggal setelah proses pembekuan. Gas yang dikeluarkan akan membentuk inti kristal pada struktur mikro pada cairan selama pembekuan dan diantara fasa padat-cair<sup>[7]</sup>. Proses pembentukan porositas karena gas yang terperangkap pada saat proses pembekuan logam ditunjukkan oleh Gambar 2.35.

Selain berasal dari gas hidrogen, gas yang menjadi penyebab porositas gas dapat berasal dari gas yang terperangkap pada sistem saluran, uap air, dan pelumas yang terbakar. Pada *die casting*, karena memanfaatkan tekanan tinggi (terutama pada HPDC), akan sangat rentan terjadinya turbulensi pada aliran logam sebelum memasuki cetakan. Aliran logam yang turbulen inilah yang dapat menyebabkan terperangkapnya udara yang terdapat pada sistem saluran aliran

logam. Uap air terjadi ketika logam cair bertemu dengan air seiring dengan logam cair mengisi cetakan. Air tersebut dapat berasal dari pelumas yang berbahan dasar dari air, cetakan yang masih basah, dan sebagainya. Air tersebut diubah menjadi uap dalam sebuah ledakan. Sebuah gelembung gas dari uap sekarang terbentuk dimana tadinya merupakan setitik air. Sementara itu, pelumas dapat menguap, mendidih, atau terbakar ketika logam cair mengenainya. Nantinya akan menyebabkan ada gas yang terbentuk dan terperangkap dalam logam cair<sup>[7]</sup>. Morfologi porositas yang disebabkan oleh gas tampak pada Gambar 2.35.

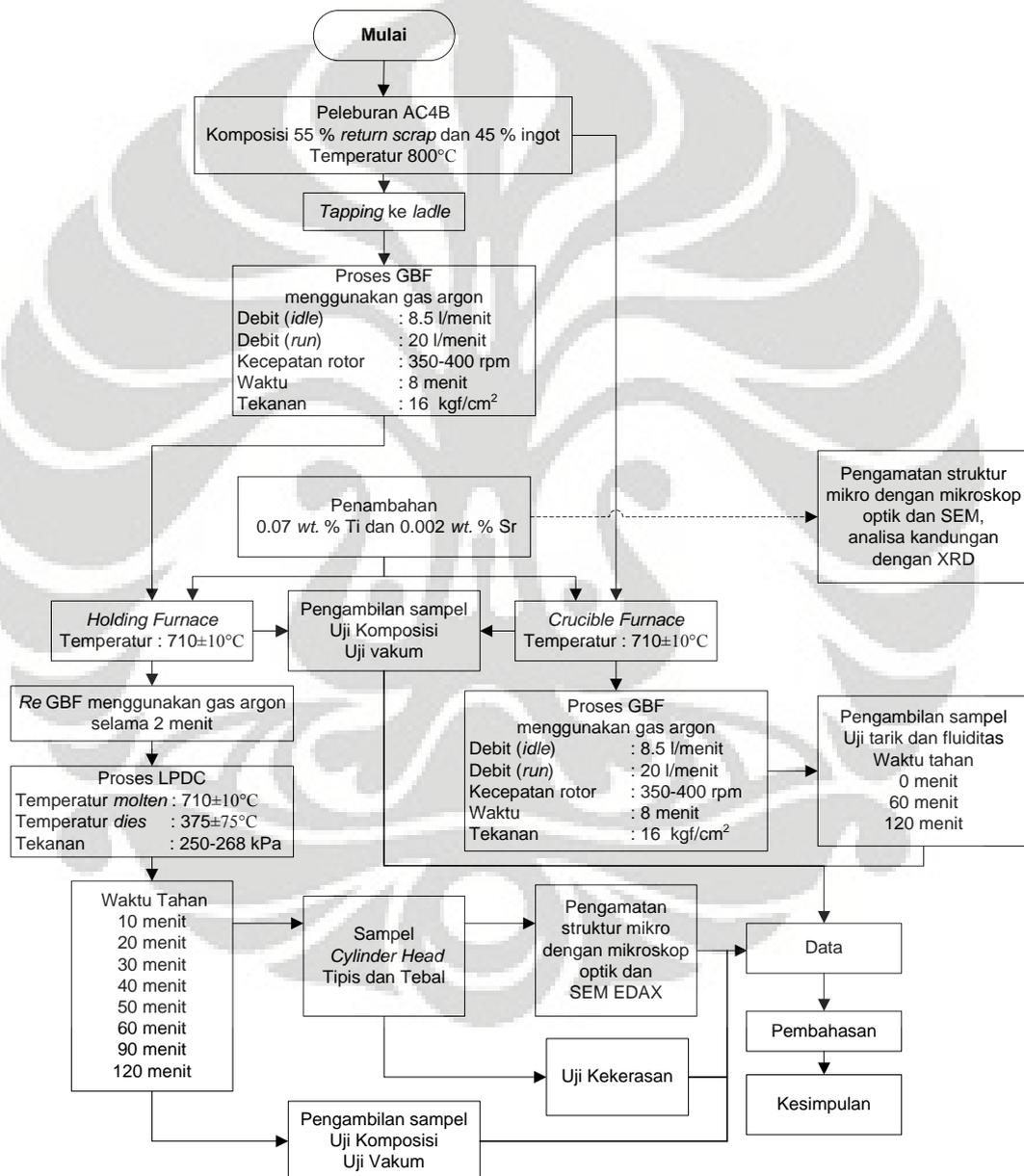


Gambar 2.35 Ilustrasi proses terbentuknya porositas gas pada logam<sup>[6]</sup>.

## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan-tahapan proses dalam penelitian ini untuk melihat fenomena pemudaran pada paduan aluminium AC4B dengan kombinasi penambahan titanium dan stronsium ditunjukkan oleh 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) Ingot paduan aluminium AC4B (45 %),
- 2) *Return scrap* paduan aluminium AC4B (55 %),
- 3) Penghalus butir merk Coveral GR 2815 dalam bentuk fluks,
- 4) Unsur modifikasi Al-10 Sr dalam bentuk *master alloy*.
- 5) Fluks merk Coveral 111
- 6) Kertas amplas dengan ukuran *mesh* 120 – 1500
- 7) Kain poles
- 8) Zat poles alumina, dan
- 9) Zat etsa (HF 5 %) dan Reagen Tucker (15 ml HNO<sub>3</sub> + 45 ml HCl + 15 ml HF (45 %) + 25 ml H<sub>2</sub>O).

### 3.2.2 Peralatan

Penelitian ini menggunakan peralatan sebagai berikut,

- 1) Dapur peleburan FCECO dengan spesifikasi:
  - Model HM - 150T buatan Furnace Kakoki Co.Ltd
  - Kapasitas dapur : 1500 kg
  - Laju peleburan : 500 kg/jam
- 2) Mesin *gas bubble flotation* (GBF) dengan spesifikasi:
  - Model Smart Clean buatan PT. Ostenko Promitra Jaya
  - Agen atau material : Gas argon (Ar)
  - Kecepatan rotor : 350-400 rpm
  - Tekanan argon : 16 kgf/cm<sup>2</sup>
  - Waktu : 8 menit
  - Temperatur aluminium cair : 850 °C
  - Debit gas Ar *idle*  
(sebelum rotor masuk ke *molten*): 8,5 l/menit
  - Debit gas Ar *run*  
(setelah rotor masuk ke *molten*): 20 l/menit

- 3) Mesin LPDC dengan spesifikasi:
  - Model OG - LFR - 500P buatan Osaka Giken Co.Ltd
  - Dapur induksi (*holding furnace*)
    - Temperatur aluminium cair :  $710 \pm 10$  °C
    - Kapasitas : 500 kg
  - Mesin *inject* (LPDC), dengan spesifikasi
    - Temperatur *dies* :  $375 \pm 75$  °C
    - Tekanan *dies* :  $256 \pm 6$  kPa
    - Waktu tekan : 170 – 180 detik
- 4) *Crucible furnace*
- 5) *Ladle bentone* yang dipanaskan dengan *burner* selama 30 – 60 menit
- 6) Neraca
- 7) *Forklift*
- 8) *Sludging rod*
- 9) *Skimmer*
- 10) *Cleaning rod*
- 11) *Speedy*
- 12) *Injection gas bubble flotation* (manual)
- 13) Mesin potong *abrasive* (gergaji mesin) Heiwa
- 14) Cetakan spiral uji fluiditas
- 15) Cetakan sampel uji tarik
- 16) Alat uji vakum (uji porositas) OSTEK
- 17) Alat spektrometer Shimadzu
- 18) Alat uji kekerasan (Rockwell B) merek Future Tech
- 19) Mesin amplas merek Ecomet
- 20) Mesin poles merek Ecomet
- 21) Mikroskop optik merek Olympus
- 22) Peralatan *scanning electron microscope* merek LEO 420i
- 23) Peralatan *x-ray diffraction* merek Philip tipe PW 1710
- 24) Lain-lain : spidol, tang penjepit, palu, masker dan sarung tangan

### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Peleburan

Proses peleburan paduan aluminium AC4B menggunakan dapur peleburan FCECO seperti yang tampak pada Gambar 3.2. Suhu peleburan berkisar sekitar 800 °C. Pada proses tersebut komposisi ingot aluminium yang digunakan sekitar 45 % dan *return scrap* sekitar 55 %.



**Gambar 3.2** Dapur peleburan FCECO.

Untuk menghilangkan kotoran pada aluminium tersebut maka ditambahkan *cover flux* Coveral 111. *Cover flux* tersebut bertindak sebagai pengikat kotoran yang berada dalam aluminium cair. Nantinya kotoran tersebut akan terangkat ke permukaan. Kotoran yang terdapat di permukaan aluminium cair tersebut kemudian akan dibersihkan melalui proses *disludging*.



**Gambar 3.3** Alat proses GBF.

*Ladle* yang digunakan untuk memindahkan aluminium cair ke *holding furnace* harus dipanaskan terlebih dahulu pada temperatur sekitar  $325^{\circ}\text{C}$  selama 30 menit. Setelah itu, aluminium dituang ke *ladle*. Untuk membuat aluminium cair bersih dari kotoran-kotoran dan gas seperti hidrogen, maka dilakukan proses *gas bubble flotation* atau GBF seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.3. Proses tersebut menggunakan gas argon dengan debit (*run*) 20 liter/menit selama 8 menit dan dengan kecepatan rotor 300–400 rpm. Peralatan proses GBF ditunjukkan oleh Gambar 3.2. Setelah proses ini selesai, kembali dilakukan proses pembersihan kotoran-kotoran yang terdapat di permukaan aluminium. Setelah itu aluminium cair siap dipindahkan ke *holding furnace* dengan bantuan *forklift*.

### 3.3.2 Penambahan Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi

Mesin LPDC yang pada penelitian ini digunakan sebagai tempat untuk proses pengecoran ditunjukkan oleh Gambar 3.4. *holding furnace* berada di bagian bawah mesin LPDC. *Louder* digunakan untuk mengalirkan aluminium cair dari *ladle* ke dalam *holding furnace* yang terdapat di bagian bawah mesin LPDC. Dimana sebelumnya *louder* tersebut dipanaskan terlebih dahulu.



**Gambar 3.4** Mesin LPDC.

Setelah proses penuangan selesai, kemudian dilakukan pengambilan sampel uji komposisi untuk mengetahui komposisi di dalam aluminium cair. Dari hasil uji komposisi kemudian dilakukan penghitungan *material balance* untuk mengetahui berat penghalus butir dan unsur modifikasi yang akan ditambahkan. Penghalus butir dan unsur modifikasi yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** (a) Penghalus butir fluks Coveral GR 2815, (b) Unsur modifikasi Al-10Sr.

**Perhitungan material balance untuk holding furnace**

Sebelum melakukan proses pengecoran aluminium, maka dilakukan penghitungan banyaknya penghalus butir dan unsur modifikasi yang akan diumpan ke dalam dapur, dengan asumsi bahwa fluks Coveral GR-2815 yang digunakan mengandung kadar titanium sebesar 15 wt. % Ti serta dalam *master alloy* Al-10 Sr mengandung 10 wt. % Sr. Perhitungan *material balance* menggunakan data-data sebagai berikut :

Input :

Kapasitas *holding furnace* = 500 kg

Output :

Uji Komposisi = 0.075 kg

2 *cylinder head / shoot* (@ 3,8 kg) = 5.6 kg

Sisa di *holding furnace* = 492.325 kg

- Dari hasil uji komposisi sebelum penambahan, kadar titanium dalam logam cair adalah 0.04 wt. %, agar menjadi 0.11 wt. % (penambahan 0.07 wt. % Ti) maka penghalus butir yang ditambahkan adalah

$$= 492.325 \text{ kg} \times (0.11 - 0.04) \%$$

$$= 0.3446 \text{ kg}$$

Karena asumsi kadar Ti dalam fluks sebesar 15 wt. %, maka penghalus butir yang ditambahkan menjadi

$$= 0.3446 \text{ kg} \times 100/15$$

$$= 2.297 \text{ kg}$$

- Sementara itu, kadar stronsium dalam aluminium cair sebelum penambahan adalah 0 wt. %, agar menjadi 0.002 wt. % (penambahan 0.002 wt. % Sr), maka unsur modifikasi yang ditambahkan adalah

$$= 492,325 \text{ kg} \times (0.002) \%$$

$$= 9.846 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Karena unsur modifikasi yang digunakan dalam bentuk *master alloy* Al10Sr, sehingga unsur modifikasi yang ditambahkan menjadi

$$= 9.846 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 10$$

$$= 9.846 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

### **Perhitungan material balance untuk crucible furnace**

Perhitungan *material balance* penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi untuk *crucible furnace* dengan kapasitas 200 kg dan target komposisi 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr (hasil uji komposisi pada *holding furnace* setelah penambahan Ti dan Sr) adalah sebagai berikut,

- Dari hasil uji komposisi sebelum penambahan, kadar titanium dalam logam cair adalah 0.04 wt. %, agar menjadi 0.123 wt. % maka penghalus butir yang ditambahkan adalah

$$= 200 \text{ kg} \times (0.123 - 0.04) \%$$

$$= 0.16 \text{ kg}$$

Karena asumsi kadar Ti dalam fluks sebesar 15 wt. %, maka penghalus butir yang ditambahkan menjadi

$$= 0.16 \text{ kg} \times 100/15$$

$$= 1.1 \text{ kg}$$

- Sementara itu, kadar stronsium dalam aluminium cair sebelum penambahan adalah 0 wt. %, agar menjadi 0.003 wt. %, maka unsur modifikasi yang ditambahkan adalah

$$= 200 \text{ kg} \times (0.003) \%$$

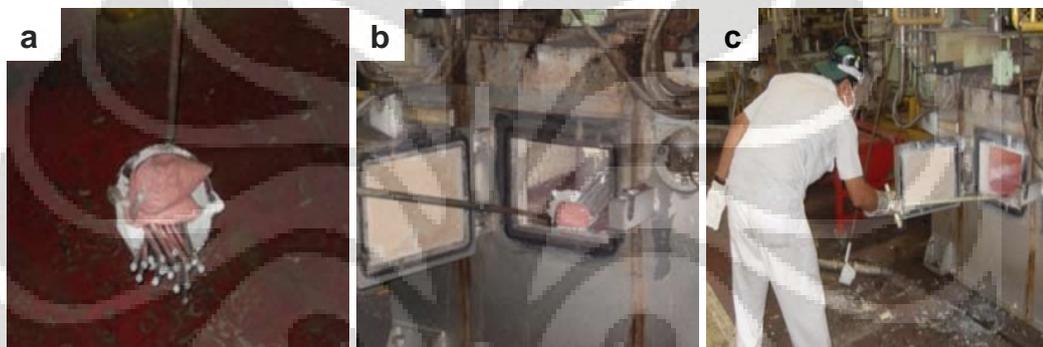
$$= 0.006 \text{ kg}$$

Karena unsur modifikasi yang digunakan dalam bentuk *master alloy* Al10Sr, sehingga unsur modifikasi yang ditambahkan menjadi

$$= 0.006 \text{ kg} \times 10$$

$$= 0.06 \text{ kg}$$

Setelah perhitungan *material balance* selesai, maka penghalus butir dan unsur modifikasi dapat dimasukkan ke dalam *holding* (Gambar 3.7 ) dan *crucible furnace* (Gambar 3.8). Di dalam *furnace*, penghalus butir dan unsur modifikasi yang baru dimasukkan tersebut perlu diaduk agar tidak menggumpal. Setelah itu dilakukan proses GBF manual pada *holding furnace* dan GBF otomatis pada *crucible furnace* menggunakan gas argon selama dua menit. Tujuannya agar dapat memberikan efek pengadukan terhadap pemberian penghalus butir dan unsur modifikasi serta mengangkat kotoran yang masih terdapat di dalam aluminium cair.



**Gambar 3.6** Teknik penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi ke dalam *holding furnace* (a) Menempatkan penghalus butir dan unsur modifikasi di dalam ciduk, (b) Memasukkan ke dalam *holding furnace*, (c) Melakukan pengadukan.



**Gambar 3.7** Proses GBF manual dengan menggunakan *lance*.



**Gambar 3.8** (a) *Crucible furnace*, (b) Pemasukan penghalus butir dan unsur modifikasi ke dalam *crucible furnace*, (c) Proses *degassing* dengan mesin GBF.

Kotoran-kotoran yang terdapat di permukaan aluminium segera diangkat. Setelah itu dilanjutkan dengan pengambilan sampel uji vakum, komposisi, tarik, dan fluiditas. Kemudian proses pengecoran pada mesin LPDC telah siap dilakukan.

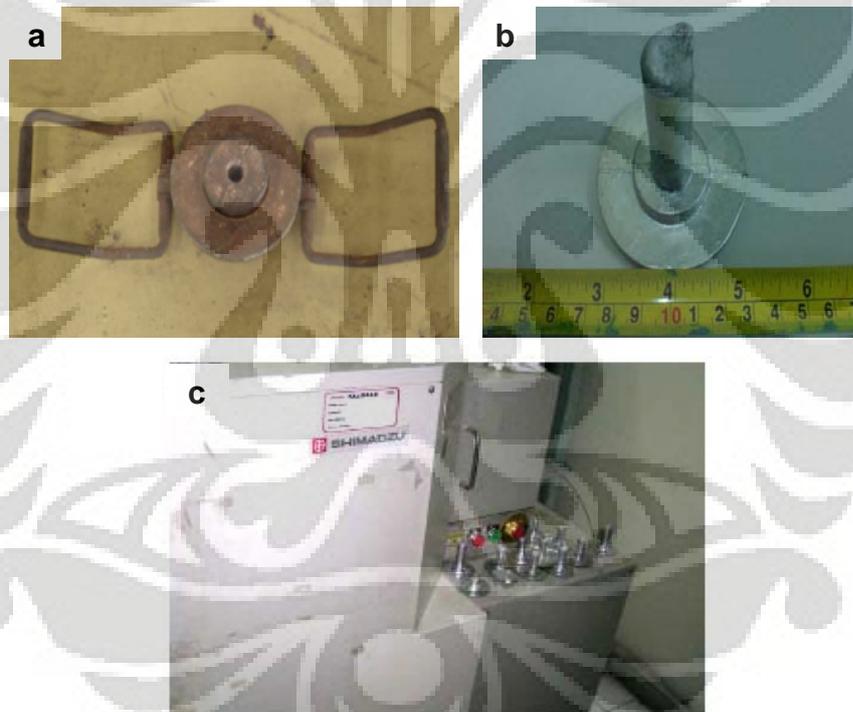
Pada penelitian ini, komponen *cylinder head* yang akan dijadikan objek penelitian adalah komponen *cylinder head as-cast* hasil LPDC pada waktu tahan 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit. Nantinya pada *cylinder head* tersebut akan dilakukan pengujian kekerasan, pengamatan struktur mikro, dan SEM EDAX. Pengambilan sampel uji tarik dan fluiditas hanya dilakukan pada waktu

tahan 0, 60, dan 120 menit karena faktor teknis yang tidak memungkinkan untuk pengambilan sampel seperti pada komponen *cylinder head*.

### 3.3.3 Karakterisasi Paduan Aluminium AC4B

#### 3.3.3.1 Pengujian Komposisi Kimia Paduan Aluminium AC4B

Pengujian komposisi kimia dilakukan setelah *supply* dengan mengambil aluminium cair pada *holding furnace* dan kemudian menuangkannya pada cetakan uji komposisi seperti yang tampak pada Gambar 3.9.a. Sampel berbentuk lingkaran dengan sebuah pegangan silinder kecil yang memiliki berat kurang lebih 75 gram (Gambar 3.9.b). Sampel uji komposisi tersebut kemudian dilakukan uji komposisi dengan mesin uji spektrometri seperti terlihat pada Gambar 3.8.c.



**Gambar 3.9** (a) Cetakan sampel uji komposisi (b) Sampel uji komposisi  
(c) Mesin uji spektrometri.

#### 3.3.3.2 Pengujian Porositas Paduan Aluminium AC4B

Pengujian porositas dilakukan dengan menggunakan alat vakum OSTEK seperti terlihat pada Gambar 3.10. Dimana aluminium cair diambil menggunakan cangkir khusus, kemungkinan dimasukkan ke dalam alat vakum. Setelah kira-kira

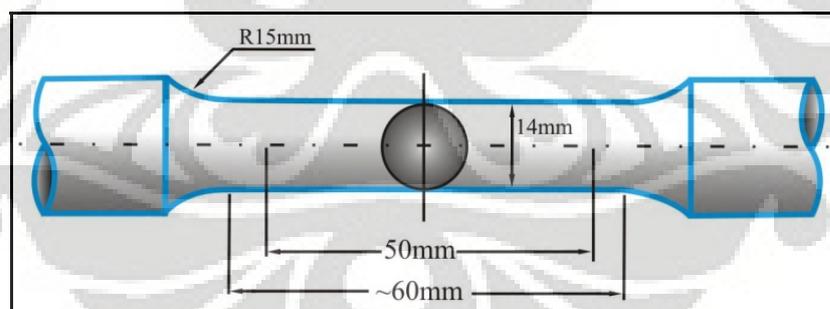
10 menit, sampel dapat dikeluarkan dari alat vakum, untuk dilakukan pengamatan terhadap morfologi dan distribusi porositasnya.



Gambar 3.10 Alat uji vakum.

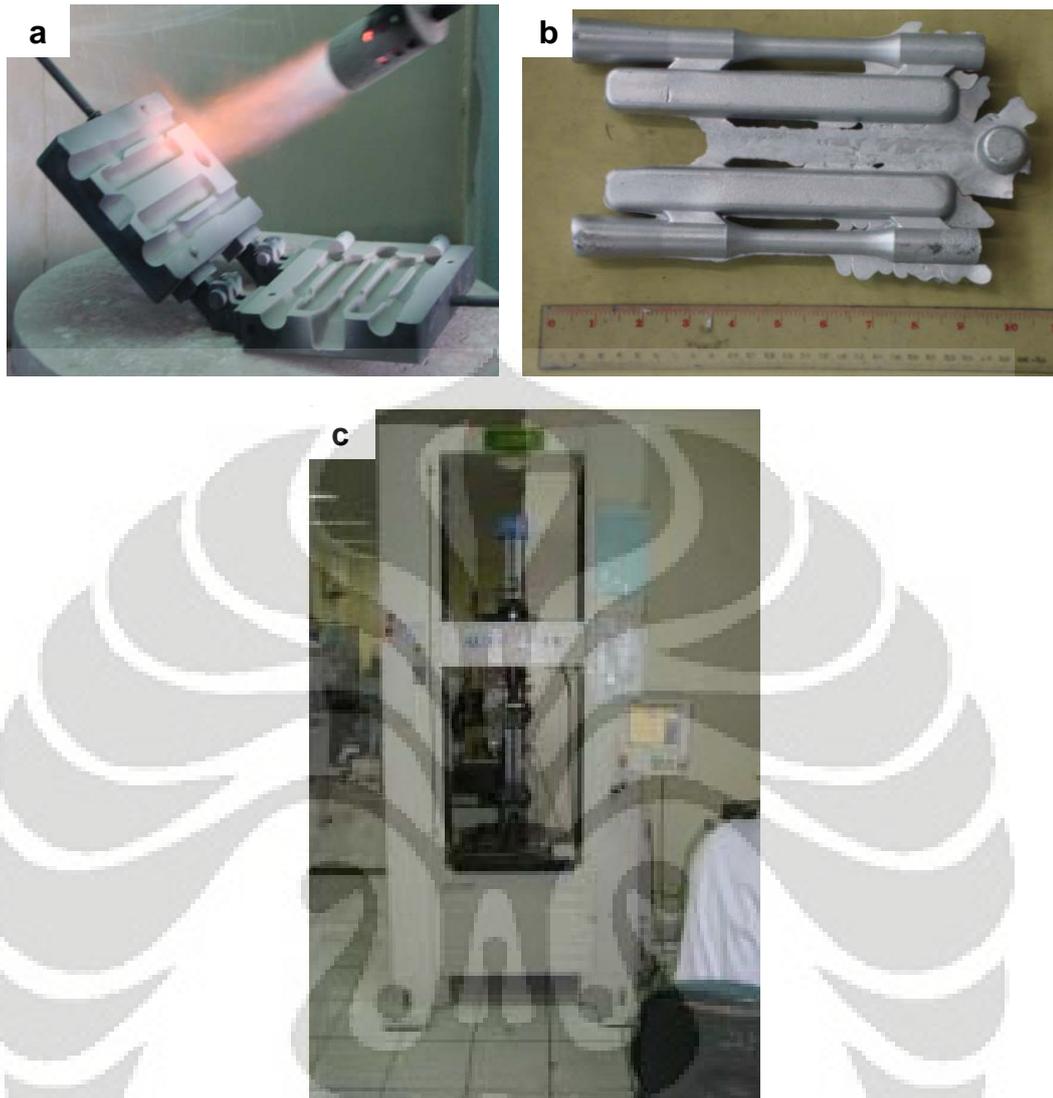
### 3.3.3.3 Pengujian Tarik Paduan Aluminium AC4B

Standar yang digunakan untuk pengambilan sampel uji tarik adalah standar JIS 2201. Berdasarkan standar tersebut, besarnya diameter penampang batang uji tarik adalah sekitar 14 mm, *reduced section* sekitar 60 mm, *gauge length* sekitar 50 mm, dan radius penyusutan penampang sekitar 9 mm seperti yang terlihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Bentuk dan ukuran sampel uji tarik berdasarkan standar JIS 2201

Pengambilan aluminium cair untuk sampel uji tarik dari *crucible furnace* dilakukan pada saat waktu tahan 0, 60, dan 120 menit setelah penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi. Sebelum dilakukan penuangan aluminium cair ke dalam cetakan, cetakan uji tarik tersebut harus dipanaskan terlebih dahulu pada temperatur sekitar  $290 \pm 10^\circ\text{C}$ . Cetakan, sampel dan mesin uji tarik dapat dilihat pada Gambar 3.12



**Gambar 3.12** (a) Pemanasan awal pada cetakan uji tarik, (b) Sampel uji tarik, (c) Mesin uji tarik.

#### 3.3.3.4 Pengujian Fluiditas Paduan Aluminium AC4B

Pengujian fluiditas dilakukan untuk mengukur mampu alir dari logam cair untuk masuk ke rongga cetakan. Metode pengujian fluiditas yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan metode spiral. Sebelum dilakukan pengujian maka perlu dilakukan pemanasan awal cetakan fluiditas pada temperatur sekitar  $290 \pm 10^\circ\text{C}$ . Tujuannya agar logam cair yang tuang ke dalam cetakan tidak mengalami *thermal shock*.

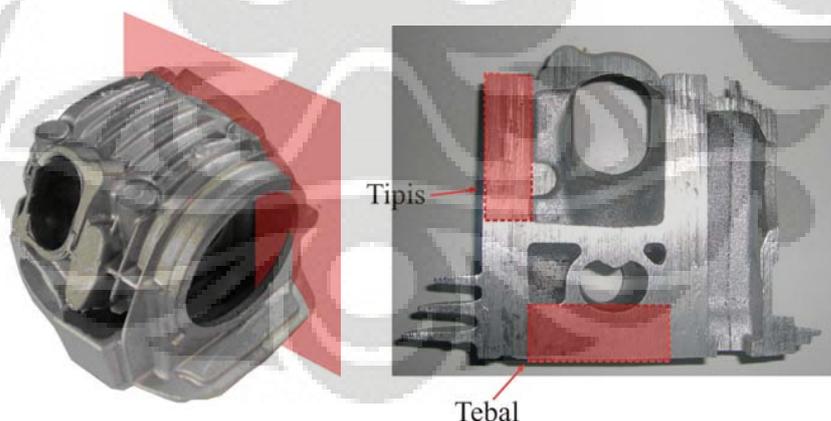


**Gambar 3.13** (a) *Preheating* pada cetakan uji fluiditas, (b) Proses penuangan aluminium cair ke cetakan uji fluiditas, (c) Proses pengeluaran sampel dari cetakan.

Tahapan pengujian fluiditas paduan aluminium AC4B pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.13. Pengambilan aluminium cair untuk sampel uji fluiditas dari *crucible furnace* dilakukan pada saat waktu tahan 0, 60, dan 120 menit setelah penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi.

### 3.3.3.5 Pengujian Kekerasan *Cylinder Head* AC4B

Persiapan awal pengujian kekerasan adalah memotong *cylinder head* pada bagian yang paling tebal dan tipis. Daerah pemotongan *cylinder head* diperlihatkan pada Gambar 3.14. Pemotongan *cylinder head* dilakukan dengan mesin potong abrasif di PT AHM.



**Gambar 3.14** Daerah pemotongan sampel pada *cylinder head*.

Sampel yang masih berbentuk balok tersebut kemudian diampelas untuk membuat permukaan sampel menjadi rata. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan mesin uji Rockwell B di PT AHM (Gambar 3.15). Dengan metode

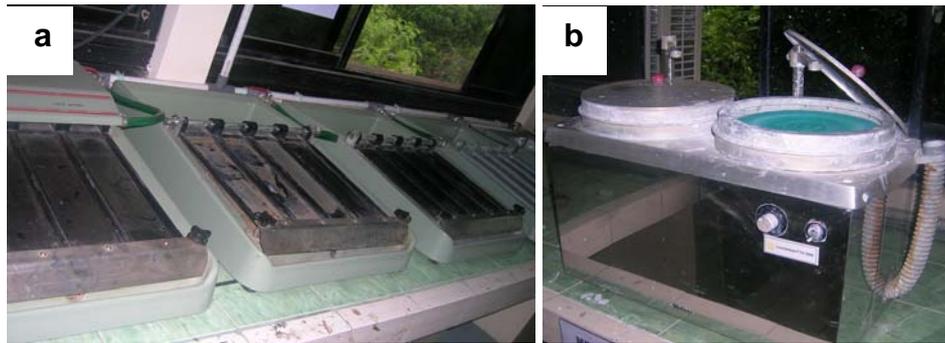
ini material akan dijejak dengan menggunakan indenter bola baja berdiameter 1/16 inci dengan beban 100 kg (ASTM E18).



Gambar 3.15 Alat uji kekerasan Rockwell B.

#### 3.3.3.6 Pengamatan Struktur Mikro *Cylinder Head AC4B* dengan Mikroskop Optik

Persiapan sampel untuk pengamatan struktur mikro sama dengan sampel untuk uji kekerasan yaitu dilakukan pemotongan *cylinder head* pada bagian tipis dan tebal. Setelah itu dilakukan proses *mounting* pada sampel, tujuannya adalah untuk memudahkan pemegangan sampel saat dilakukan pengamplasan dan pemolesan. Sampel yang telah di-*mounting* kemudian diampelas dengan menggunakan kertas ampelas nomor *mesh* 120, 400, 600, 800, 1000, 1200 dan 1500. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan mesin ampelas tangan seperti yang terlihat pada Gambar 3.16.a dan Gambar 3.16.b. Setelah pengamplasan nomor 1500, kemudian sampel dipoles dengan menggunakan mesin poles putar otomatis dan kain beludru yang diberikan serbuk alumina. Jika permukaan sampel telah tampak mengkilap, pengetsaan telah dapat dilakukan dengan menggunakan *Reagen Tucker* (15 ml HNO<sub>3</sub> + 45 ml HCl + 15 ml HF (45%) + 25 ml H<sub>2</sub>O) untuk mendapatkan struktur mikro dendrit yang jelas.

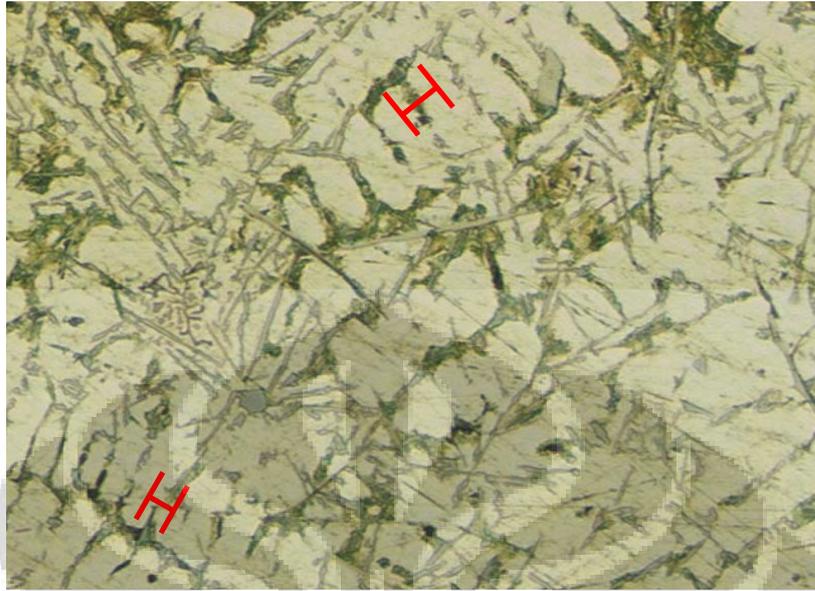


**Gambar 3.16** (a) Mesin amplas tangan, (b) Mesin poles.

Pengamatan struktur dendrit sampel tipis dan tebal dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus seperti pada Gambar 3.17. Sebelum diamati dan dilakukan pengambilan gambar, posisi sampel diratakan dengan meletakkannya di atas lilin. Sampel yang telah rata kemudian diletakkan dibawah lensa objektif mikroskop dan kemudian tingkat intensitas cahaya yang masuk diatur agar mendapatkan gambar yang jelas. Setelah didapatkan daerah pada struktur mikro yang diinginkan, pengambilan gambar dapat dilakukan dengan perbesaran  $50\times$ ,  $100\times$ , dan  $200\times$  untuk setiap sampel.



**Gambar 3.17** Mikroskop optik.



**Gambar 3.18** Struktur dendrit dalam sampel *cylinder head*.

Nilai *dendrite arm spacing* atau DAS didapatkan dengan cara mengukur jarak antar lengan dendrit pada foto struktur mikro dengan menggunakan penggaris seperti yang terlihat pada Gambar 3.18. Jarak antar lengan dendrit yang didapatkan kemudian dikalikan dengan perbandingan antara skala pada penggaris dengan skala pada struktur mikro aktual (dalam mikroskop optik). Dalam hal ini, 1 mm skala penggaris sama dengan 7.7586  $\mu\text{m}$  pada struktur mikro aktual.

### 3.3.3.7 Pengamatan Struktur Mikro *Cylinder Head AC4B* dengan *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDAX)*

Pengamatan dengan SEM dilakukan terhadap sampel tipis dan tebal dengan menggunakan mesin SEM LEO 420i seperti terlihat pada Gambar 3.19. Pengujian ini dilakukan dengan *collector bias* sebesar 400 kV, kontras 40 %, *brightness* 30 %, dan EHT (M) sebesar 12 kV. Tujuan dilakukannya pengamatan menggunakan SEM dan EDAX adalah untuk mengamati struktur mikro *cylinder head AC4B* yang telah ditambahkan penghalus butir dan unsur modifikasi, khususnya pengamatan terhadap keberadaan fasa-fasa penyusun paduan seperti aluminium, silikon eutektik, fasa intermetalik seperti  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , partikel pembentuk inti seperti fasa  $\text{Al}_3\text{Ti}$ ,  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{AlB}_{12}$ . Kemudian fasa  $\text{SrBr}_6$  ataupun  $\text{Al}_4\text{SrSi}_2$ .

Persiapan sampel untuk pengujian SEM dan EDAX sama dengan persiapan sampel untuk pengamatan dengan mikroskop optik, namun etsa yang digunakan adalah HF 10 %.



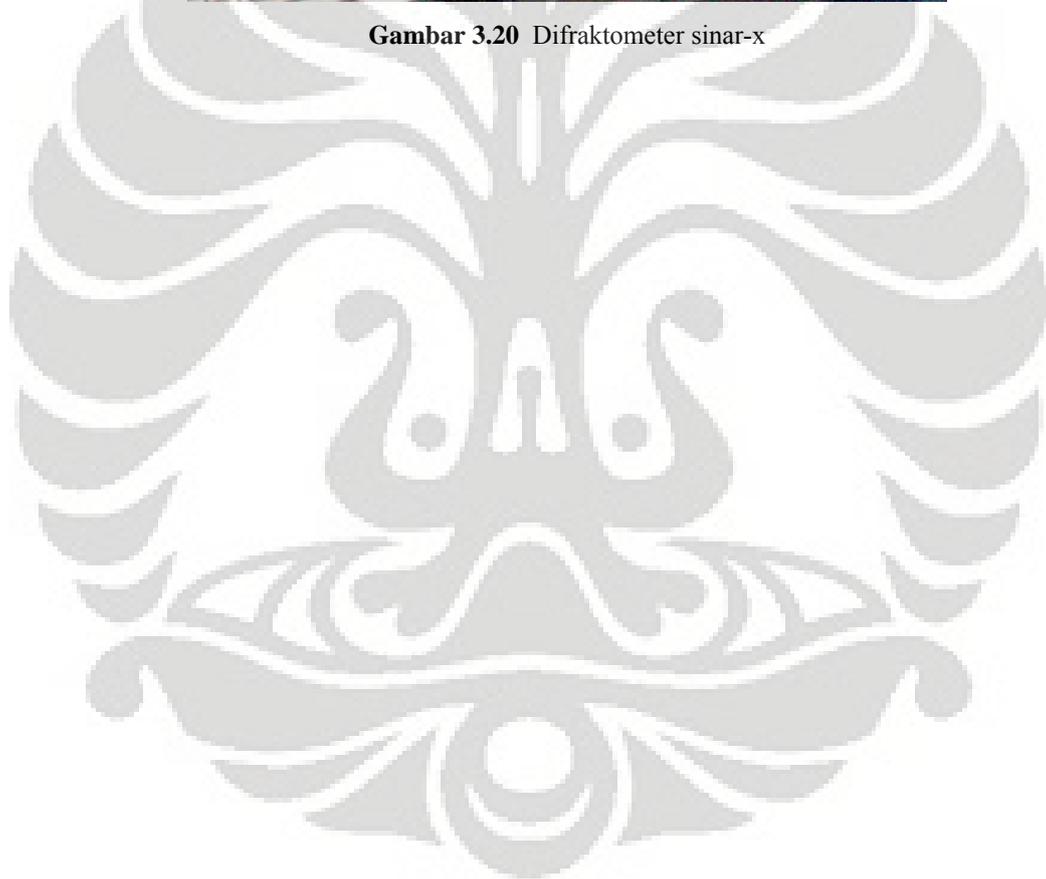
**Gambar 3.19** *Scanning electron microscope (SEM).*

#### **3.3.3.8 Karakterisasi Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi dengan XRD**

Karakterisasi penghalus butir dan unsur modifikasi menggunakan peralatan *x-ray diffraction* (XRD) merek Philip tipe PW 2213/20 seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.20. Tujuan karakterisasi ini adalah untuk memastikan kandungan yang terdapat dalam penghalus butir dan unsur modifikasi. Kandungan yang ingin dideteksi adalah  $K_2TiF_6$  dan  $KBF_4$  dalam penghalus butir serta Al- $Al_4Sr$  dan  $Al_4Sr$  dalam unsur modifikasi.



**Gambar 3.20** Difraktometer sinar-x



## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisis Komposisi Paduan Aluminium AC4B

Hasil pengujian komposisi kimia paduan aluminium AC4B yang pada penelitian ini diberikan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi, dapat dilihat pada Tabel 4.1. Dari tabel tersebut terlihat bahwa kandungan titanium naik dari 0.04 wt. % menjadi 0.123 wt. %, yang berarti telah terjadi peningkatan sebesar 0.083 wt. %. Sementara untuk kandungan stronsium dari 0 wt. % naik menjadi 0.003 wt. %.

**Tabel 4.1** Hasil uji komposisi paduan aluminium AC4B pada keadaan sebelum dan sesudah penambahan 0.007 wt. % Ti dan 0.002 wt. % Sr

Unsur	Komposisi awal paduan aluminium AC4B (wt. %)	Komposisi paduan aluminium AC4B	Komposisi paduan aluminium AC4B	Komposisi standar paduan aluminium AC4B PT AHM (wt. %)
		0.07 wt. % Ti + 0.002 wt. % Sr pada 0 menit (wt. %)	0.07 wt. % Ti + 0.002 wt. % Sr setelah 120 menit (wt. %)	
Si	7.844	7.883	9.031	7-10
Cu	2.100	2.336	2.322	2-4
Mg	0.283	0.174	0.156	0.5 max
Zn	0.608	0.608	0.652	1 max
Fe	0.860	0.925	0.727	1 max
Mn	0.271	0.295	0.253	0.5 max
Ni	0.069	0.071	0.052	0.35 max
<b>Ti</b>	<b>0.040</b>	<b>0.123</b>	<b>0.105</b>	<b>0.2 max</b>
Pb	0.060	0.062	0.068	0.2 max
Sn	0.036	0.041	0.036	0.1 max
Cr	0.035	0.036	0.008	0.2 max
<b>Sr</b>	<b>0.000</b>	<b>0.003</b>	<b>0.002</b>	<b>1.2 max</b>
Al	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa

Terjadinya peningkatan kandungan titanium dan stronsium paduan aluminium AC4B pada waktu 0 menit tidak sesuai dengan target pada perhitungan *material balance*, dimana diinginkan penambahan 0.07 wt. % Ti dan 0.002 wt. % Sr. Ketidaksesuaian tersebut bisa terjadi karena kesalahan dalam memperkirakan berat aluminium cair yang terdapat di dalam *holding furnace*.

Peningkatan juga terjadi pada kandungan unsur mayor paduan aluminium AC4B setelah dilakukan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi. Akan

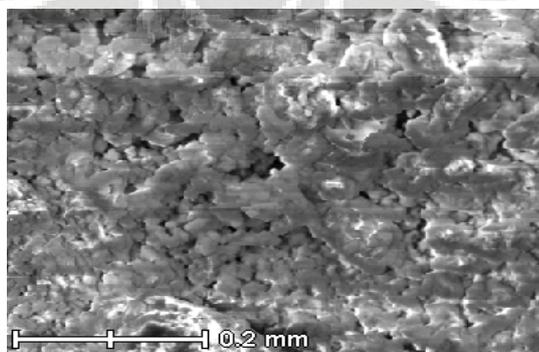
tetapi peningkatan tersebut masih dalam kisaran komposisi standar paduan aluminium AC4B. Seperti pada kandungan Cu dari 2.1 wt. % menjadi 2.336 wt. %, Fe dari 0.86 wt. % menjadi 0.925 wt. %, dan Mn dari 0.271 wt. % menjadi 0.295 wt. %. Peningkatan kandungan besi bisa diakibatkan oleh adanya kandungan besi yang berasal dari fluks yang ditambahkan ke dalam *holding furnace*, ataupun dari kandungan besi yang terdapat pada sampel uji komposisi ketika dilakukan proses perataan permukaan sampel tersebut.

Setelah waktu tahan 120 menit, kandungan titanium dan stronsium mengalami penurunan. Untuk titanium kandungannya turun menjadi 0.105 wt. % dan untuk stronsium kandungannya turun menjadi 0.002 wt. %. Penurunan ini telah sesuai dengan yang diharapkan yaitu untuk melihat terjadinya fenomena pemudaran pada penghalus butir dan unsur modifikasi selama waktu tahan 120 menit.

## 4.2 Karakterisasi Penghalus Butir Fluks Coveral GR-2815 dan *Master Alloy Al-10Sr*

### 4.2.1 Karakterisasi Penghalus Butir Fluks Coveral GR-2815 menggunakan SEM dan XRD

Untuk mengetahui kandungan titanium yang terdapat dalam penghalus butir, maka dilakukan analisis menggunakan SEM seperti yang tampak pada Gambar 4.1. Dari gambar tersebut terlihat struktur mikro penghalus butir yang menunjukkan struktur yang mirip dengan garam. Hasil SEM *x-ray mapping* pada Tabel 4.2 juga menunjukkan keberadaan unsur penyusun garam, yaitu K, Na, F, dan Cl. Unsur boron tidak terdeteksi pada pengujian ini.

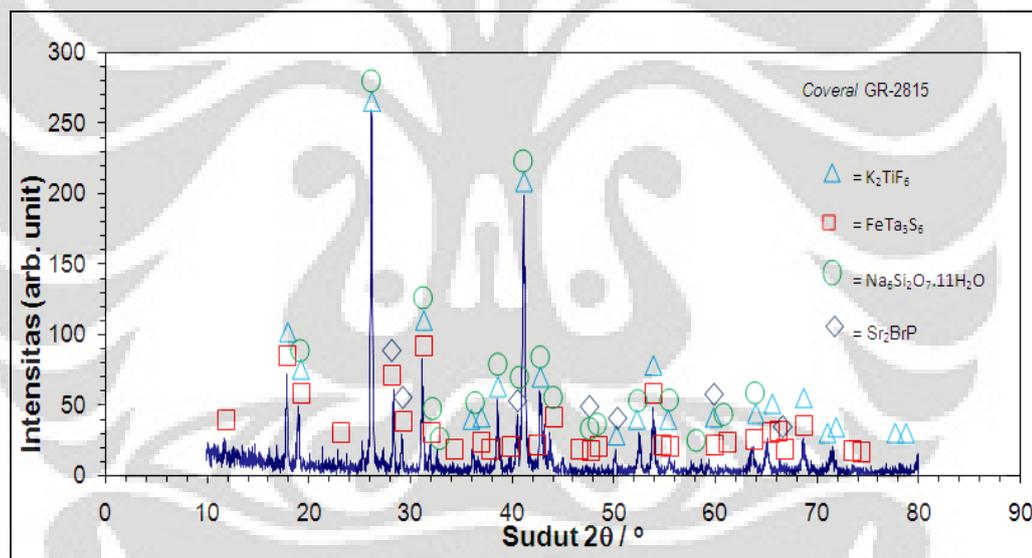


**Gambar 4.1** Mikrostruktur dari penghalus butir Coveral GR-2815<sup>[35]</sup>.

**Tabel 4.2** Komposisi kimia penghalus butir Coveral GR 2815 berdasarkan analisis SEM *x-ray mapping*<sup>[35]</sup>

Unsur	Komposisi (wt. %)
F	34,15
Na	0,55
Cl	1,34
K	32,84
Ti	14,95

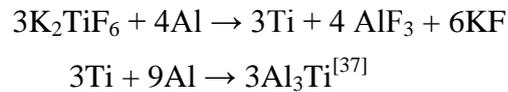
Karakterisasi lebih lanjut dilakukan terhadap penghalus butir Coveral GR 2815 untuk memastikan keberadaan unsur boron sebagai salah satu unsur penting pada proses penghalusan butir, yaitu analisis dengan menggunakan XRD seperti yang tampak pada Gambar 4.5. Dari gambar tersebut terlihat bahwa penghalus butir ini tersusun dari senyawa  $K_2TiF_6$ ,  $FeTa_3S_6$ ,  $Na_6Si_2O_7 \cdot 11H_2O$ , dan  $Sr_2BrP$ .



**Gambar 4.2** Hasil uji XRD Coveral GR-2815.

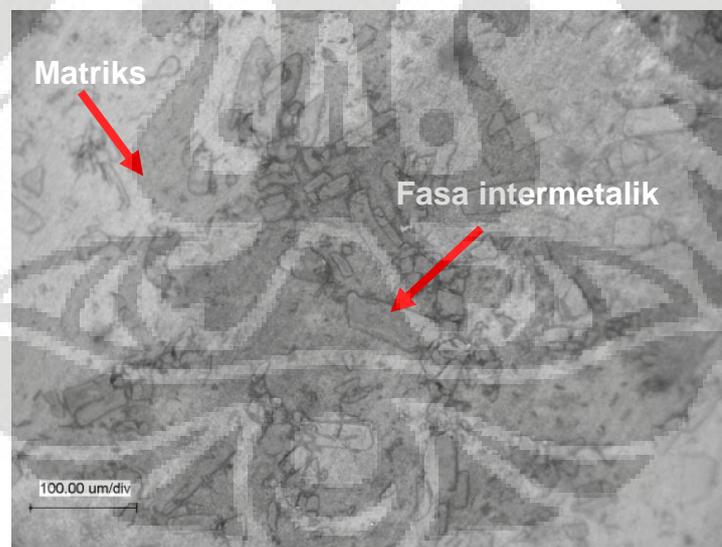
Hasil yang didapatkan dari SEM seperti unsur K, Ti, F, dan Na, juga ditemukan pada pengujian XRD ini, namun unsur lain seperti Fe, Ta, Br, Si, dan P tidak ditemukan pada pengujian SEM. Menurut literatur<sup>[36]</sup> pada penghalus butir dalam bentuk fluks seharusnya memiliki kandungan  $K_2TiF_6$  dan  $KBF_4$ . Senyawa  $K_2TiF_6$  telah terdeteksi pada pengujian XRD, yang berarti bahwa penghalus butir yang digunakan memiliki kandungan titanium sebagai unsur penting pada proses penghalusan butir. Namun senyawa  $KBF_4$  tidak terdeteksi, yang berarti bahwa

pada penghalus butir tersebut tidak terdapat kandungan boron. Unsur Ti yang terdapat dalam senyawa  $K_2TiF_6$ , di dalam aluminium cair akan terurai seperti reaksi berikut,



#### 4.2.2 Karakterisasi *Master Alloy* Al-10Sr menggunakan Mikroskop Optik dan XRD

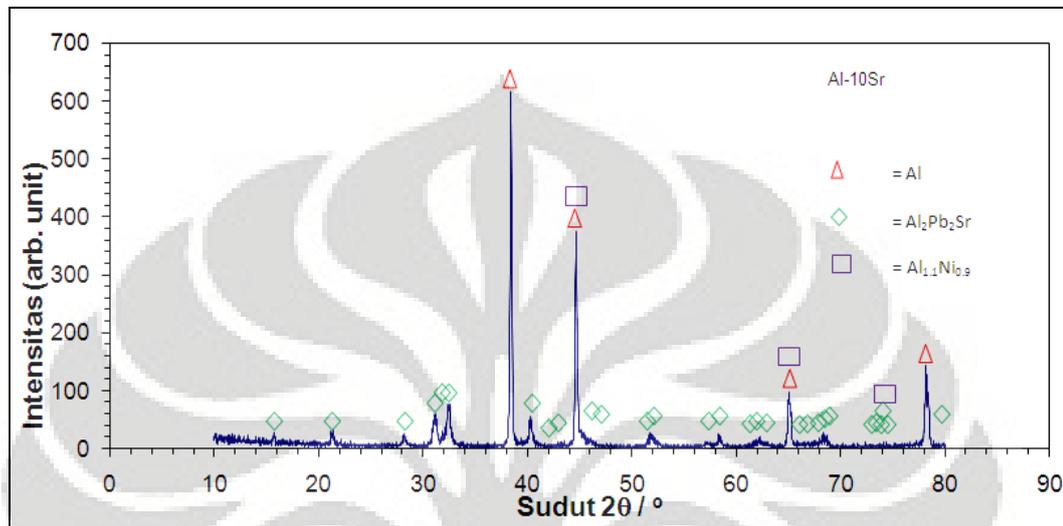
Hasil pengamatan dengan mikroskop optik sampel *master alloy* Al-10Sr diperlihatkan oleh Gambar 4.3. Dari literatur didapatkan bahwa dalam *master alloy* Al-10Sr terdiri atas matriks fasa eutektik Al-Al<sub>4</sub>Sr dan pelat besar fasa intermetalik Al<sub>4</sub>Sr<sup>[1]</sup>. Jika dilihat dari Gambar 4.3, yang menjadi fasa eutektik Al-Al<sub>4</sub>Sr adalah bagian yang berwarna abu-abu terang, dan yang menjadi fasa intermetalik Al-Al<sub>4</sub>Sr adalah bagian yang terlihat seperti balok atau pelat yang berwarna abu-abu.



**Gambar 4.3** Struktur mikro *master alloy* Al-10Sr.

Karakterisasi lebih lanjut dilakukan terhadap unsur modifikasi *master alloy* Al-10Sr yaitu analisis komposisi dengan XRD. Seperti terlihat pada Gambar 4.4 *master alloy* Al-10Sr tersusun atas Al, Al<sub>2</sub>Pb<sub>2</sub>Sr, serta Al<sub>1.1</sub>Ni<sub>0.9</sub>. Hal ini menunjukkan bahwa pada *master alloy* yang digunakan, unsur stronsium terdapat pada senyawa Al<sub>2</sub>Pb<sub>2</sub>Sr, berbeda dengan literatur dimana stronsium dalam *master*

*alloy* Al-10-Sr berada didalam persenyawaan Al-Al<sub>4</sub>Sr dan Al<sub>4</sub>Sr. Ketika *master alloy* ini ditambahkan ke paduan aluminium cair akan terjadinya pelarutan Al<sub>2</sub>Pb<sub>2</sub>Sr sehingga stronsium dapat melakukan proses modifikasi terhadap paduan tersebut.

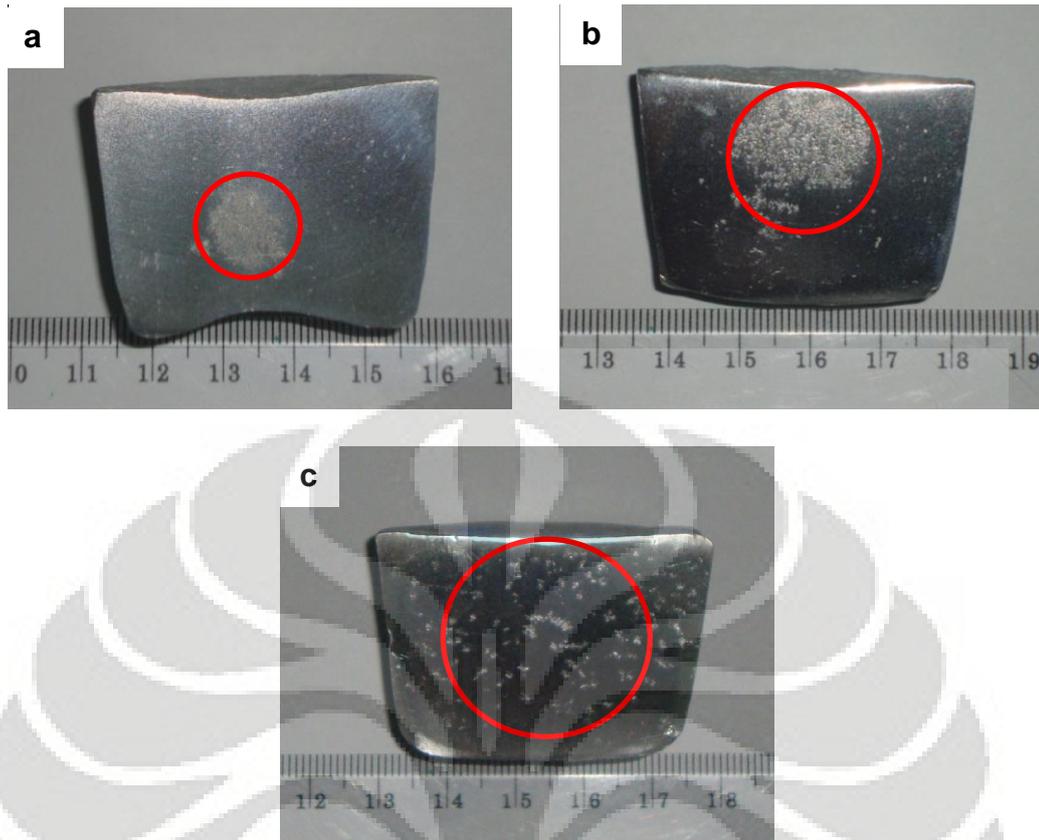


Gambar 4.4 Hasil uji XRD sampel *master alloy* Al-10Sr.

### 4.3 Perubahan Karakteristik Paduan Aluminium AC4B pada Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr

#### 4.3.1 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Porositas Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr

Pada Gambar 4.5 terlihat distribusi porositas paduan aluminium AC4B pada kondisi normal dan dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr. Dalam kondisi normal (Gambar 4.5.a), porositas terlihat terkonsentrasi pada bagian tengah. Sementara itu dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada waktu tahan 0 menit (Gambar 4.5.b), porositas terlihat masih terkonsentrasi di bagian tengah sampel uji, tapi sedikit berbeda dengan sampel normal karena porositas telah mulai menyebar. Kemudian setelah waktu tahan 120 menit, porositas terlihat telah terdistribusi secara merata (Gambar 4.5.c).



**Gambar 4.5** Distribusi porositas pada sampel uji vakum AC4B (a) dalam kondisi normal, dan kondisi dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada (b) waktu tahan 0 menit, (c) waktu tahan 120 menit.

Penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi pada aluminium secara umum akan membuat porositas terdistribusi lebih merata. Hal ini bisa terlihat dengan membandingkan distribusi porositas paduan aluminium AC4B dalam kondisi normal dan dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr. Namun terjadi perbedaan distribusi porositas paduan aluminium AC4B pada waktu tahan 0 dan 120 menit setelah penambahan. Padahal seharusnya dengan penambahan titanium dan stronsium dapat membuat porositas terdistribusi lebih merata. Dari literatur<sup>[1]</sup> didapatkan bahwa adanya hubungan masa inkubasi (*incubation period*) unsur modifikasi terhadap kemampuannya untuk proses modifikasi pada paduan aluminium. Masa inkubasi merupakan waktu yang diperlukan untuk unsur modifikasi agar bisa memodifikasi paduan secara optimal. Unsur modifikasi stronsium memiliki masa inkubasi sekitar 10 sampai 30 menit. Setelah melewati masa tersebut, maka akan didapatkan proses modifikasi struktur secara optimal. Seharusnya distribusi porositas yang merata bisa didapatkan pada pengambilan

sampel uji vakum setelah waktu tahan 10 menit, namun pengambilan sampel uji vakum tersebut baru dapat dilakukan pada saat akhir proses LPDC, yaitu setelah waktu tahan dua jam. Karena jika dilakukan pada saat proses dikhawatirkan udara luar akan masuk ke dalam *holding furnace* dan bisa mempengaruhi kualitas aluminium cair. Dan seperti yang terlihat pada Gambar 4.5.c, porositas sampel uji vakum paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr, setelah waktu tahan 120 menit memperlihatkan distribusi porositas yang telah merata. Hal ini mengindikasikan bahwa pada waktu tahan dua jam masih menunjukkan adanya mekanisme modifikasi. Penyebaran porositas tersebut tentunya juga dipengaruhi oleh mekanisme penghalusan butir.

Dari perhitungan fraksi volume porositas pada permukaan sampel uji vakum seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3, pada sampel paduan aluminium AC4B kondisi normal didapatkan fraksi volume porositasnya 3 %. Sementara pada kondisi dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada waktu tahan 0 menit, fraksi volumenya menjadi 5 % dan pada waktu tahan 120 menit menjadi 4.5 %.

**Tabel 4.3** Hasil penghitungan fraksi volume porositas

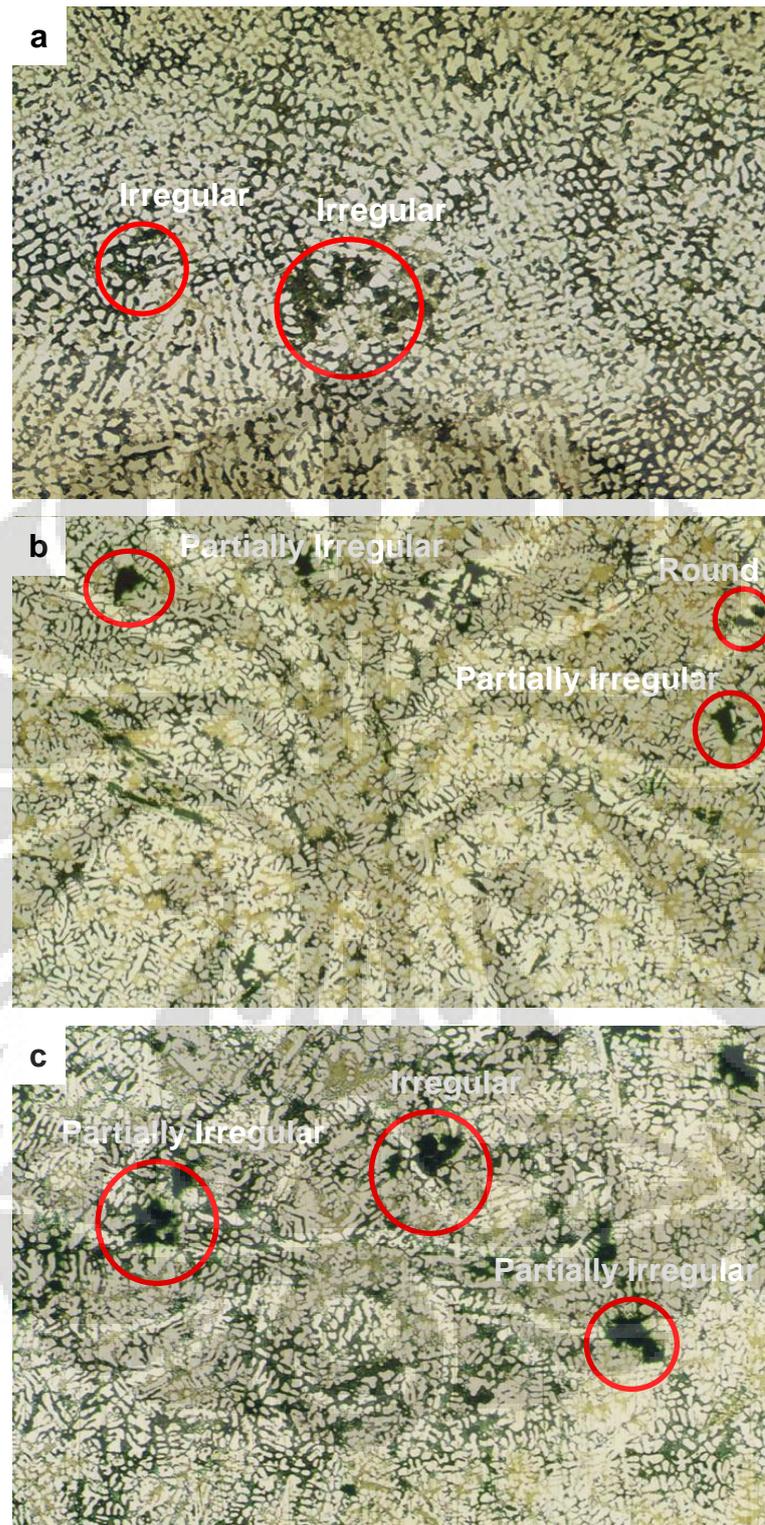
<b>Kondisi</b>	<b>Fraksi volume porositas (%)</b>
Normal	3
Penambahan Ti dan Sr waktu tahan 0 menit	5
Penambahan Ti dan Sr waktu tahan 120 menit	4.5

Dengan demikian telah terjadi peningkatan fraksi volume porositas sebesar 66.67 % ketika paduan aluminium AC4B ditambahkan 0.083 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr. Dengan penambahan penghalus butir, ukuran butir yang lebih kecil akan meningkatkan area batas butir, sehingga menghasilkan porositas gas yang lebih terdistribusi serta akan menurunkan volume porositas tersebut jika dibandingkan dengan aluminium yang tidak ditambahkan penghalus butir. Sementara itu, penambahan unsur modifikasi seperti stronsium akan membuat porositas pada aluminium terdistribusi secara merata dan memiliki morfologi yang lebih bulat. Namun penambahan unsur modifikasi ini juga bisa menyebabkan peningkatan jumlah atau volume porositas. Unsur modifikasi akan menurunkan tegangan permukaan aluminium cair, yang akan memfasilitasi nukleasi porositas, serta

kandungan inklusi yang lebih tinggi pada logam cair yang dimodifikasi akan membuat porositas lebih mudah terbentuk. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Anson *et al*<sup>[31]</sup> yang melakukan penambahan stronsium dengan komposisi yang berbeda pada aluminium cair. Dengan menentukan ukuran porositas serta densitasnya, didapatkan hasil bahwa persentase porositas meningkat dengan keberadaan stronsium. Densitas dari porositas (jumlah porositas/cm<sup>2</sup>) menurun sebagai suatu fungsi dari pengaruh stronsium terhadap struktur mikro yang akan menurunkan jumlah porositas karena penyusutan. Namun ukuran rata-rata maksimum porositas menjadi meningkat dengan adanya stronsium dan peningkatan ini lebih besar dari pada penurunan densitasnya.

Untuk mengetahui morfologi porositas mikro pada paduan aluminium AC4B, maka dilakukan pengamatan sampel uji fluiditas dengan mikroskop optik baik pada kondisi normal maupun setelah penambahan titanium dan stronsium, seperti yang terlihat pada Gambar 4.6. Pada kondisi normal (Gambar 4.6.a), terlihat bahwa porositas memiliki bentuk *irregular* atau tidak beraturan. Sementara setelah penambahan titanium dan stronsium pada waktu tahan 0 menit (Gambar 4.6.b), sebagian porositas telah memiliki bentuk *round* atau bulat dan sebagian lainnya memiliki bentuk *partially irregular* atau tidak beraturan sebagian. Kemudian setelah waktu tahan 120 menit (Gambar 4.6.c), sebagian porositas memiliki bentuk *partially irregular*, dan sebagian lainnya telah memiliki bentuk *irregular*.

Morfologi porositas mikro sangat dipengaruhi oleh bentuk dendrit dan fasa eutektik. Pada paduan aluminium tanpa penambahan titanium ataupun stronsium, porositas hadir dengan morfologi yang tidak beraturan dan saling terhubung antara satu dan yang lainnya. Hal tersebut disebabkan oleh antarmuka eutektik-cair memiliki bentuk yang tidak beraturan pula baik pada tingkat makro maupun mikro. Sementara itu ketika diberikan penambahan stronsium, porositas menjadi lebih bulat yang disebabkan oleh morfologi eutektik yang halus yang dihasilkan pada proses solidifikasi<sup>[38]</sup>.



**Gambar 4.6** Morfologi porositas mikro pada sampel fluiditas (a) kondisi normal, dan setelah penambahan titanium dan stronsium (b) waktu tahan 0 menit, (c) waktu tahan 120 menit.

Pemudaran pada paduan aluminium AC4B dengan penambahan titanium dan stronsium ini dapat terlihat melalui pengamatan terhadap fraksi volume porositas dan morfologi dari porositas mikro paduan tersebut. Dimana semakin lama waktu tahan, fraksi volume menjadi berkurang, dan morfologi porositas mikro kembali berubah ke bentuk yang tidak beraturan. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi penurunan efektivitas penghalus butir dan unsur modifikasi.

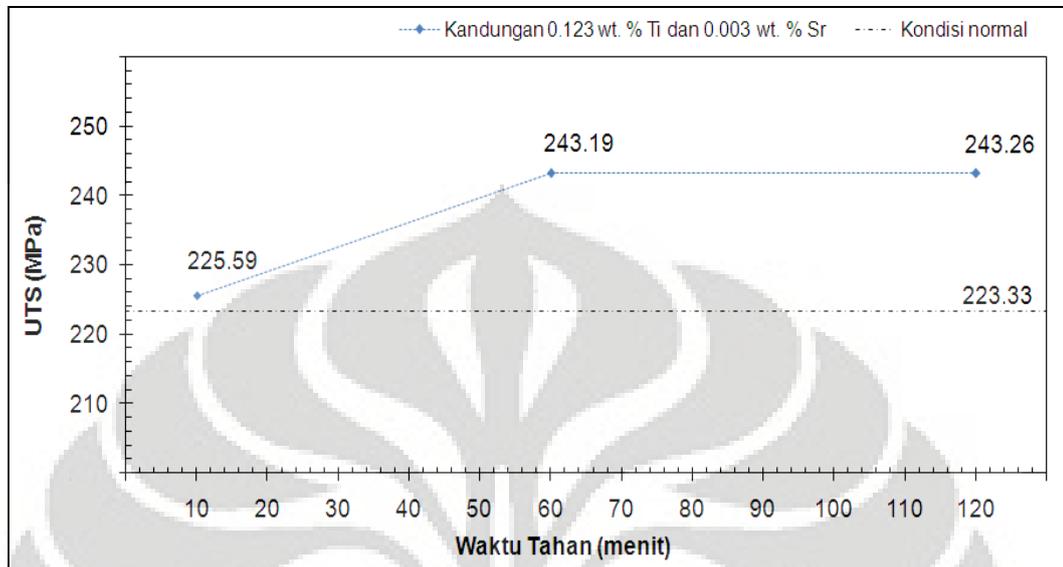
Jadi, pada penelitian ini didapatkan bahwa dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada paduan aluminium AC4B akan meningkatkan porositas paduan tersebut. Namun porositas menjadi terdistribusi lebih merata jika dibandingkan dengan kondisi normal. Selain itu jika dilihat dari sampel uji vakumnya, berdasarkan standar pengamatan visual secara makro di PT AHM, maka hasil yang didapatkan termasuk kategori OK. Hal tersebut bisa terlihat dari bentuk permukaan sampel uji vakum. Permukaan sampel yang cekung mengindikasikan kandungan porositas dalam sampel tersebut masih sedikit sehingga tidak berpengaruh terhadap kualitas produk yang dihasilkan.

#### **4.3.2 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Hasil Uji Tarik Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr**

Hasil uji tarik paduan aluminium AC4B kondisi normal dan pada kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr ditunjukkan oleh Gambar 4.7. Nilai UTS pada kondisi normal adalah 223.33 MPa. Sementara setelah ditambahkan titanium dan stronsium pada waktu tahan 0 menit, nilai UTS menjadi 225.59 MPa. Kemudian pada waktu tahan 60 menit menjadi 243.19 MPa dan pada waktu tahan 120 menit menjadi 243.26 MPa.

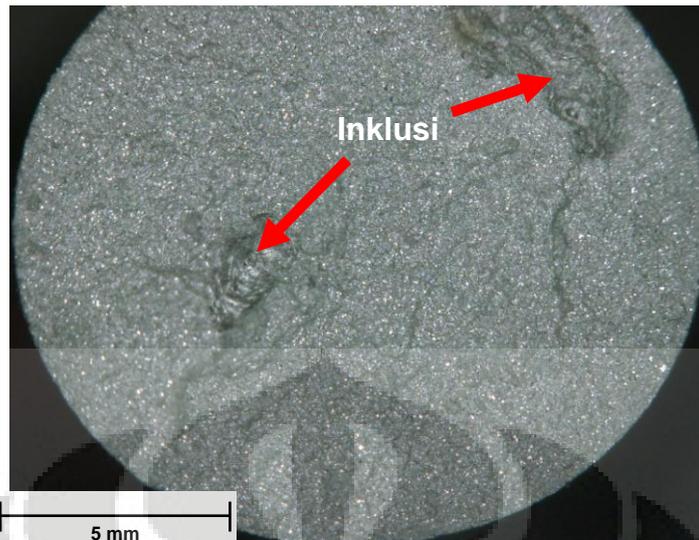
Dari beberapa penelitian yang melihat pengaruh kombinasi penghalus butir dan unsur modifikasi terhadap nilai UTS paduan aluminium memberikan hasil yang sama yaitu terjadinya peningkatan nilai UTS. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh K.G Basavakumar *et al*<sup>[32]</sup> yang mengkombinasikan 1 wt. % Al-Ti-3B dan 0.02 wt. % Sr pada paduan Al-7Si-2.5Cu. Nilai UTS paduan aluminium tersebut meningkat dari 149 MPa menjadi 200 MPa. Hasil ini juga lebih tinggi jika hanya dilakukan penambahan 1 wt. % Al-Ti-3B saja yang

menghasilkan UTS sekitar 184 MPa ataupun penambahan 0.02 wt. % Sr saja yang menghasilkan UTS sekitar 194 MPa.



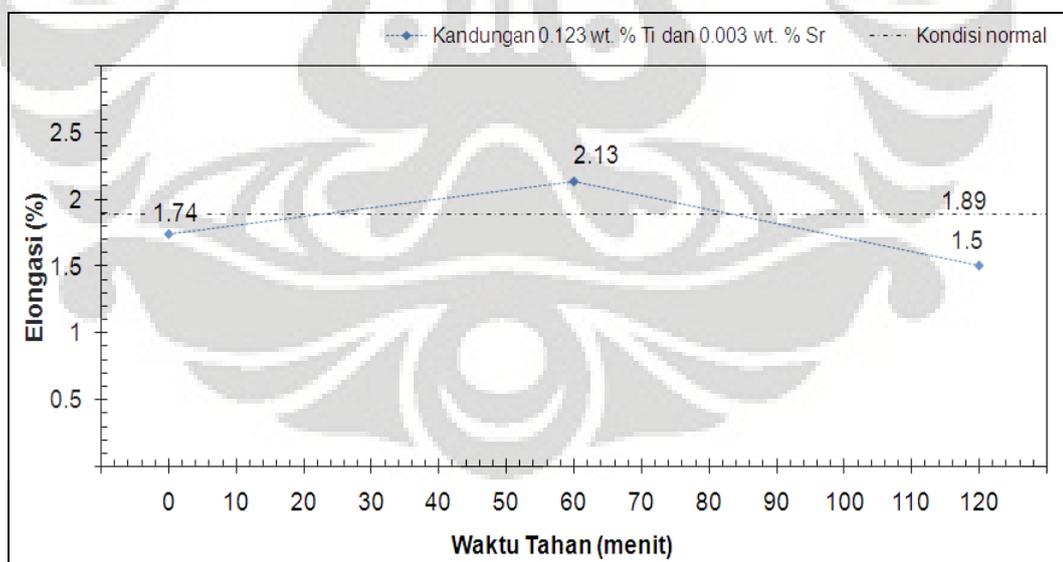
**Gambar 4.7** Pengaruh waktu tahan terhadap nilai UTS paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr.

Peningkatan nilai UTS tersebut terjadi karena dengan adanya kombinasi dari kedua perlakuan tersebut akan menghasilkan dendrit-dendrit serta partikel silikon eutektik yang halus. Dari persamaan *Hall-Petch* juga didapatkan hubungan antara ukuran butir dan kekuatan tarikannya. Dimana semakin kecil ukuran butir, maka kekuatan tarik suatu material akan mengalami kenaikan. Sejalan dengan itu, perubahan dari partikel *acicular* silikon eutektik yang kasar menjadi partikel halus *spheroid* yang didapatkan melalui proses modifikasi akan menghasilkan peningkatan dalam jumlah partikel serta penurunan jarak antar partikel, yang pada akhirnya akan meningkatkan sifat uji tarik dari paduan tersebut<sup>[27]</sup>. Namun dari hasil pengujian tarik yang dilakukan, peningkatan nilai UTS pada paduan aluminium AC4B tersebut tidak terlalu signifikan, hanya sekitar 2.37 %. Salah satu penyebabnya adalah karena adanya kotoran atau inklusi yang terdapat pada aluminium cair dan ikut terbawa pada saat pengambilan sampel uji tarik seperti yang terlihat pada Gambar 4.8. Keberadaan inklusi tersebut bisa menjadi awal terjadinya inisiasi retak, sehingga material bisa putus lebih cepat ketika dilakukan pengujian tarik jika dibandingkan dengan material dalam keadaan tanpa pengotor.



**Gambar 4.8** Inklusi yang terdapat pada sampel uji tarik.

Pada pengamatan terhadap nilai UTS sampel uji tarik paduan aluminium AC4B dengan penambahan titanium dan stronsium pada waktu tahan yang berbeda yaitu 225.59 MPa pada waktu tahan 0 menit, menjadi 243.19 MPa pada waktu tahan 60 menit (naik 7.8 %). Kemudian pada waktu tahan 120 menit menjadi 243.26 MPa (naik 7.83 %).



**Gambar 4.9** Pengaruh waktu tahan terhadap nilai elongasi paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr.

Nilai elongasi paduan aluminium AC4B seperti yang terlihat pada Gambar 4.9, untuk keadaan normal adalah 1.89 %. Setelah penambahan titanium dan stronsium menjadi 1.74 %. Hal ini berarti telah terjadi penurunan sebesar 7.94 %. Seharusnya dengan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi bisa meningkatkan nilai elongasi suatu paduan. Seperti penelitian yang dilakukan oleh R.Cook *et al*<sup>[33]</sup>, bahwa dengan kombinasi 0.015 wt. % Ti dan 0.03wt. % Sr pada A319 akan meningkatkan nilai elongasi dari 2 % menjadi lebih dari 4 %.

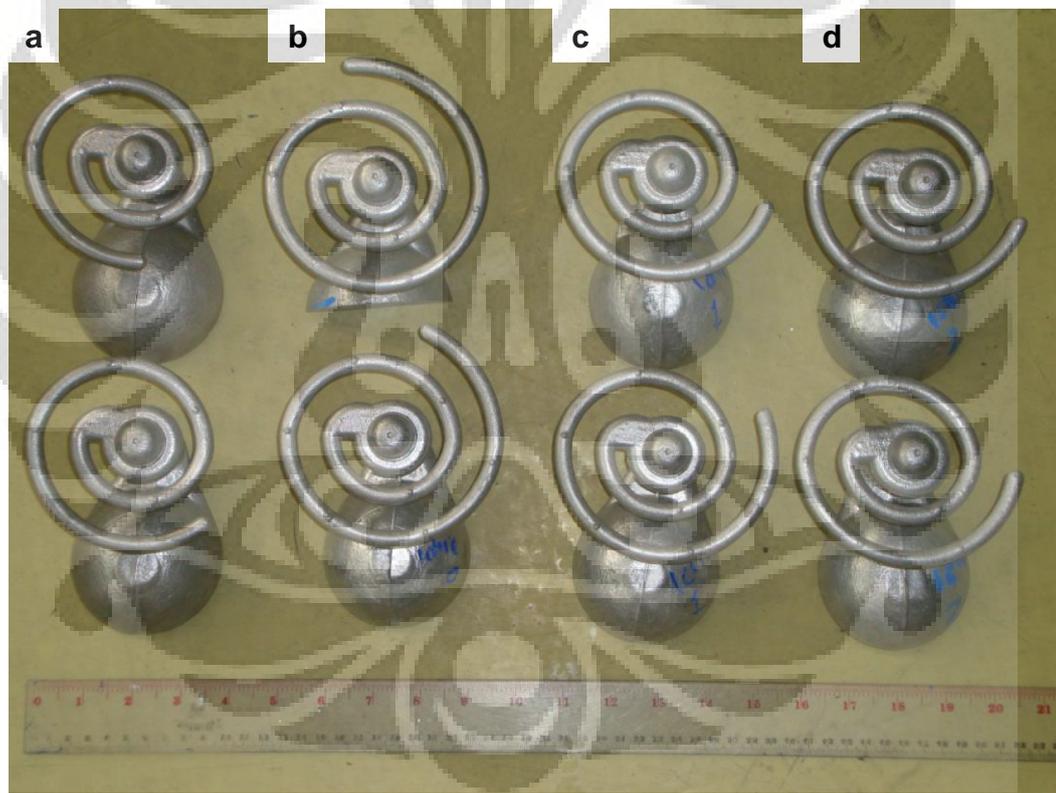
Sementara itu, untuk nilai elongasi paduan aluminium AC4B setelah penambahan titanium dan stronsium pada waktu tahan yang berbeda, terlihat bahwa pada waktu tahan 60 menit elongasi mengalami kenaikan sebesar 22.41 % menjadi 2.13 %. Setelah waktu tahan 120 menit, elongasi mengalami penurunan sebesar 13.79 % menjadi 1.5 % .

Seiring dengan meningkatnya waktu tahan, maka efektivitas penghalus butir dan unsur modifikasi mengalami penurunan, sehingga seharusnya nilai UTS dan elongasi mengalami penurunan, yang mengindikasikan terjadinya fenomena pemudaran. Namun hasil yang didapatkan baik UTS maupun elongasi tidak memperlihatkan hal tersebut. Ketidakesuaian yang didapat dari hasil uji tarik ini bisa terjadi karena proses *fluxing* yang kurang sempurna sehingga mempengaruhi hasil uji tarik, khususnya pada sampel uji tarik pada waktu tahan 0 dan 60 menit. Dimana pada sampel tersebut ditemukan adanya inklusi atau pengotor yang dapat menjadi pemicu terjadi retak awal pada saat uji tarik.

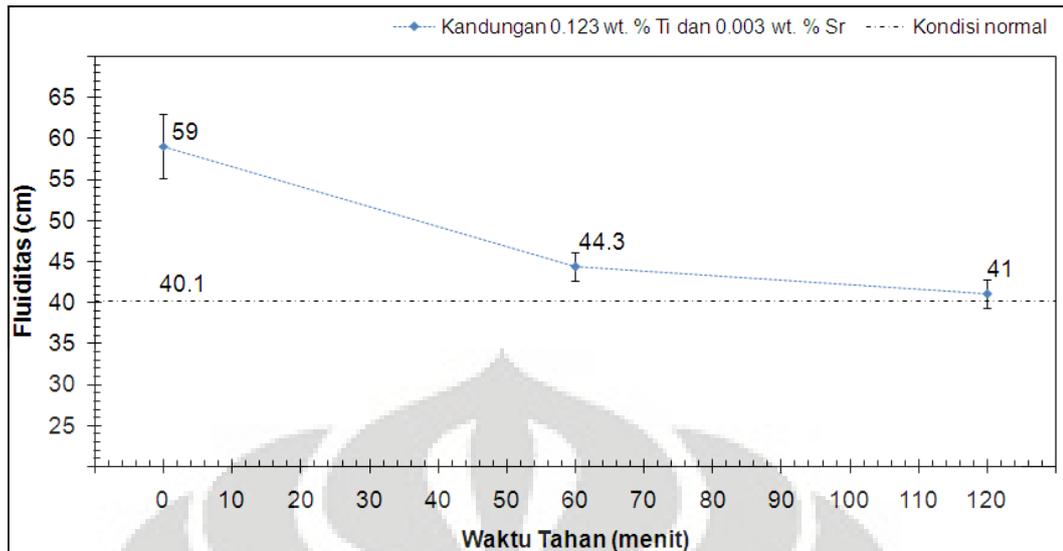
Jadi dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada paduan AC4B akan meningkatkan nilai UTS paduan AC4B tersebut jika dibandingkan dengan kondisi normal. Namun pada pengamatan terhadap nilai UTS dan elongasi pada waktu tahan yang berbeda, proses pemudaran efektivitas penghalusan butir dan modifikasi tidak dapat terlihat. Hal tersebut berdasarkan hasil yang didapat menunjukkan adanya peningkatan pada nilai UTS dan penurunan elongasi. Seharusnya seiring dengan meningkatnya waktu tahan, nilai UTS dan elongasi akan semakin turun. Faktor-faktor yang mempengaruhi ketidakesuaian tersebut antara lain keberadaan inklusi proses *fluxing* yang tidak sempurna.

### 4.3.3 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Fluiditas Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr

Sampel hasil uji fluiditas paduan aluminium AC4B dalam keadaan normal dan setelah penambahan titanium dan stronsium hingga kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr diperlihatkan oleh Gambar 4.10. Untuk melihat pengaruh waktu tahan dengan kombinasi penambahan titanium dan stronsium terhadap fluiditas paduan aluminium AC4B ditampilkan pada Gambar 4.11. Pada Gambar 4.11 tersebut, nilai fluiditas paduan AC4B dalam keadaan normal adalah 40.1 cm. Kemudian ketika dilakukan penambahan titanium dan stronsium, untuk waktu tahan 0 menit nilai fluiditas menjadi 59 cm, dan setelah waktu tahan 60 menit menjadi 44.3 cm dan pada waktu tahan 120 menit menjadi 41 cm.



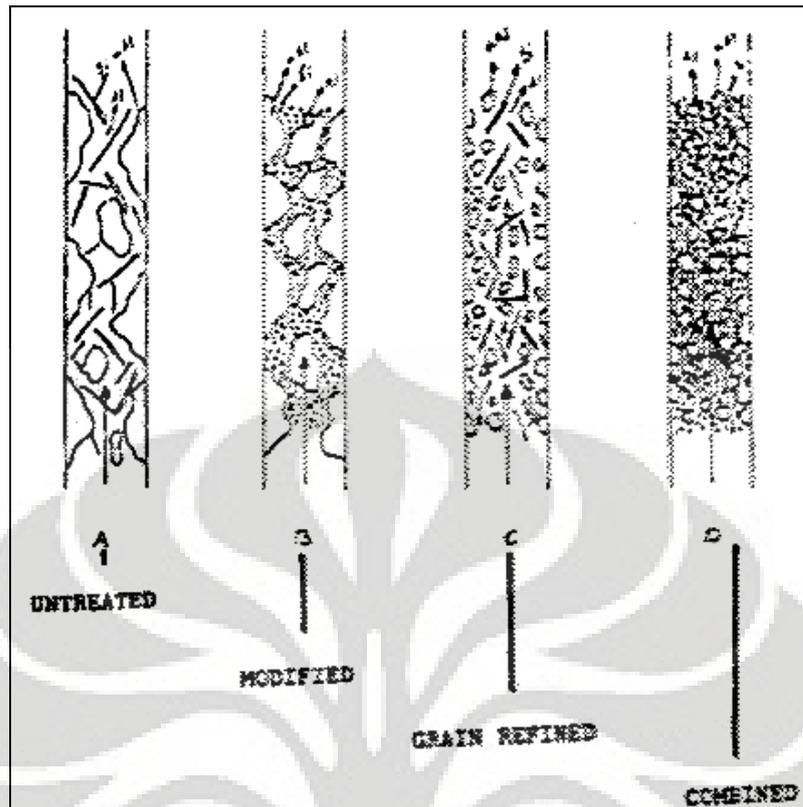
**Gambar 4.10** Sampel hasil uji fluiditas paduan aluminium AC4B (a) kondisi normal, dan dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada waktu tahan (b) 10 menit, (c) 60 menit, dan (d) 120 menit.



**Gambar 4.11** Pengaruh waktu tahan terhadap fluiditas paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr.

Jika dibandingkan nilai fluiditas AC4B pada kondisi normal dengan setelah penambahan titanium dan stronsium, maka telah terjadi peningkatan nilai fluiditas yang cukup signifikan yaitu dari 40.1 cm menjadi 59 cm, yang berarti telah terjadi peningkatan sekitar 47.13 %. Peningkatan nilai fluiditas yang terjadi pada paduan aluminium bisa terjadi karena dengan penambahan titanium dan stronsium akan menyebabkan kemampuan pengisian cetakan menjadi lebih baik<sup>[31]</sup>. Gambar 4.12 memperlihatkan skematis pengaruh proses penghalusan butir, modifikasi, dan penggabungan keduanya terhadap kemampuan pengisian cetakan.

Chai *et al*<sup>[31]</sup> dari penelitiannya didapatkan bahwa penghalus butir dan unsur modifikasi akan menunda titik koherensi dendrit. Penundaan tersebut merupakan suatu indikasi bahwa jarak antar partikel  $\alpha$ -Al semakin kecil dan akan meningkatkan mampu alir dari paduan aluminium cair jika dibandingkan dengan paduan yang tidak diberikan penghalus butir dan unsur modifikasi.



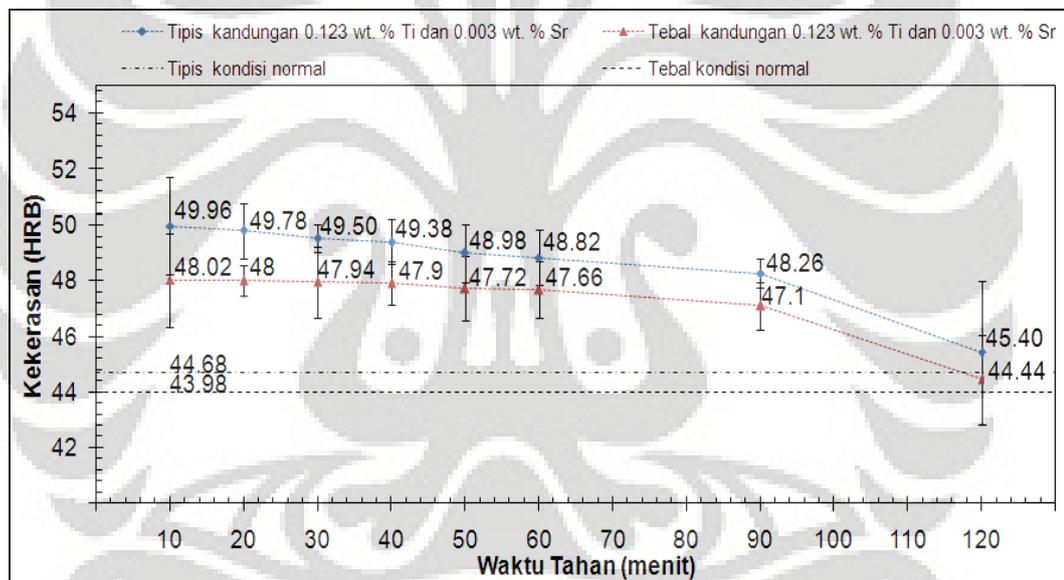
Gambar 4.12 Skematis model fluiditas pada Al7Si dengan berbagai perlakuan<sup>[31]</sup>.

Pada nilai fluiditas paduan aluminium AC4B yang sudah ditambahkan penghalus butir dan unsur modifikasi untuk waktu tahan 0, 60, dan 120 menit, terlihat bahwa nilainya mengalami penurunan. Dari waktu tahan 0 ke 60 menit, penurunan tercatat dari 59 cm menjadi 44.3 cm atau sekitar 32.88 %, dan kemudian terus turun hingga 41 cm atau sekitar 43.9 % pada waktu tahan 120 menit. Penurunan nilai fluiditas menunjukkan adanya mekanisme pemudaran pada penambahan titanium dan stronsium tersebut.

Jadi dengan penambahan titanium dan stronsium hingga kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada paduan aluminium AC4B akan meningkatkan nilai fluiditas dari paduan tersebut. Dan seiring dengan meningkatnya waktu tahan maka fluiditas menjadi berkurang yang mengindikasikan terjadi proses pemudaran.

#### 4.3.4 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Kekerasan *Cylinder Head* Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr

Pada Gambar 4.13 terlihat pengaruh waktu tahan terhadap kekerasan komponen *cylinder head* paduan aluminium AC4B *as-cast* dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr. Dalam kondisi normal, *cylinder head* paduan aluminium AC4B *as-cast* pada bagian tipis memiliki kekerasan 44.68 HRB dan bagian tebal memiliki kekerasan 43.98 HRB. Sementara itu ketika dilakukan penambahan titanium dan stronsium hingga kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr kekerasannya menjadi 49.96 HRB pada bagian tipis dan 48.02 HRB pada bagian tebal.



Gambar 4.13 Pengaruh waktu tahan terhadap nilai kekerasan komponen *cylinder head* paduan aluminium AC4B *as-cast* dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr.

Dilihat dari nilai tersebut berarti dengan penambahan titanium dan stronsium hingga kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr telah meningkatkan kekerasan *cylinder head* paduan aluminium AC4B *as-cast* sebesar 11.8 % untuk bagian tipis dan 9.18 % untuk bagian tebal. Peningkatan kekerasan ini sangat berhubungan dengan proses penghalusan butir dan modifikasi, dimana butir kolumnar primer  $\alpha$ -Al yang kasar akan menjadi butir *equiaxed*  $\alpha$ -Al yang halus. Selain itu silikon eutektik serta fasa intermetalik seperti  $Al_2Cu$  yang tersebar disekitar area interdendritik juga akan menjadi semakin halus. Struktur

mikro yang seperti inilah yang menyebabkan nilai kekerasan yang lebih tinggi pada paduan aluminium. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh K G Basavakumar, P G Mukunda dan M Chakraborty<sup>[32]</sup> pada Al-7Si-2.5Cu, dimana dengan kombinasi penambahan 0.01 wt. % Al-1Ti-3B dan 0.02 wt. % Sr meningkatkan kekerasan paduan tersebut dari 73 HB, menjadi 98 HB. Nilai ini juga lebih tinggi jika hanya diberikan 0.01 wt. % Al-1Ti-3B saja yang menghasilkan kekerasan 85 HB atau jika hanya diberikan 0.02 wt. % Sr yang akan menghasilkan kekerasan 90 HB.

Dari hasil uji kekerasan untuk setiap waktu tahan, pada Gambar 4.13 tersebut terlihat bahwa nilai kekerasan mengalami penurunan. Pada waktu tahan 20 menit untuk bagian tipis, kekerasan menjadi 49.78 HRB (turun 0.36 %) dan pada bagian tebal menjadi 48 HRB (turun 0.042 %). Pada waktu tahan 30 menit, untuk bagian tipis kekerasannya menjadi 49.5 HRB (turun 0.92 %) dan untuk bagian tebal menjadi 47.94 (turun 0.16 %). Pada waktu tahan 40 menit, kekerasan bagian tipis menjadi 49.38 HRB (turun 1.16%) dan untuk bagian tebal menjadi 47.9 HRB (0.25 %). Pada waktu tahan 50 menit, kekerasan bagian tipis menjadi 48.98 HRB (turun 1.96 %) dan bagian tebal menjadi 47.72 HRB (turun 0.62%) Pada waktu tahan 60 menit, pada bagian tipis kekerasannya menjadi 48.82 HRB untuk bagian (turun 2.28 %) dan untuk bagian tebal menjadi 47.66 HRB (turun 0.75 %). Pada waktu tahan 90 menit, kekerasan bagian tipis menjadi 48.26 HRB (turun 3.4 %) dan bagian tebal menjadi 47.1 HRB (turun 1.92 %). Penurunan kekerasan yang cukup signifikan terjadi pada waktu tahan 120 menit. Dimana pada bagian tipis kekerasannya menjadi 45.4 HRB, yang berarti telah terjadi penurunan 9.13 %. Pada bagian tebal kekerasannya menjadi 44.44 HRB, yang berarti telah terjadi penurunan 7.46 %. Namun nilai kekerasan pada waktu tahan 120 menit tersebut masih lebih tinggi jika dibandingkan dengan kondisi normal. Penurunan nilai kekerasan ini terjadi karena adanya proses pemudaran dari efektivitas proses penghalusan butir dan modifikasi. Proses pemudaran yang mengakibatkan turunnya nilai kekerasan ini sangat berhubungan dengan perubahan struktur mikro *cylinder head* AC4B.

Sementara itu untuk perbedaan nilai kekerasan antara bagian tebal dan tipis sangat berkaitan dengan proses pembekuan logam. Bagian tipis memiliki

nilai kekerasan yang lebih tinggi karena waktu pembekuan yang lebih cepat. Pembekuan yang cepat akan menghasilkan struktur mikro yang lebih halus. Struktur halus inilah yang menyebabkan daerah bagian tipis memiliki kekerasan yang lebih tinggi. Sementara itu untuk bagian tebal mengalami pembekuan yang lebih lama karena volume logam cair yang berada pada daerah ini lebih banyak. Pembekuan yang lama akan menghasilkan struktur dendrit yang lebih panjang dan besar. Struktur inilah yang menyebabkan daerah tebal memiliki kekerasan yang lebih rendah dari bagian tipis.

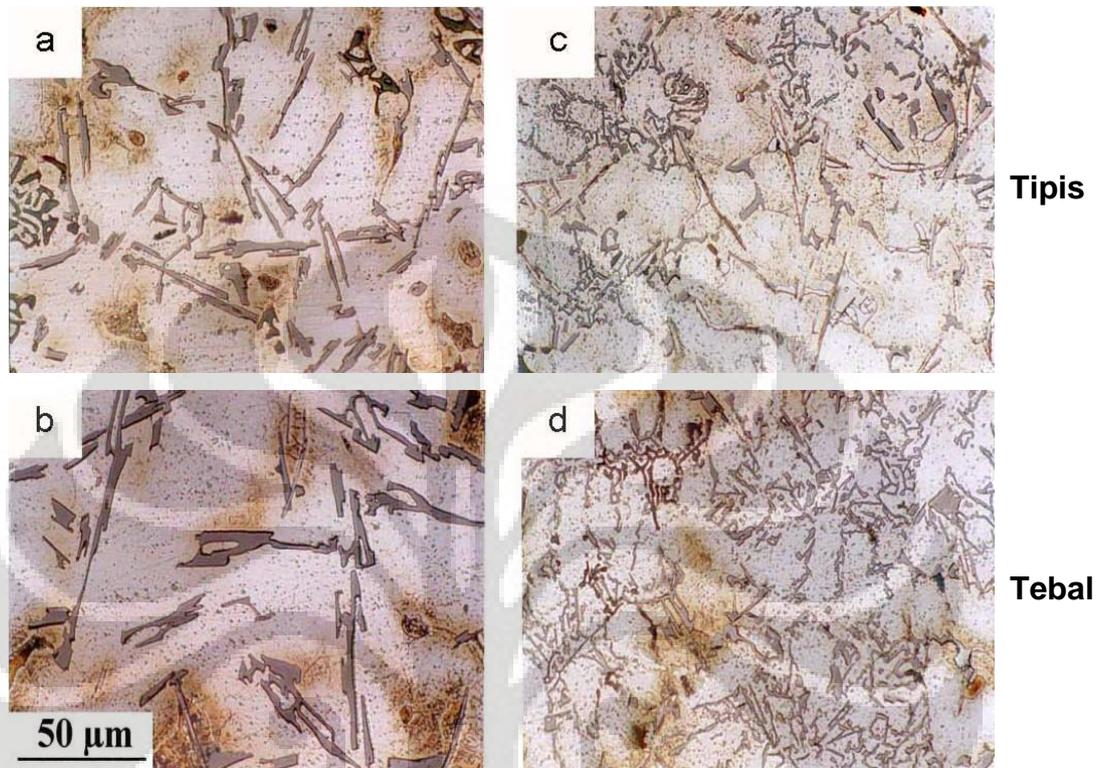
Jadi, pada penelitian ini didapatkan bahwa dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada *cylinder head* paduan aluminium AC4B telah meningkatkan kekerasan paduan tersebut. Dan jika dilihat nilai kekerasannya pada rentang waktu tahan 10 menit hingga 120 menit, nilai kekerasannya mengalami penurunan. Penurunan tersebut mengindikasikan telah terjadi pemuatan efektivitas proses penghalusan butir dan modifikasi pada paduan aluminium AC4B.

#### **4.3.5 Pengaruh Waktu Tahan terhadap Struktur Mikro *Cylinder Head* Paduan Aluminium AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr**

##### **4.3.5.1 Pengamatan dengan Mikroskop Optik**

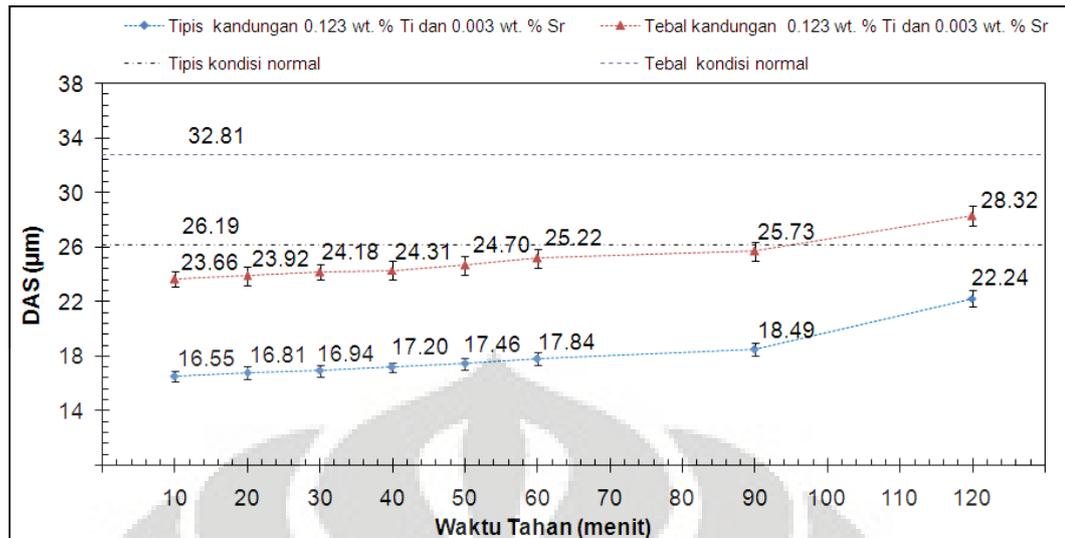
Struktur mikro *cylinder head* paduan aluminium AC4B ditunjukkan oleh Gambar 4.14.a untuk kondisi normal dan Gambar 4.14.b untuk kondisi dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada kondisi normal, struktur silikon memiliki morfologi yang tajam dan panjang. Sementara itu setelah ditambahkan penghalus butir dan unsur modifikasi, terjadi perubahan pada struktur mikronya dimana dendrit menjadi lebih halus dan silikon menjadi lebih pendek. Hal tersebut menandakan bahwa telah terjadi proses penghalusan butir dan modifikasi pada paduan AC4B tersebut. Namun modifikasi yang terjadi pada AC4B tersebut tidak terjadi secara merata. Hal ini ditandai dengan masih adanya silikon eutektik yang masih kasar. Jika mengacu pada derajat modifikasi aluminium silikon<sup>[25]</sup>, paduan aluminium AC4B pada kondisi normal termasuk ke dalam kelas A. Sedangkan untuk paduan yang telah

ditambahkan titanium dan stronsium hingga kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr, termasuk ke dalam kelas B yang memperlihatkan struktur lamelar.



**Gambar 4.14** Struktur mikro paduan aluminium AC4B (a-b) kondisi normal, (c-d) kondisi dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr

Analisis kuantitatif pengaruh waktu tahan terhadap struktur mikro paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr dapat dilakukan dengan membandingkan nilai *dendrite arm spacing* (DAS) pada kondisi normal dan kondisi setelah penambahan titanium dan stronsium. Nilai DAS paduan aluminium AC4B pada kondisi normal adalah 26.19  $\mu\text{m}$  untuk bagian tipis dan 32.81  $\mu\text{m}$  untuk bagian tebal. Sementara itu nilai DAS AC4B setelah dilakukan penambahan titanium dan stronsium hingga kandungan seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.15, untuk bagian tipis menjadi 16.55  $\mu\text{m}$  dan bagian tebal menjadi 23.66  $\mu\text{m}$ .



**Gambar 4.15** Pengaruh waktu tahan terhadap nilai DAS komponen *cylinder head* AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt.% Sr.

Berdasarkan nilai DAS tersebut, berarti ketika ditambahkan titanium dan stronsium hingga kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr telah menurunkan nilai DAS paduan aluminium AC4B sebesar 36.81 % pada bagian tipis dan 27.89 % pada bagian tebal. Penurunan nilai DAS tersebut disebabkan oleh laju solidifikasi yang cepat dan bersamaan dengan ukuran butir yang lebih halus. Seperti yang telah diketahui bahwa proses penghalusan butir akan menaikkan temperatur nukleasi  $\alpha$ -Al yang akan meningkatkan laju solidifikasi.

Sifat mekanis seperti kekuatan tarik dan kekerasan juga dipengaruhi oleh nilai DAS. Penurunan nilai DAS yang didapatkan pada struktur mikro ini telah mengkonfirmasi atas terjadinya peningkatan nilai kekerasan dan kekuatan tarik paduan AC4B yang telah ditambahkan titanium dan stronsium pada bagian sebelumnya. Selain itu, penurunan nilai DAS juga berhubungan terhalangnya nukleasi dan pertumbuhan fasa intermetalik besi. Fasa ini merupakan akibat adanya pengotor besi dalam paduan aluminium yang memiliki morfologi seperti pelat pada fasa yang kaya dengan unsur besi. Seperti pada penelitian yang telah dilakukan oleh Vorren *et al*<sup>[31]</sup> yang mendapatkan bahwa panjang dari pelat tersebut merupakan fungsi dari DAS. Dimana penurunan nilai DAS akan berdampak pada pembentukan pelat pada fasa yang kaya dengan unsur besi dengan ukuran yang lebih kecil.

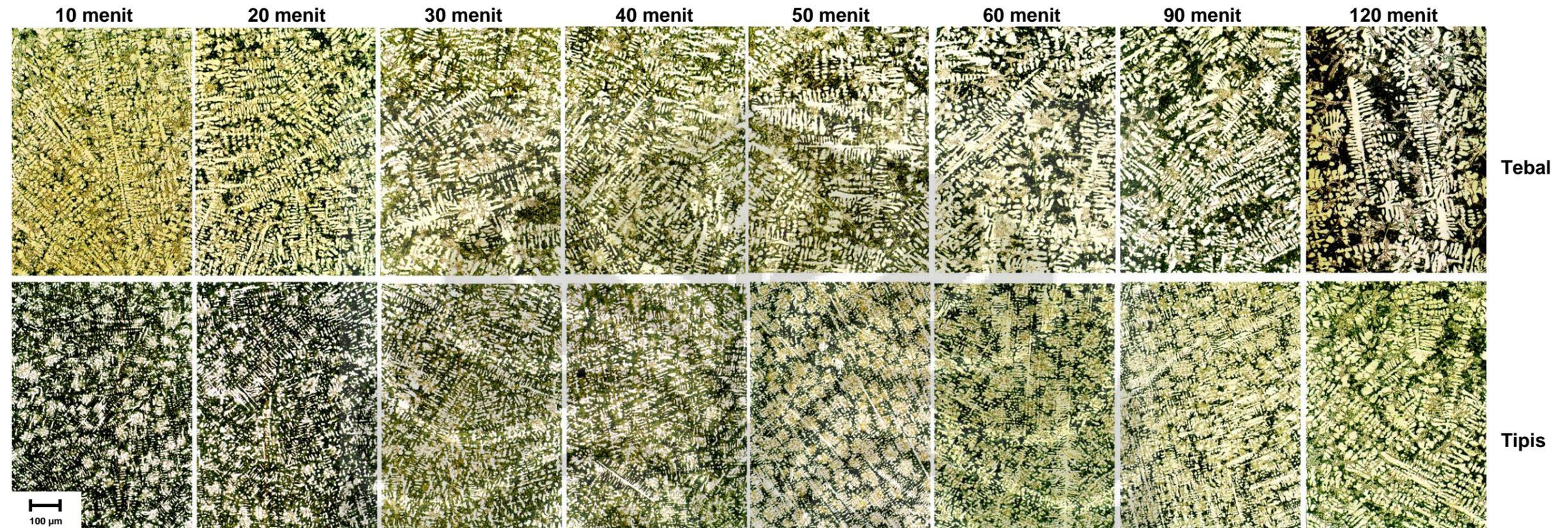
Pada Gambar 4.15 juga terlihat adanya pengaruh waktu tahan terhadap nilai DAS paduan AC4B yang ditambahkan titanium dan stronsium. Dimana semakin lama waktu tahan, nilai DAS akan semakin meningkat. Pada waktu tahan 20 menit untuk bagian tipis, nilai DAS menjadi 16.81  $\mu\text{m}$  (naik 1.57 %) dan pada bagian tebal menjadi 23.92  $\mu\text{m}$  (naik 1.1 %). Pada waktu tahan 30 menit, untuk bagian tipis, nilai DAS menjadi 16.94  $\mu\text{m}$  (naik 2.36 %) dan untuk bagian tebal menjadi 24.18  $\mu\text{m}$  (naik 2.2 %). Pada waktu tahan 40 menit, DAS bagian tipis menjadi 17.2  $\mu\text{m}$  (naik 3.93 %) dan untuk bagian tebal menjadi 24.31  $\mu\text{m}$  (naik 2.75 %). Pada waktu tahan 50 menit, DAS bagian tipis menjadi 17.46  $\mu\text{m}$  (naik 5.5 %) dan bagian tebal menjadi 24.7  $\mu\text{m}$  (4.4 %). Pada waktu tahan 60 menit, DAS pada bagian tipis menjadi 17.84  $\mu\text{m}$  (naik 7.8 %) dan bagian tebal menjadi 25.22  $\mu\text{m}$  (naik 6.6 %). Pada waktu tahan 90 menit, DAS untuk bagian tipis menjadi 18.49  $\mu\text{m}$  (naik 11.72 %) dan bagian tebal menjadi 25.73  $\mu\text{m}$  (naik 8.75 %). Kenaikan DAS yang paling tinggi terjadi pada waktu tahan 120 menit, dimana pada daerah tipis menjadi 22.24  $\mu\text{m}$  (naik 34.38 %) dan pada daerah tebal menjadi 28.32  $\mu\text{m}$  (naik 19.7 %).

Terjadinya peningkatan nilai DAS mengindikasikan terjadinya pemudaran pada penambahan titanium dan stronsium yang disebabkan oleh berkurangnya efektivitas penghalus butir dan unsur modifikasi tersebut, sehingga DAS menjadi semakin besar bahkan hampir mendekati nilai DAS pada kondisi normal sebelum penambahan. Perubahan DAS tersebut jelas dapat terlihat pada perubahan struktur mikro paduan aluminium AC4B yang telah ditambahkan titanium dan stronsium dalam rentang waktu tahan selama 120 menit seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.16. Dengan DAS yang semakin besar maka sifat mekanisnya menjadi semakin turun. Pemudaran tersebut bisa terjadi karena kemungkinan adanya penguapan dan oksidasi unsur modifikasi dalam logam cair<sup>[21]</sup>, begitu pula dengan proses penghalusan butir akan menjadi kurang efektif karena terjadinya proses pengendapan, dan agglomerasi unsur penghalus butir, serta adanya efek pencemaran dalam logam cair<sup>[24]</sup>.

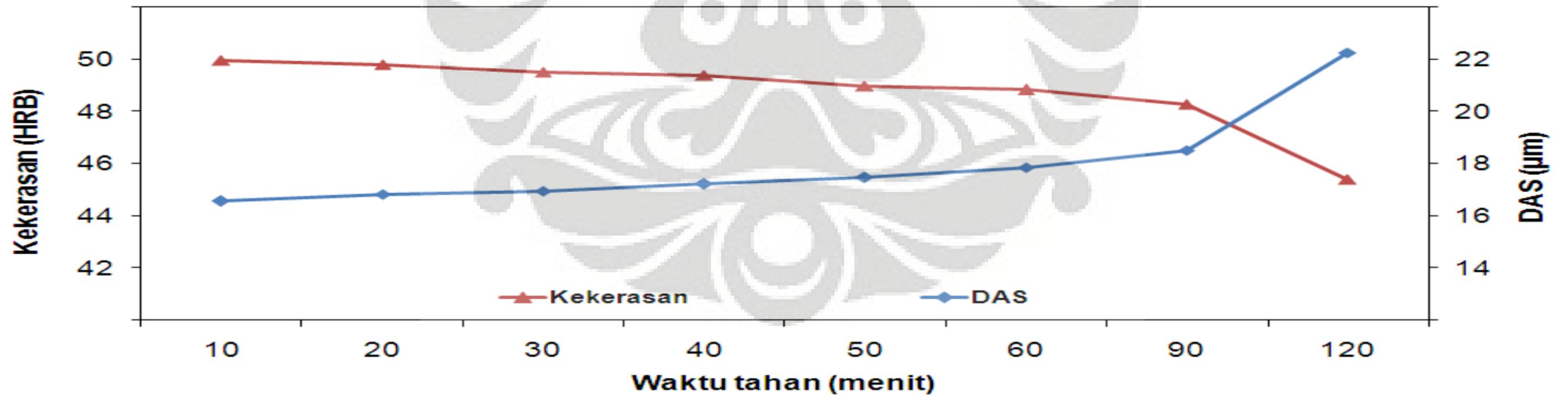
Hubungan antara nilai DAS dan kekerasan *cylinder head* AC4B ditunjukkan pada Gambar 4.17. Dari gambar tersebut bisa terlihat hubungan berbanding terbalik antara kekerasan dan nilai DAS pada waktu tahan yang semakin meningkat. Dimana dengan semakin meningkatnya waktu tahan, nilai

DAS akan semakin besar, dan sebaliknya nilai kekerasan menjadi semakin turun. Secara keseluruhan, kekerasan telah mulai mengalami penurunan dan nilai DAS mengalami kenaikan setelah waktu tahan 10 menit. Akan tetapi penurunan kekerasan dan kenaikan nilai DAS tersebut terjadi secara signifikan setelah waktu tahan 90 menit hingga 120 menit. Hal ini menandakan proses pemudaran dapat teramati dengan jelas setelah waktu tahan 90 menit.





Gambar 4.16 Struktur mikro cylinder head AC4B bagian tipis dan tebal pada waktu tahan 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit.

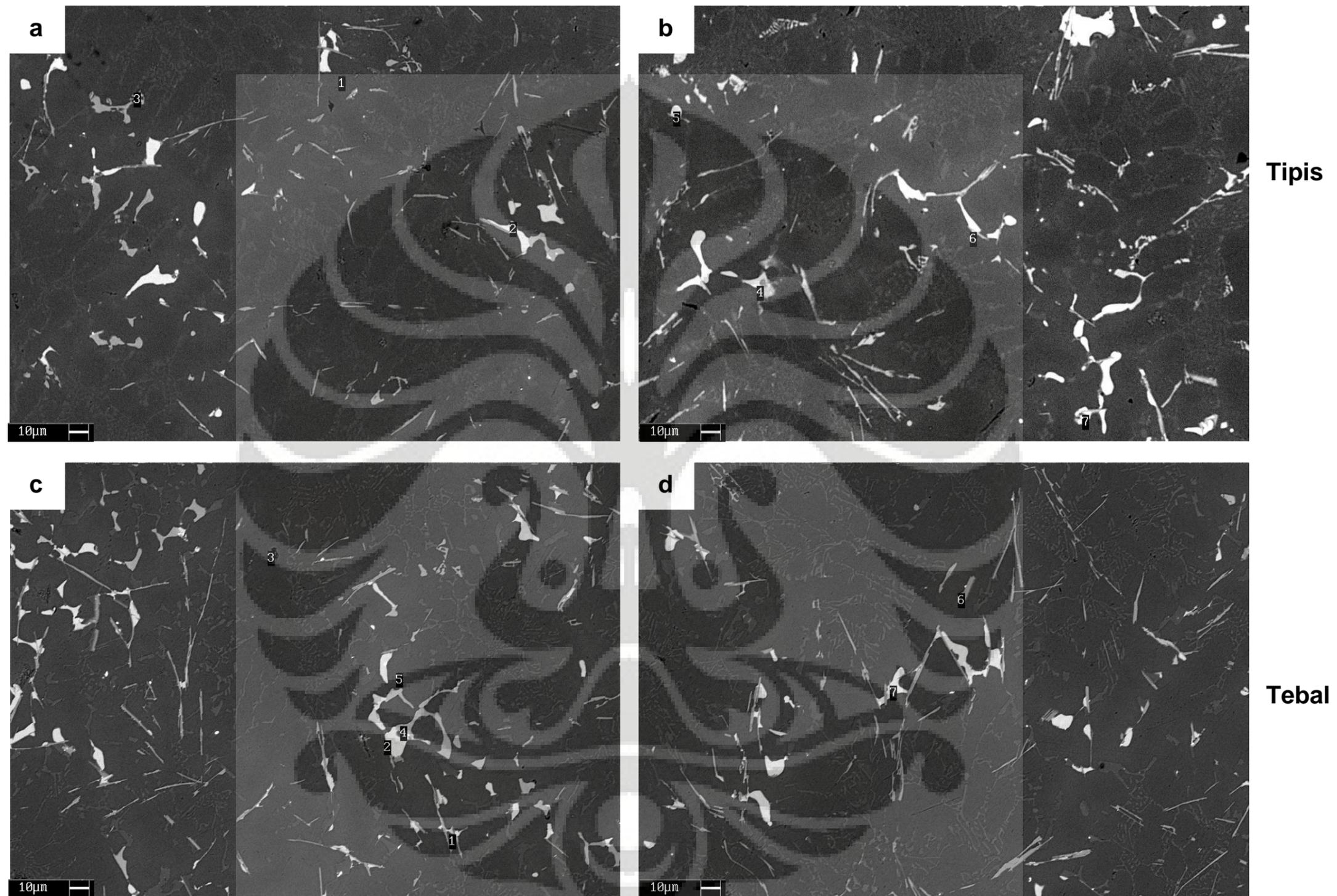


Gambar 4.17 Hubungan kekerasan dan DAS cylinder head AC4B terhadap waktu tahan.

#### 4.3.5.2 Pengamatan Struktur Mikro dengan SEM dan EDAX

Hasil pengamatan SEM menggunakan *back scattered electron* (BSE) sampel *cylinder head* dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt.% Sr diperlihatkan pada Gambar 4.18. Untuk setiap sampel tipis dan tebal dilakukan identifikasi terhadap tujuh titik. SEM BSE digunakan untuk mengamati morfologi dan warna fasa, sementara EDAX digunakan untuk mengetahui komposisi fasa-fasa yang telah diamati.

Hasil EDAX seperti yang terlihat pada Tabel 4.4 memberikan informasi tentang senyawa atau partikel yang terdapat pada *cylinder head* AC4B. Dari tabel tersebut, terlihat adanya fasa  $TiAl_3$  yang merupakan salah satu partikel pembentuk inti pada proses penghalusan butir. Dari tabel tersebut juga ditemukan adanya fasa intermetalik yang mengandung Cu, Fe, dan Mn seperti  $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$  dan  $Al_2Cu$ . Unsur Sr tidak ditemukan pada pengujian ini. Hal tersebut disebabkan oleh komposisi penambahan unsur modifikasi yang sedikit sehingga tidak dapat terdeteksi oleh EDAX.



**Gambar 4.18** Hasil pengamatan SEM sampel *cylinder head* (a-b) bagian tipis, (c-d) bagian tebal.

**Tabel 4.4** Hasil analisis SEM EDAX sampel tipis dan tebal *cylinder head* AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt.% Sr

Bagian	No. Titik	Unsur (wt. %)								Warna	Fasa yang mungkin
		Al	Si	Ti	Sr	Cu	Fe	Mn	Unsur Lain		
Tipis	1	81.45	1.39	4.36	-	9.22	-	-	Sisa	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu, TiAl <sub>3</sub> , segregasi Si
	2	37.69	0.63	-	-	59.61	-	-	Sisa	putih	Al <sub>2</sub> Cu
	3	67.72	4.26	-	-	-	17.45	5.18	Sisa	abu-abu	Al <sub>15</sub> (Mn,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> , Al
	4	42.3	4.78	-	-	36.37	10.16	-	Sisa	abu-abu	Al <sub>15</sub> (Mn,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> Cu
	5	28.49	0.45	-	-	69.86	-	-	Sisa	abu-abu	Al, Al <sub>2</sub> Cu
	6	49.61	-	-	-	29.56	4.66	-	Sisa	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu
	7	45.2	-	1.21	-	38.63	9.87	-	Sisa	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu
Tebal	1	86.3	1.33	0.98	-	8.8	-	-	Sisa	putih	Al, segregasi Ti
	2	30.67	0.36	-	-	67.97	-	-	Sisa	putih	Al, Al <sub>2</sub> Cu, segregasi Si
	3	98.22	1.31	-	-	-	-	-	Sisa	abu-abu	Al, segregasi Si
	4	49.19	4.67	-	-	22.27	15.3	7	Sisa	putih	Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>15</sub> (Mn,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>
	5	98.61	0.89	-	-	-	-	-	Sisa	abu-abu	Al, segregasi Si
	6	94.23	0.97	0.73	-	17.74	-	-	Sisa	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu, segregasi Si dan Ti
	7	28.85	0.3	-	-	69.15	-	-	Sisa	putih	Al, Al <sub>2</sub> Cu, segregasi Si

#### 4.4 Analisis Pemudaran Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada Paduan Aluminium AC4B.

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari pengujian fluiditas, kekerasan, dan pengamatan struktur mikro pada paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr, bisa disimpulkan bahwa efektivitas penghalus butir dan unsur modifikasi mengalami penurunan. Dimana seiring dengan meningkatnya waktu tahan, fluiditas dan kekerasan paduan tersebut mengalami penurunan, dan sebaliknya nilai DAS mengalami peningkatan.

Dari literatur didapatkan bahwa fenomena pemudaran pada proses penghalusan butir terjadi karena berat jenis TiAl<sub>3</sub> (3.3 gr/cm<sup>3</sup>) dan dan TiB<sub>2</sub> (4.5 gr/cm<sup>3</sup>) lebih tinggi dari berat jenis aluminium, sehingga akan mengendap di bagian bawah *ladle*<sup>[35]</sup>. Selain itu, pada efek pencemaran unsur Zr pada aluminium yang mengandung titanium, akan membentuk Al<sub>3</sub>Zr yang memiliki berat jenis 4.1 gr/cm<sup>3</sup>. Namun karena pada penelitian ini pada paduannya tidak memiliki kandungan B dan Zr, maka yang paling memungkinkan pada terjadinya fenomena pemudaran adalah pengendapan senyawa Al<sub>3</sub>Ti pada bagian bawah dapur. Sementara itu unsur modifikasi stronsium bisa mengalami fenomena pemudaran karena teroksidasi oleh oksigen, ataupun bereaksi dengan elemen lain yang

memiliki afinitas yang tinggi<sup>[21]</sup>. Pada penelitian ini tidak ditemukan adanya adanya interaksi antara penghalus butir dan unsur modifikasi.

Fenomena pemudaran juga bisa dilihat pada nilai *growth restriction factor* (GRF) pada paduan yang memiliki berbagai unsur terlarut. Dimana jika paduan tersebut memiliki kadar silikon diatas 3 wt. %, maka dengan semakin besarnya nilai GRF, akan semakin meningkatkan ukuran butir paduan tersebut<sup>[20]</sup>. Nilai GRF yang besar mengindikasikan bahwa unsur terlarut yang terdapat pada paduan tersebut tidak lagi efektif pada proses penghalangan pertumbuhan nukleasi butir, sehingga butir akan terus menjadi besar. Pada penelitian ini nilai GRF untuk waktu tahan 0 menit adalah 86.56, sementara pada waktu tahan 120 menit menjadi 88.45. Tabel 4.5 memperlihatkan hubungan antara fluiditas, kekerasan, DAS, dan GRF pada fenomena pemudaran.

**Tabel 4.5** Hubungan antara fluiditas, kekerasan, DAS, dan GRF pada fenomena pemudaran kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada paduan aluminium AC4B

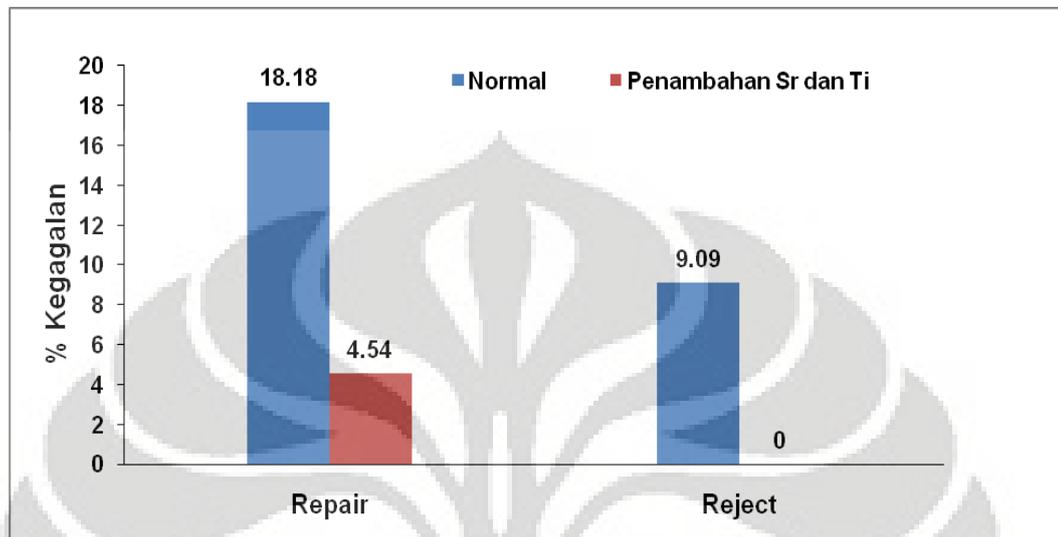
Waktu Tahan (menit)	$\Delta$ Fluiditas (%)	$\Delta$ Kekerasan (%)		$\Delta$ DAS (%)		GRF
		Tipis	Tebal	Tipis	Tebal	
10	47.13	11.8	9.18	36.81	27.89	86.56
120	-43.9	-9.13	-7.46	34.38	19.7	88.45

#### 4.5 Analisis Kegagalan Komponen *Cylinder Head* Paduan AC4B dengan Kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr

Salah satu hal yang melatarbelakangi penelitian ini adalah untuk mengurangi tingkat kegagalan pada komponen *cylinder head* AC4B dengan proses LPDC. Kegagalan tersebut disebabkan oleh adanya cacat-cacat pada proses pengecoran seperti *misrun*, pasir gugur, bocor, dan sebagainya. Dengan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi diharapkan cacat-cacat tersebut bisa dikurangi.

Dalam hal ini ada dua kategori komponen *cylinder head as-cast* hasil LPDC yang secara visual tidak bisa masuk ke tahapan permesinan, yaitu *repair* dan *reject*. *Repair* maksudnya adalah komponen *cylinder head* yang memiliki cacat seperti *misrun* namun masih bisa diperbaiki dengan proses *repair welding* untuk kemudian bisa diteruskan ke tahapan permesinan. Sedangkan *reject*

maksudnya adalah komponen *cylinder head* yang memiliki cacat seperti pasir gugur, lengket pada dies, atau cacat lainnya dan tidak bisa dilakukan proses *repair* sehingga harus dilebur kembali atau dengan kata lain adalah produk gagal.



**Gambar 4.19** Pengaruh kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr terhadap persentase kegagalan komponen *cylinder head* AC4B yang *repair* dan *reject*.

Dalam penelitian ini, jumlah *cylinder head* yang diamati sebanyak 44 komponen untuk setiap kondisi normal dan penambahan stronsium dan titanium. Jumlah komponen sebanyak 44 didasarkan pada waktu pengamatan proses pemudaran pada penelitian selama 120 menit untuk satu mesin LPDC. Pada Gambar 4.19 terlihat pengaruh kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr terhadap komponen *repair* dan *reject cylinder head* AC4B. Dari 44 komponen *cylinder head* pada kondisi normal, sebanyak 8 komponen atau sekitar 18.18 % termasuk ke dalam kategori *repair* dan 4 komponen atau 9.09 % termasuk ke dalam kategori *reject*. Sementara itu ketika dilakukan penambahan stronsium dan titanium dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr, komponen *cylinder head* yang termasuk kategori *repair* hanya 2 komponen atau sekitar 4.54 % dan tidak ada komponen yang termasuk kategori *reject*. Hal ini berarti ketika dilakukan penambahan stronsium dan titanium akan menurunkan tingkat *repair* pada *cylinder head* sekitar 13.64 % dan *reject* sekitar 9.09 %.

Walaupun hasil yang didapatkan tidak mewakili keadaan proses produksi secara keseluruhan, namun dari penelitian ini telah dapat melihat hubungan

pengaruh penambahan stronsium dan titanium terhadap tingkat kegagalan *cylinder head* AC4B, dimana dengan penambahan tersebut bisa menurunkan tingkat kegagalan secara signifikan.

Uji coba juga telah dilakukan sehubungan dengan pengaruh penghalus butir dan unsur modifikasi terhadap tingkat kegagalan *cylinder head* dengan penambahan 0.02 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti pada total 604 komponen *cylinder head*. Dari jumlah tersebut, yang termasuk kategori *repair* sebanyak 55 komponen atau sekitar 7.37 % dan yang termasuk kategori *reject* sebanyak 8 komponen atau sekitar 1.07 %. Sementara itu untuk kondisi normal dilakukan pengamatan terhadap total 904 komponen *cylinder head*, yang termasuk kategori *repair* sebanyak 180 komponen atau sekitar 19.9 % dan kategori *reject* sebanyak 56 komponen atau sekitar 6.19 %.

Pada penambahan titanium dan stronsium tersebut tidak terlihat adanya hubungan antara proses pemudaran terhadap tingkat kegagalan komponen *cylinder head* hingga waktu tahan 120 menit. Didapatkan bahwa komponen yang *repair* ataupun *reject* terjadi pada waktu tahan yang berbeda. Sebagian komponen cacat terjadi pada waktu tahan yang singkat, dan sebagian lagi pada waktu yang cukup lama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa proses pemudaran tidak berpengaruh terhadap tingkat kegagalan *cylinder head* AC4B. Pemudaran pada penambahan stronsium dan titanium tersebut bisa terlihat pada perubahan struktur mikro yang nantinya mempengaruhi sifat mekanis *cylinder head* tersebut seperti kekuatan tarik, kekerasan dan fluiditas.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

1. Penambahan hingga 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada waktu tahan 0 menit telah meningkatkan fraksi volume porositas paduan aluminium AC4B dari 3 % menjadi 5 %. Setelah waktu tahan 120 menit, fraksi volume turun menjadi 4.5 %.
2. Penambahan hingga 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada waktu tahan 0 menit telah meningkatkan nilai UTS paduan aluminium AC4B sebesar 1.01 % dari 223.33 MPa menjadi 225.59 MPa. Sementara nilai elongasi mengalami penurunan dari 1.28 % menjadi 1.16 %. Setelah waktu tahan 120 menit, nilai UTS mengalami peningkatan sebesar 9.34 % menjadi 246.66 MPa.
3. Penambahan hingga 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada waktu tahan 0 menit telah meningkatkan nilai fluiditas paduan aluminium AC4B sebesar 47.13 % dari 40.1 cm menjadi 59 cm. Setelah waktu tahan 120 menit, fluiditas turun 43.9 % menjadi 41 cm.
4. Penambahan hingga 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada waktu tahan 10 menit telah meningkatkan kekerasan *cylinder head* AC4B *as-cast* sebesar 11.82 % dari 44.68 HRB menjadi 49.96 HRB pada bagian tipis, dan 9.19 % dari 43.98 HRB menjadi 48.02 HRB pada bagian tebal. Setelah waktu tahan 120 menit, nilai kekerasan mengalami penurunan sebesar 9.13 % menjadi 45.4 HRB untuk bagian tipis dan 7.46 % menjadi 44.4 HRB untuk bagian tebal.
5. Penambahan hingga 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada waktu tahan 10 menit telah menurunkan nilai DAS paduan AC4B sebesar 36.81 % dari 26.19  $\mu\text{m}$  menjadi 16.55  $\mu\text{m}$  untuk bagian tipis dan 27.89 % dari 32.81  $\mu\text{m}$  menjadi 23.66  $\mu\text{m}$  pada bagian tebal. Setelah waktu tahan 120 menit nilai DAS mengalami peningkatan sebesar 34.38 % menjadi 22.24  $\mu\text{m}$  untuk bagian tipis dan 19.7 % menjadi 28.32  $\mu\text{m}$  untuk bagian tebal.

6. Pada pengamatan SEM dan EDAX telah ditemukan unsur penginti  $\text{Al}_3\text{Ti}$ . Selain itu juga terdapat fasa intermetalik  $\beta\text{-Al(Fe,Mn)Si}$ ,  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Unsur Sr tidak ditemukan pada pengujian ini yang disebabkan oleh komposisi penambahan unsur modifikasi yang sedikit.
7. Pada pengamatan nilai kekerasan dan DAS paduan AC4B dengan kandungan 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr, fenomena pemudaran telah mulai terjadi setelah waktu tahan 10 menit, dan menjadi semakin cepat setelah waktu tahan 90 menit.
8. Fenomena pemudaran terjadi karena pengendapan senyawa  $\text{TiAl}_3$  pada bagian bawah dapur, oksidasi unsur modifikasi, serta kenaikan nilai *growth restriction factor* atau GRF paduan aluminium ACB4 tersebut.
9. Pada penelitian ini tidak ditemukan adanya interaksi antara penghalus butir dan unsur modifikasi.

## 5.2 Saran

1. Agar proses pengambilan sampel uji tarik, fluiditas, vakum, dan komponen dilakukan dalam dapur yang sama.
2. Kebersihan logam cair benar-benar dijaga dari keberadaan pengotor.
3. Melakukan pengamatan fenomena pemudaran selama waktu 1 kali *supply* pada mesin LPDC sehingga hubungan antara fenomena pemudaran dengan lamanya waktu proses pengecoran komponen dapat terlihat.

## DAFTAR PUSTAKA

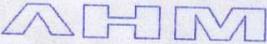
1. Gruzleski, John E., Bernard M. *The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys*. Illinois. The American Foundrymen's Society Inc, 1999.
2. Cook, Dr Ray. "*Grain Refinement of Aluminium-Silicon Foundry Alloys*". London & Scandinavian Metallurgical Co. Limited. 1998.
3. ASM Handbook. *Volume 15 : Casting*. ASM International : Metal Park, Ohio, 1988.
4. Cook, Dr Ray. "*Modification of Aluminium-Silicon Foundry Alloys*". London & Scandinavian Metallurgical Co. Limited. 1998.
5. *Section Manual Book Low Pressure Die Casting*. PT Astra Honda Motor.
6. Bambang, Suharno. Slide Kuliah Pengecoran Logam. Depok. Departemen Metalurgi dan Material. 2009.
7. Bambang, Suharno. Diktat Kuliah Pengecoran Aluminium. 2009. Depok. Departemen Metalurgi dan Material. 2009.
8. [http : //www.key-to-metals.com](http://www.key-to-metals.com). *Effect of Alloying Element*.
9. Guthy, Hema V. *Evoluiton of Eutectic Microstructure in Chemichally Modified and Unmodified Aluminium Silicon Alloys*. Worcester Polytechnic Institute. 2002
10. Jeyakumar, M et al. *Cooling Rate Effect on Microporosity and Primary Silicon Formation in Eutectic Aluminium-Silicon Alloy*. Non-Ferrous Technology Development Centre, Bangalore. 2007.
11. New Valley. (n.d). Aluminium Alloy. 2008.  
<<http://www.n-valley.com/Aluminum2.asp>>
12. MatWeb, Material Property Data. (n.d). Aluminum 333.0-F. *Permanent Mold Cast*.  
< [www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID](http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID)>
13. Bringas, John E. *Nonferrous Metals 4th Edition*. Kanada. CASTI Publishing. 2003.
14. [digilib.petra.ac.id/jiunkpe/s1/mesn/2002/jiunkpe-ns-s1-2002-24498018-469-casting\\_modulus-chapter2.pdf](http://digilib.petra.ac.id/jiunkpe/s1/mesn/2002/jiunkpe-ns-s1-2002-24498018-469-casting_modulus-chapter2.pdf).

15. Askeland, Donald R., Pradeep P. Phulé. *The Science and Engineering of Materials*, 4th ed (Chapter 8 – Principles of Solidification).
16. Surdia, T.Chijiwa K. *Teknik Pengecoran Logam*.Jakarta:Pradnya Paramita. 1991.
17. [http://images.google.co.id/url?source=imgres&ct=ref&q=http://www.ami.ac.uk/course/topics/0131\\_mb](http://images.google.co.id/url?source=imgres&ct=ref&q=http://www.ami.ac.uk/course/topics/0131_mb).
18. Campbell, John., Richard A. Harding. *TALAT Lecture 3204 The Freezing of Castings*.The University of Birmingham. 1994.
19. Apelian D., J.J A.Cheng. *Al-Si Processing Variables:Effect on Grain Refinement and Eutectic Modification*. Drexel University, Philadelphia.
20. Easton, Mark & StJohn, David. (1999). *Grain Refinement of Aluminum Alloys: Part I. The Nucleant and Solute Paradigms—A Review of the Literature*. Australia. University of Queensland.
21. Golbahar, Benham. *Effect of Grain Refiner-Modifier Interaction on the Performance of A356.2 Alloy*. Universite du Quebec a Chicoutimi. Canada. 2008.
22. Foseco. *Melt treatment of aluminium and aluminium alloys by Metal Treatment Station*.
23. Zlaticanin, Biljana et al.*The Effects Of Magnesium And Titanium Additions On The Microstructure And Properties Of As-Cast Al-5 % Cu Alloys*. University of Montenegro.The Faculty of Metallurgy and Technology. Serbia and Montenegro. 2003.
24. Easton, Mark & StJohn, David. *An Analysis of the Relationship between Grain Size, Solute Content, and the Potency and Number*. 2004.
25. Kaufman, J.Gilbert., Elwin L Rooy. *Aluminium Alloy Casting.Properties, Processes, and Applications*.ASM Interntional. 2005
26. Di Sabatino, Marisa. *Fluidity Of Aluminium Foundry Alloys*.Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Trondheim. 2005.
27. A.K. Prasada Rao, B.S. Murty b, M. Chakraborty. *Improvement in Tensile Strength and Load Bearing Capacity during Dry Wear of Al–7Si*

- Alloy by Combined Grain Refinement and Modification*. Indian Institute of Technology. India. 2004.
28. TMM 4180 Støperiteknikk. *Low pressure die-casting Aluminium wheels*. Gruppe 4 - Høsten. 2004.
29. [http://www.alumascprecision.co.uk/AVS\\_LowPressure.php](http://www.alumascprecision.co.uk/AVS_LowPressure.php)
30. Utomo, Budi. Six Sigma Project : Menurunkan *Reject Misrun* Sirip. *Low Pressure Die Casting* 1.2008. PT Astra Honda Motor.
31. Nafis, Shahrooz i. *Effects Of Grain Refining And Modification On The Microstructural Evolution Of Semi-Solid 356 Alloy*. University Of Quebec At Chicoutimi. 2006.
32. Basavakumar, K G., P G Mukunda, And M Chakraborty. *Effect of melt treatment on microstructure and impact properties of Al-7Si and Al-7Si-2.5Cu Cast Alloys*. Sri Bhagwan Mahavir Jain College of Engineering. Indian Institute of Technology. India. 2006.
33. R.Cook., P.S.Cooper, M.A.Kearns. *Benefits of Master Alloy Melt Treatments in Aluminium Foundry Industry*. London & Scandinavian Metallurgical Co. Limited.UK. 1996
34. C. Limmaneevichitr , W. Eidhed. *Fading mechanism of grain refinement of aluminum/silicon alloy with Al/Ti/B grain refiners*. University of Technology Thonburi.Thailand. 2002
35. Lesmana, Budi. Studi Pengaruh *Fading* Penambahan Grain Refiner 0.019 wt. % Ti terhadap Karakteristik Paduan AC4B Hasil LPDC. Depok. 2008.
36. Cook, Dr Ray., PS Cooper, M.A Kearns. *Benefit of master alloys melt treatments in the aluminium Foundry Industry*. South Yorkshire: London & Scandinavian Metallurgical Co. Limited. 1996
37. Birol, Yucel. *Al-Ti Grain refiner via powder metalurgyprocessing of Al/k2tif6/kbf4powderblend*.journal of alloys and coumpound.p311-314.
38. C.M. Dinnis et al. *The Influence of Strontium on Porosity Formation in Al-Si Alloys*. Metallurgical And Materials Transactions A. Volume 35a, November, 2004.

## Lampiran 1 : Hasil Pengujian Komposisi Kimia

 PT Astra Honda Motor Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Department	
LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA	
NAMA PART : SAMPLE MELTING	TGL PENGUJIAN : 02-Mar-09 7:52:05
NO PART / TYPE : SAMPLESBLM(LPDC 02/03/09)	STANDARD UJI : JIS H 5202
MATERIAL : AC4B (2008)	MESIN UJI : SPECTRO SHIMADZHU
SEKSI / SUB CON : LPDC	KETERANGAN : SHIFT 1
TEST KE : 1	
MELTING AC4B	
<u>ACTUAL</u>	<u>STANDARD QA AHM</u>
SI : 7.561	SI : 7.00 ~ 10.00
CU : 2.108	CU : 2.00 ~ 4.00
MG : 0.201	MG : 0.50 MAX
FE : 0.783	FE : 0.80 MAX
MN : 0.274	MN : 0.50 MAX
NI : 0.062	NI : 0.35 MAX
TI : 0.040	TI : 0.20 MAX
PB : 0.054	PB : 0.20 MAX
SN : 0.030	SN : 0.10 MAX
CR : 0.029	CR : 0.20 MAX
ZN : 0.579	ZN : 1.00 MAX
SR : 0.000	SR : -
<u>NOTE</u> - HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG - LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG	<u>KETERANGAN</u> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;">OK</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 5px auto;">DIBUAT</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 5px auto;">DIDI S</div>

 <b>PT Astra Honda Motor</b> Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Department			
<b>LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA</b>			
NAMA PART : SAMPLE MELTING NO PART / TYPE : SAMPLE: STLH ICHI(LPDC 02/03/09) MATERIAL : AC4B (2008) SEKSI / SUB CON : LPDC TEST KE : 1		TGL PENGUJIAN : 02-Mar-09 9:19:51 STANDARD UJI : JIS H 5202 MESIN UJI : SPECTRO SHIMADZHU KETERANGAN : SHIFT 1	
Jchi OK <b>MELTING AC4B</b>			
<u>ACTUAL</u>		<u>STANDARD QA AHM</u>	
<b>SI</b> :	7.883	<b>SI</b> :	7.00 ~ 10.00
<b>CU</b> :	2.336	<b>CU</b> :	2.00 ~ 4.00
<b>MG</b> :	0.174	<b>MG</b> :	0.50 MAX
<b>FE</b> :	0.925	<b>FE</b> :	0.80 MAX
<b>MN</b> :	0.295	<b>MN</b> :	0.50 MAX
<b>NI</b> :	0.071	<b>NI</b> :	0.35 MAX
<b>TI</b> :	0.123	<b>TI</b> :	0.20 MAX
<b>PB</b> :	0.062	<b>PB</b> :	0.20 MAX
<b>SN</b> :	0.041	<b>SN</b> :	0.10 MAX
<b>CR</b> :	0.036	<b>CR</b> :	0.20 MAX
<b>ZN</b> :	0.608	<b>ZN</b> :	1.00 MAX
<b>SR</b> :	0.003	<b>SR</b> :	-
<b>NOTE</b> - HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG - LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG			
			<b>KETERANGAN</b> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;">                     OK                 </div>
			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;">                     DIBUAT                 </div>
			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;">                     DIDI S                 </div>

 <p>PT Astra Honda Motor Measurement &amp; Laboratory Section Quality Assurance Support Departement</p>	
<p><b>LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA</b></p>	
<p>NAMA PART : SAMPLE MELTING NO PART / TYPE : SAMPLE ICHI AKHIR(LPDC 22/04/09 S1) MATERIAL : AC4B (2008) SEKSI / SUB CON : LPDC TEST KE : 1</p>	<p>TGL.PENGUJIAN : 22-Apr-09 11:04:20 STANDARD UJI : HES-C-101-99 MESIN UJI : SPECTRO SHIMADZHU KETERANGAN : SHIFT 1</p>
<p>MELTING AC4B</p>	
<p>ACTUAL</p>	<p>STANDARD QA AHM</p>
<p>SI : 9.031 CU : 2.322 MG : 0.158 FE : 0.727 MN : 0.253 NI : 0.052 TI : 0.105 PB : 0.058 SN : 0.036 CR : 0.028 ZN : 0.652 SR : 0.002</p>	<p>SI : 7.00 - 10.00 CU : 2.00 - 4.00 MG : 0.50 MAX FE : 0.80 MAX MN : 0.50 MAX NI : 0.35 MAX TI : 0.20 MAX PB : 0.20 MAX SN : 0.10 MAX CR : 0.20 MAX ZN : 1.00 MAX SR : 0.002</p>
<p>NOTE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG</li> <li>- LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TESTING</li> </ul>	
<p>KETERANGAN</p> 	
<p>DIDI S</p>	

## Lampiran 2 : Hasil Pengujian Kekerasan

Waktu Tahan	Bagian	Nilai HRB					Rata-rata	Standar Deviasi
		1	2	3	4	5		
10	Tipis	52.3	49.8	50.5	49.8	47.4	49.96	1.758692696
	Tebal	48.3	45.4	47.5	49.5	49.4	48.02	1.68136849
20	Tipis	49.4	51.5	48.9	49.5	49.6	49.78	0.998498873
	Tebal	48.1	47.6	47.3	48.6	48.4	48	0.543139025
30	Tipis	50.1	49	49.6	49.8	49	49.5	0.489897949
	Tebal	49.4	47.8	46.3	47.2	49	47.94	1.275931033
40	Tipis	49.1	50.6	49.3	48.4	49.5	49.38	0.798122798
	Tebal	49.1	47.5	48.3	47.4	47.2	47.9	0.790569415
50	Tipis	48.9	48.7	50.5	47.6	49.2	48.98	1.042592922
	Tebal	46.2	47.4	49.2	48.4	47.4	47.72	1.136661779
60	Tipis	47.8	50.1	49.6	48.1	48.5	48.82	0.988433103
	Tebal	47.5	46.6	48.9	48.5	46.8	47.66	1.016366076
90	Tipis	47.8	48.5	48.8	47.6	48.6	48.26	0.527257053
	Tebal	47.9	46.5	46.2	46.8	48.1	47.1	0.851469318
120	Tipis	48.5	44	47.7	42.5	44.3	45.4	2.572936066
	Tebal	42.4	43.4	46.4	44.5	45.5	44.44	1.597811003

## Lampiran 3 : Hasil Pengukuran DAS

Bagian	Waktu Tahan	DAS(mm)																														Rata-rata	DAS ( $\mu\text{m}$ )	STDEV
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
Tipis	10	2	2.5	2	2	2.5	2	2.5	2	1.5	2	2	2	2	1.5	2	1.5	2	2	1.5	2.5	3	2	2.5	2.5	3	2.5	2.5	2	2	2.13333333	16.55168	0.392458	
	20	2.5	2	2.5	2	2	1.5	2.5	2	2	1.5	2	1.5	2	2	2.5	2.5	2	3	1.5	2.5	2.5	2	1.5	2	2.5	3	2.5	2.5	3	1.5	2.16666667	16.8103	0.461133
	30	2	2.5	2	2	2.5	2	2.5	2	2.5	2	2.5	2	1.5	1.5	2.5	2	1.5	2	2	1.5	2	2.5	2.5	2	3	3	3	2	2	2.18333333	16.93961	0.425144	
	40	2	2.5	2	2	2.5	2	2.5	2	1.5	2	2	2	2	2	3	2.5	2.5	2	2.5	2	2	2	2	2.5	2.5	2	3	2.5	2.5	2	2.21666667	17.19823	0.339455
	50	2	2.5	2	2	2.5	2	2.5	2	1.5	2	2.5	2	3	2.5	3	3	3	3	2	1.5	2	2.5	2.5	2	2	2	2	2.5	1.5	2	2.25	17.45685	0.450096
	60	3	2.5	2.5	2	2.5	1.5	2.5	2	2	2.5	2	2	2	2	2	2	2.5	1.5	2	2.5	3.5	3	2.5	3	1.5	2	2	3	2.5	2.5	2.3	17.84478	0.484234
	90	2.5	2.5	2.5	2	2	2	2.5	2.5	2.5	2	2	2.5	2	2.5	2	2.5	2	2	2.5	2.5	3	2	2.5	1.5	3	2	3	3.5	3.5	2	2.38333333	18.49133	0.46763
	120	3	2	2	2	2.5	2	3.5	4.5	2.5	3	3	2.5	3.5	3.5	2.5	3.5	3.5	3.5	3	3.5	3	2.5	3	3	3	3	2	2	2.5	3	2.86666667	22.24132	0.614948
Tebal	10	3.5	3.5	3.5	2.5	3.5	4	2.5	4	3.5	2.5	2.5	3	2.5	2.5	3	2.5	3	2	2	2.5	3	4	3	3	3	3	3.5	4	3.5	3.05	23.66373	0.577599	
	20	3	4	4	2	3.5	3.5	3	4	3	2.5	2	2.5	2	2.5	3.5	3.5	3.5	2.5	2.5	2	2	3	3.5	3.5	3	3.5	3.5	4	3.5	4	3.08333333	23.92235	0.68334
	30	3.5	3.5	3.5	2.5	3	4	2.5	4	3	2.5	3	3	2.5	2.5	3	2.5	3	3	3	3	4	4	3.5	3.5	2	2.5	3	4	3.5	3	3.11666667	24.18097	0.552164
	40	4	4	3.5	3	3	4	3.5	4.5	3.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	2	2.5	2.5	3	3.5	3.5	2.5	2.5	4	4	4	3.5	3	3.13333333	24.31028	0.668675
	50	4	4	4	3	2.5	4	2.5	4.5	3.5	3	3	3	2.5	2	2.5	2.5	4	2	2.5	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5	3	3.5	4	3.5	4	3	3.18333333	24.69821	0.688368
	60	2.5	3	3.5	2.5	4	3.5	3	4	3.5	3	2.5	4	3.5	3	2.5	3.5	2.5	3	2.5	4.5	3	2	3.5	4	3	3.5	2.5	4	3	5	3.25	25.21545	0.6917
	70	4.5	3.5	3.5	3	4.5	3.5	3.5	3.5	4	3.5	3.5	3	5	3.5	2.5	3.5	2	3	2	3.5	3	2	3.5	3.5	2.5	3.5	3.5	3	3	3.5	3.31666667	25.73269	0.688368
	120	3	5	3	3	3	4.5	3.5	3	3	2.5	3	3.5	4	4.5	3.5	3.5	3	3	3.5	4.5	3.5	4	4.5	5	3.5	4.5	5	3.5	3.5	3	3.65	28.31889	0.720991

### Lampiran 4 : Hasil Pengujian Tarik

#### a. Nilai UTS

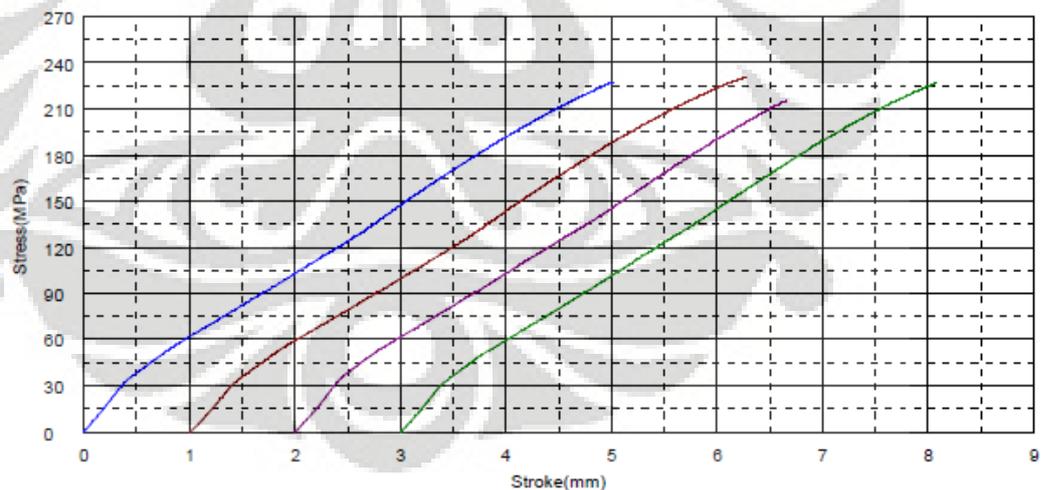
Kondisi	Sampel			Rata-rata (MPa)
	1	2	3	
Normal	227.791	215.431	226.765	223.329
Penambahan 0 jam	237.249	221.256	218.277	225.594
Penambahan 1 jam	232.746*	241.268	245.107	243.1875
Penambahan 2 jam	242.371	244.151	254.069*	243.261

#### b. Nilai Elongasi

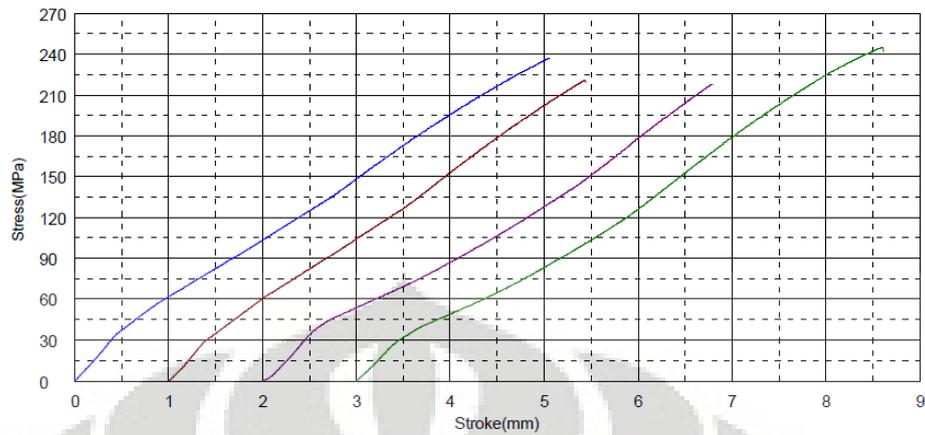
Kondisi	Sampel			Rata-rata (%)
	1	2	3	
Normal	2.18	1.6	0*	1.89
Penambahan 0 jam	1.84	1.64	0*	1.74
Penambahan 1 jam	0.88*	1.36	2.9	2.13
Penambahan 2 jam	1	2	2.88*	1.5

\*tidak diikutsertakan dalam perhitungan

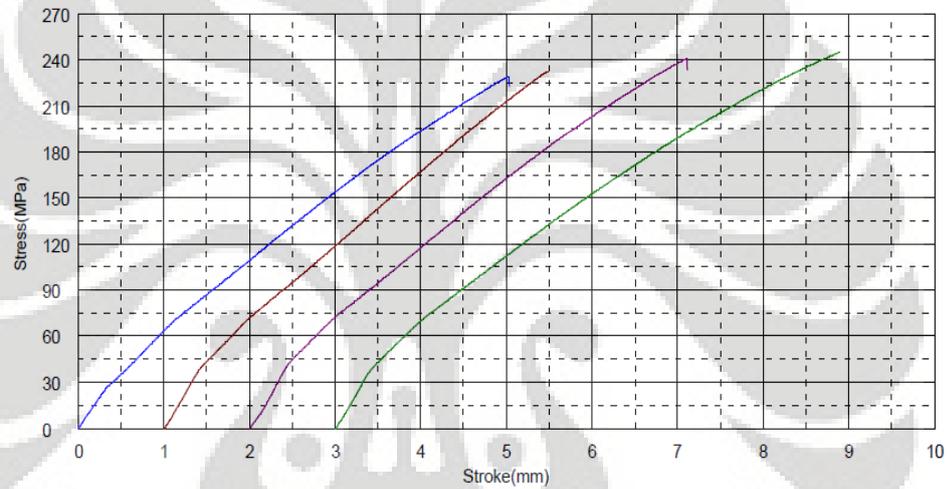
**Grafik Hasil Uji Tarik Sampel Normal**



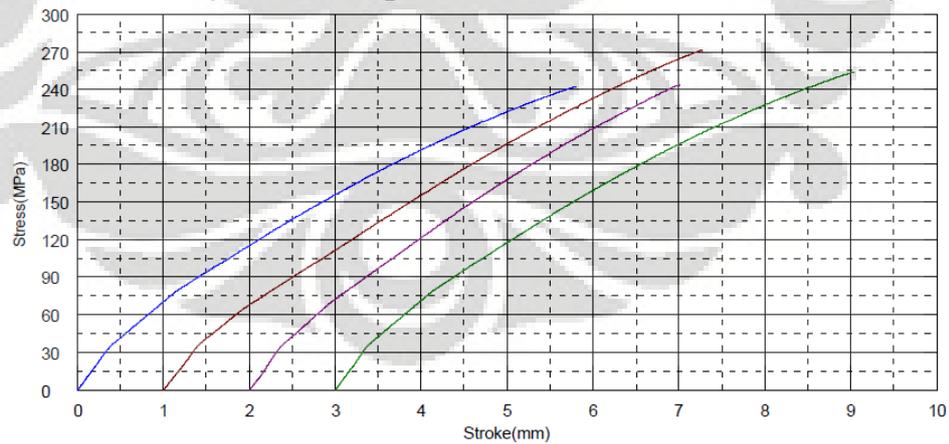
### Grafik Hasil Uji Tarik Sampel setelah Penambahan Ti dan Sr 0 jam



### Grafik Hasil Uji Tarik Sampel setelah Penambahan Ti dan Sr 1 jam



### Grafik Hasil Uji Tarik Sampel setelah Penambahan Ti dan Sr 2 jam



### Lampiran 5 : Hasil Pengujian Fluiditas

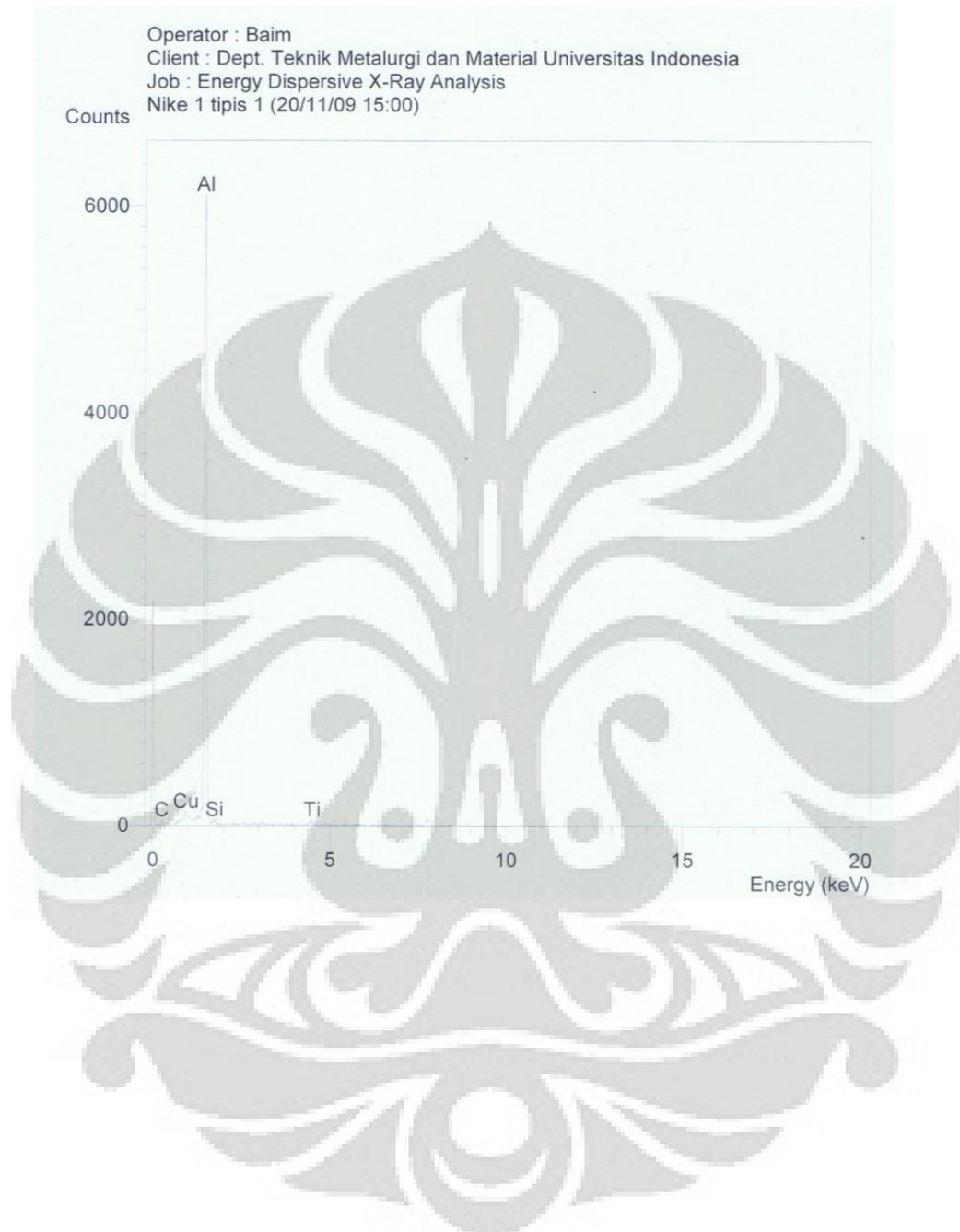
Kondisi	Fluiditas (cm)					Rata-rata	Standar Deviasi
	1	2	3	4	5		
Normal	38.5	48	43	36.5	34.5	40.1	5.424481542
Setelah Penambahan 0 jam	62	61	58	61.5	52.5	59	3.952847075
Setelah Penambahan 1 jam	45.5	44	41.5	46	44.5	44.3	1.753567792
Setelah Penambahan 2 jam	41	42.5	41.5	38	42	41	1.767766953

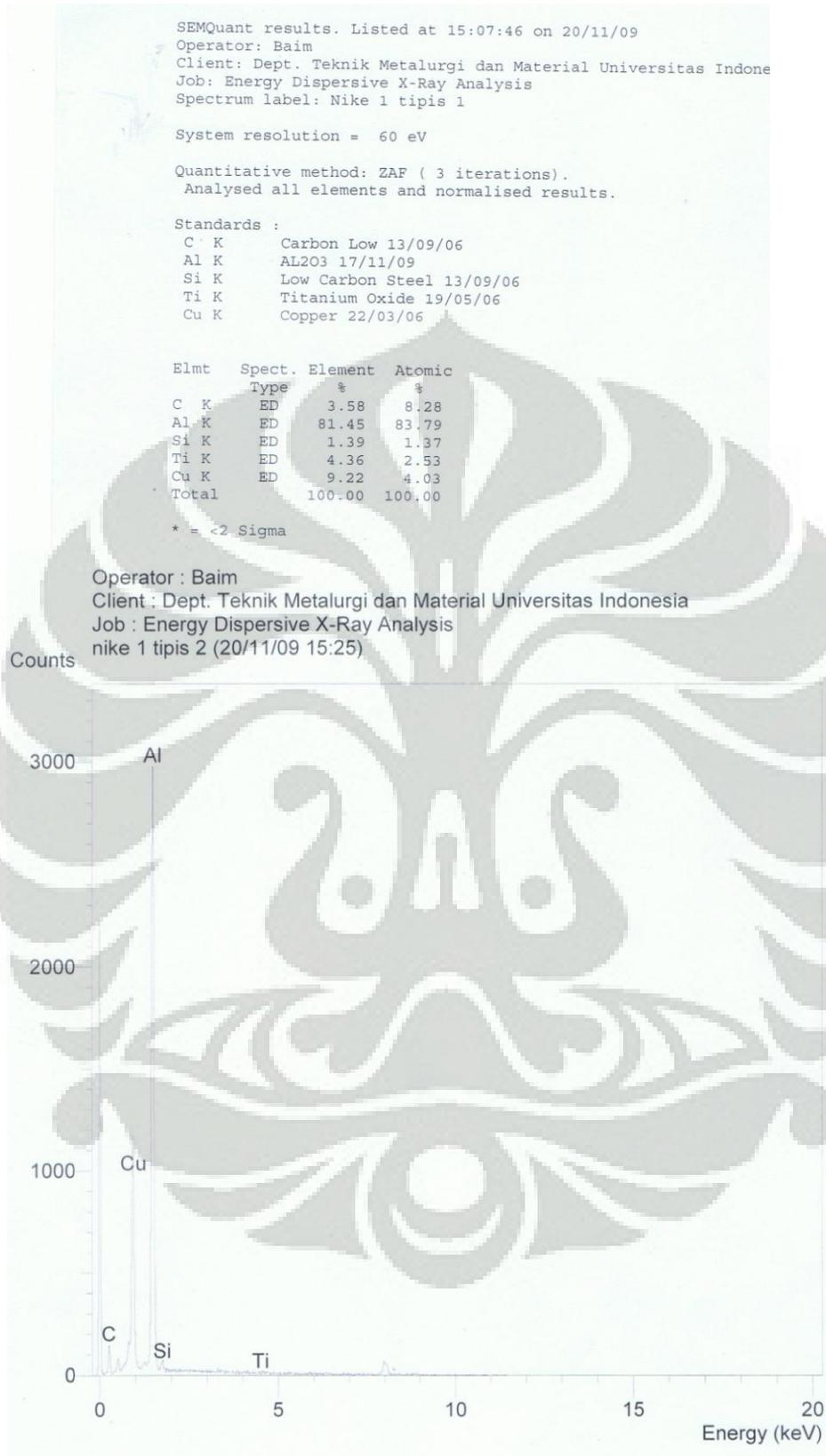


## Lampiran 6 : Check Sheet

No Shot	No. Dies	Temp. Dies (°C)		Temp. LPDC (°C)		P (KPa)	t (s)	Marking	Cacat LPDC	Repair LPDC	Waktu Tahan (menit)
		Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
1	F#1		304	707	704	250	177	D1			10
	F#2										
2	F#1		309	705	747	250		D2		Ms Upper	20
	F#2										
3	F#1		323	706	750	250	177	D3			30
	F#2										
4	F#1		340	705	760	250	177	D4			
	F#2										
5	F#1		349	707	756	250	177	D5		Ms.Sirip	40
	F#2										
6	F#1		353	708	760	250	177	D6			
	F#2										
7	F#1		357	708	756	250	177	D7			50
	F#2										
8	F#1		358	709	769	250	177	D8			
	F#2										
9	F#1		359	710	750	250	177	D9			60
	F#2										
10	F#1		362	711	764	250	177	D10			
	F#2										
11	F#1		360	712	758	250	177	D11			
	F#2										
12	F#1		374	711	757	250	177	D12			
	F#2										
13	F#1		371	712	760	250	177	D13			
	F#2										

14	F#1		391	713	760	256	177	D14			
	F#2										
15	F#1		382	712	754	256	177	D15			
	F#2										
16	F#1		380	712	754	256	177	D16			90
	F#2										
17	F#1		381	712	754	256	177	D17			
	F#2										
18	F#1		379	713	754	256	177	D18			
	F#2										
19	F#1		385	715	752	256	177	D19			
	F#2										
20	F#1		379	713	755	256	177	D20			
	F#2										
21	F#1		387	712	748	256	177	D21			
	F#2										
22	F#1		386	713	751	256	177	D22			120
	F#2										

**Lampiran 7 : Hasil SEM EDAX**



SEMQuant results. Listed at 15:26:33 on 20/11/09  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: nike 1 tipis 2

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

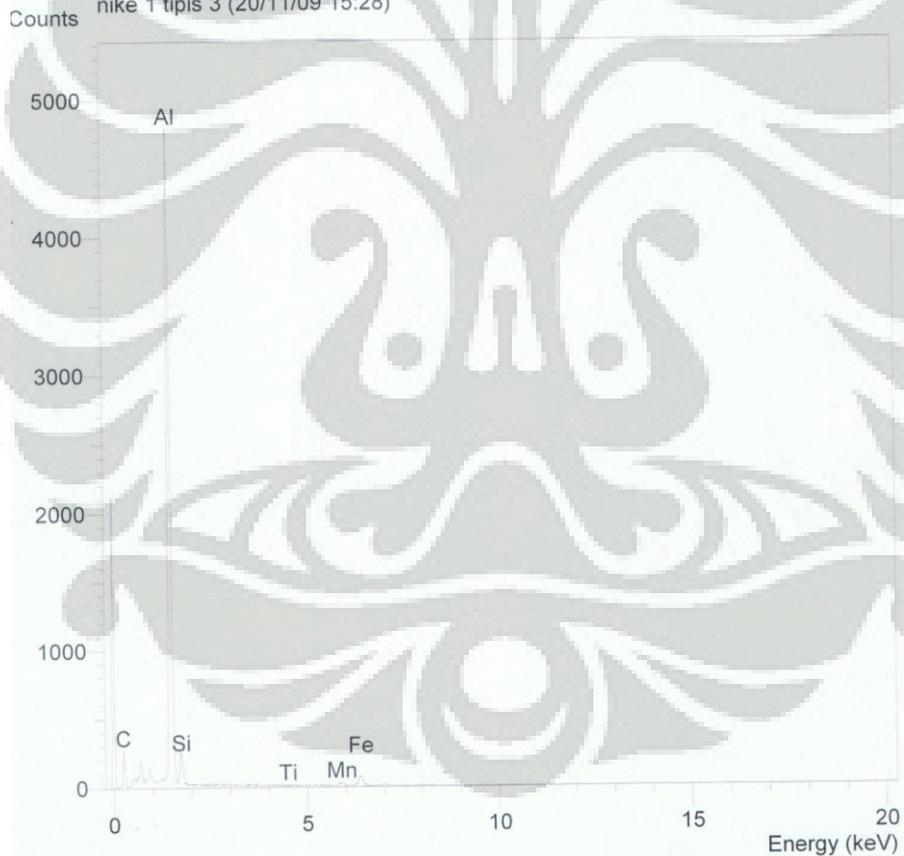
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K AL203 17/11/09  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	2.07	6.81
Al K	ED	37.69	55.22
Si K	ED	0.63	0.88
Cu K	ED	59.61	37.09
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

Operator : Baim  
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 nike 1 tipis 3 (20/11/09 15:28)



SEMQuant results. Listed at 15:31:46 on 20/11/09  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: nike 1 tipis 3

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

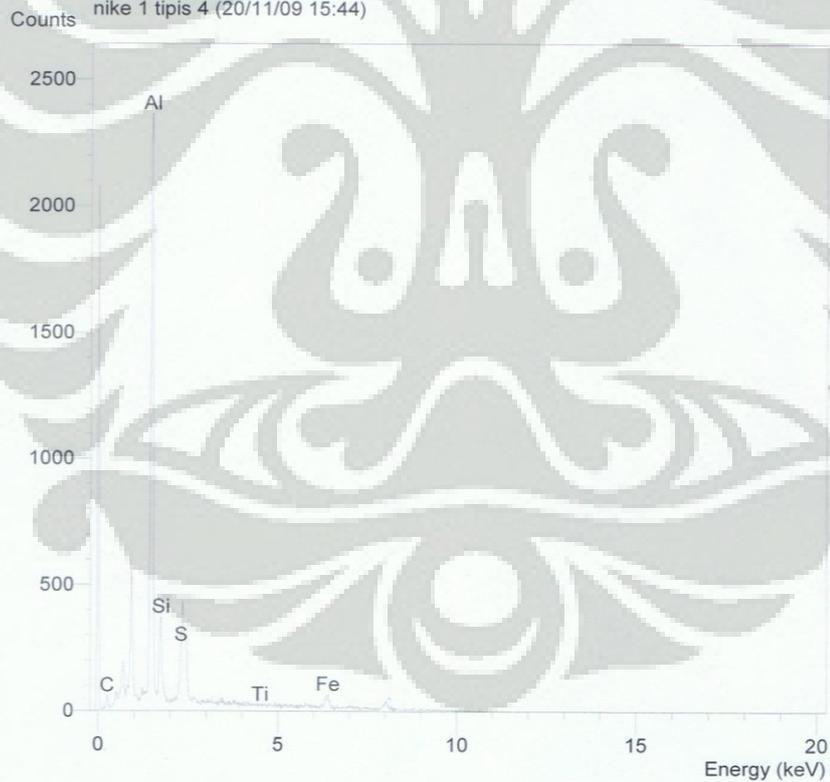
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K AL203 17/11/09  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 Mn K Mangan 02 13/09/06  
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	5.38	12.74
Al K	ED	67.72	71.38
Si K	ED	4.26	4.32
Mn K	ED	5.18	2.68
Fe K	ED	17.45	8.89
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

Operator : Baim  
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 nike 1 tipis 4 (20/11/09 15:44)



SEMQuant results. Listed at 15:48:29 on 20/11/09  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: nike 1 tipis 4

System resolution = 61 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

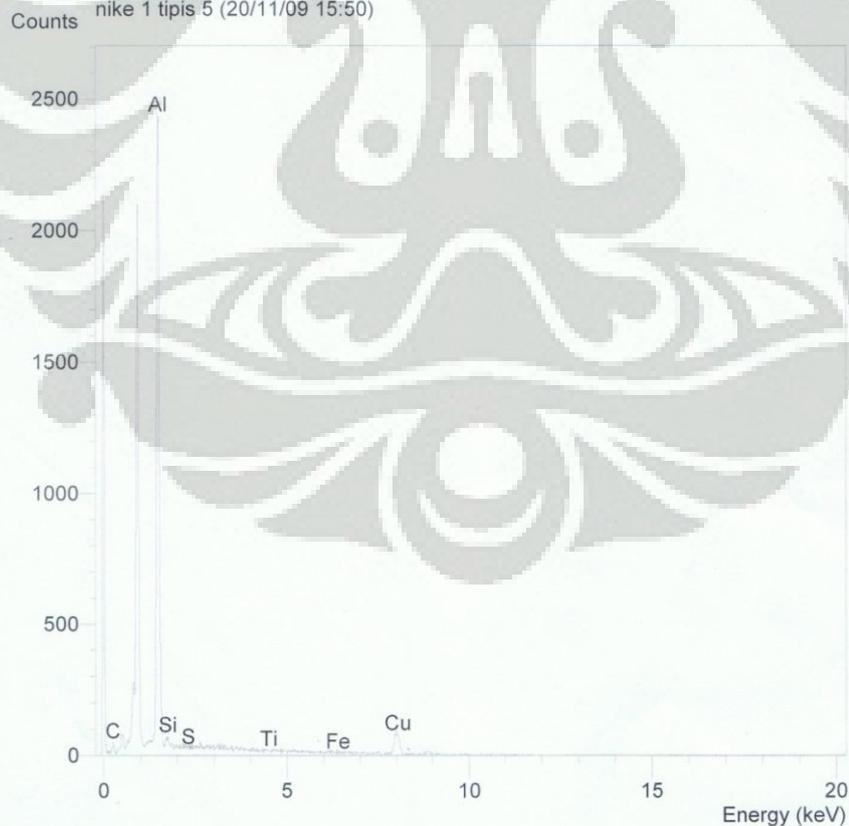
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K AL2O3 17/11/09  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 S K FeS2 22/03/06  
 Fe K FeS2 22/03/06  
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	2.81	8.24
Al K	ED	42.30	55.25
Si K	ED	4.78	5.99
S K	ED	3.58	3.93
Fe K	ED	10.16	6.41
Cu K	ED	36.37	20.17
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

Operator : Baim  
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 nike 1 tipis 5 (20/11/09 15:50)



SEMQuant results. Listed at 15:53:00 on 20/11/09  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: nike 1 tipis 5

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

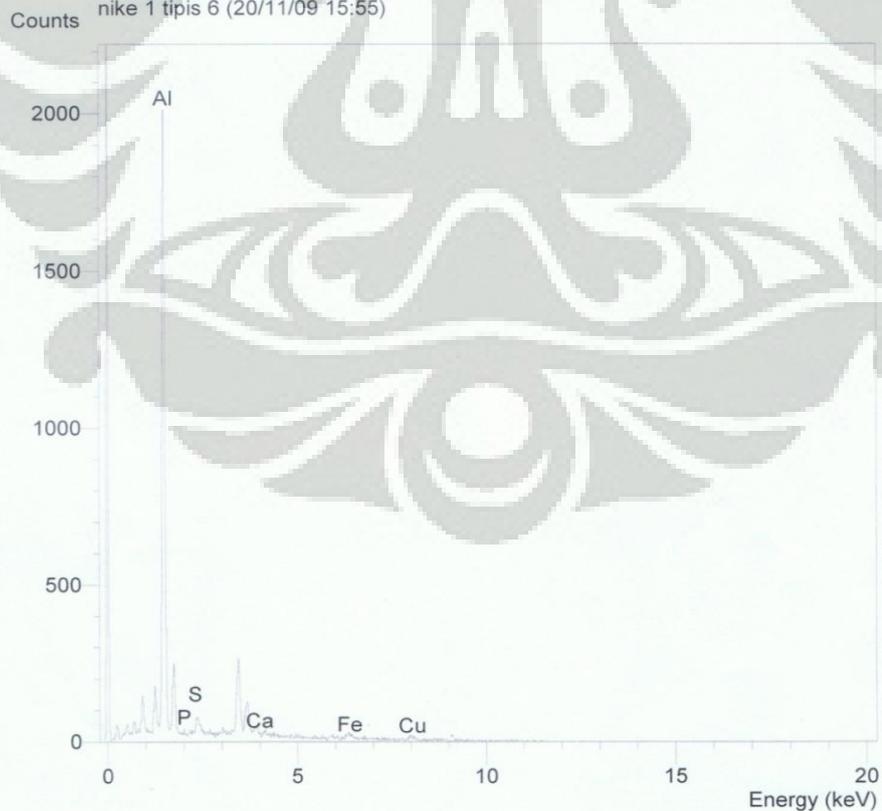
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K AL2O3 17/11/09  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.21	4.42
Al K	ED	28.49	46.48
Si K	ED	0.45	0.70
Cu K	ED	69.86	48.40
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

Operator : Baim  
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 nike 1 tipis 6 (20/11/09 15:55)



SEMQuant results. Listed at 16:08:34 on 20/11/09  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: nike 1 tipis 6

System resolution = 60 eV

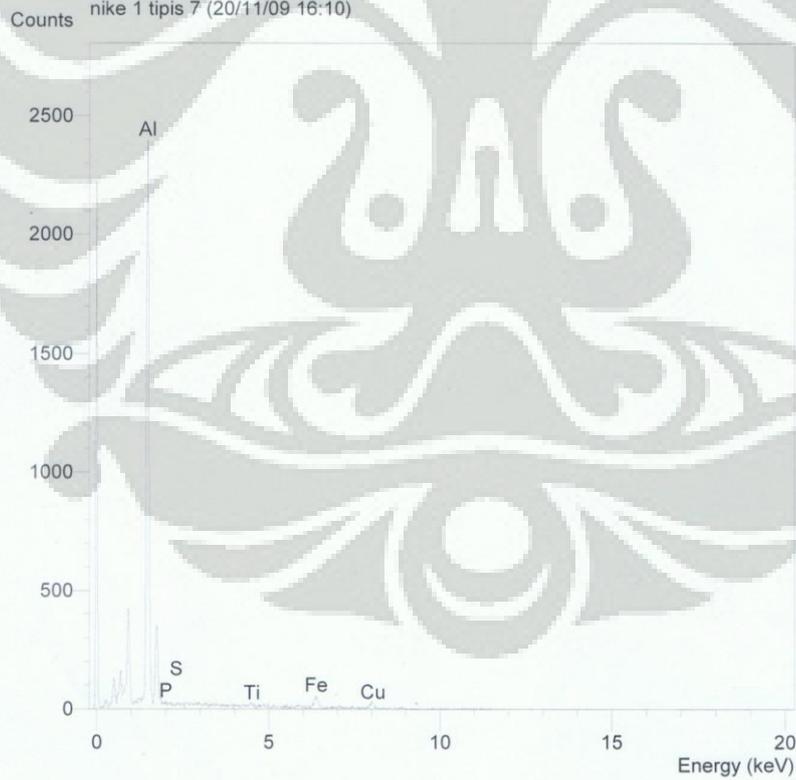
Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

Standards :  
 C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K AL2O3 17/11/09  
 P K GaP 22/03/06  
 Ca K Orthoclase 22/03/06  
 Fe K FeS2 22/03/06  
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	4.04	11.05
Al K	ED	49.61	60.35
P K	ED	2.70	2.87
Ca K	ED	9.43	7.72
Fe K	ED	4.66	2.74
Cu K	ED	29.56	15.27
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

Operator : Baim  
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 nike 1 tipis 7 (20/11/09 16:10)



SEMQuant results. Listed at 16:14:30 on 20/11/09  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: nike 1 tipis 7

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

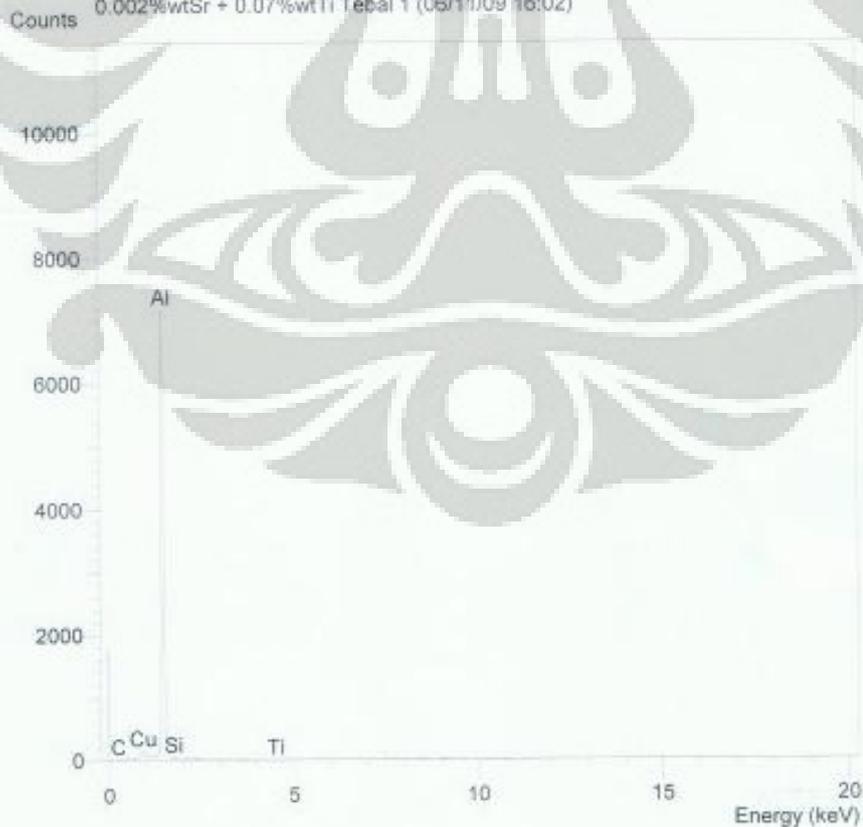
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K AL203 17/11/09  
 P K GaP 22/03/06  
 Ti K Titanium Oxide 19/05/06  
 Fe K FeS2 22/03/06  
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	2.81	8.37
Al K	ED	45.20	59.99
P K	ED	2.28	2.63
Ti K	ED	1.21	0.90
Fe K	ED	9.87	6.33
Cu K	ED	38.63	21.77
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

Operator : Baim  
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label : 0.002%wtSr + 0.07%wtTi Tebal 1 (06/11/09 16:02)



SEMQuant results. Listed at 16:03:50 on 06/11/09  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0.002%wtSr + 0.07%wtTi Tebal 1

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations)  
 Analysed all elements and normalized results.

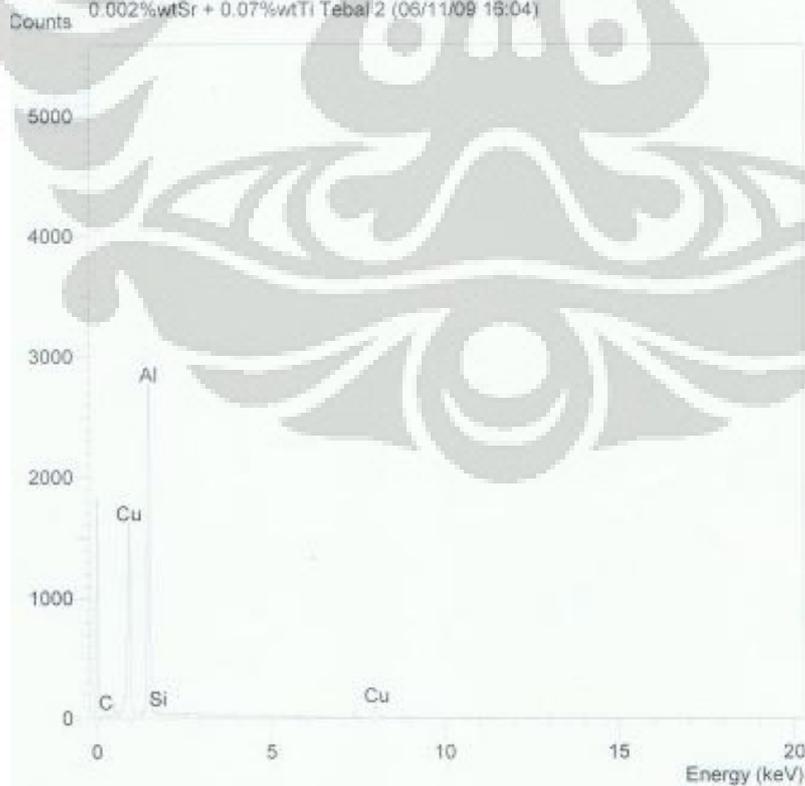
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 11/09/06  
 Ti K Titanium Oxide 19/05/06  
 Cu K Copper 22/03/06

Elint	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	2.59	5.95
Al K	ED	86.10	89.35
Si K	ED	1.13	1.31
Ti K	ED	0.98	0.57
Cu K	ED	8.80	3.83
Total		100.00	100.00

\* = <2 sigma

Operator : Baim  
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 0.002%wtSr + 0.07%wtTi Tebal 2 (06/11/09 16:04)



SEMQuant results, Listed at 16:05:51 on 06/11/09  
Operator: Bain  
Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
Spectrum label: 0.0024wtSr + 0.074wtTi Tebal 2

System resolution = 60 eV

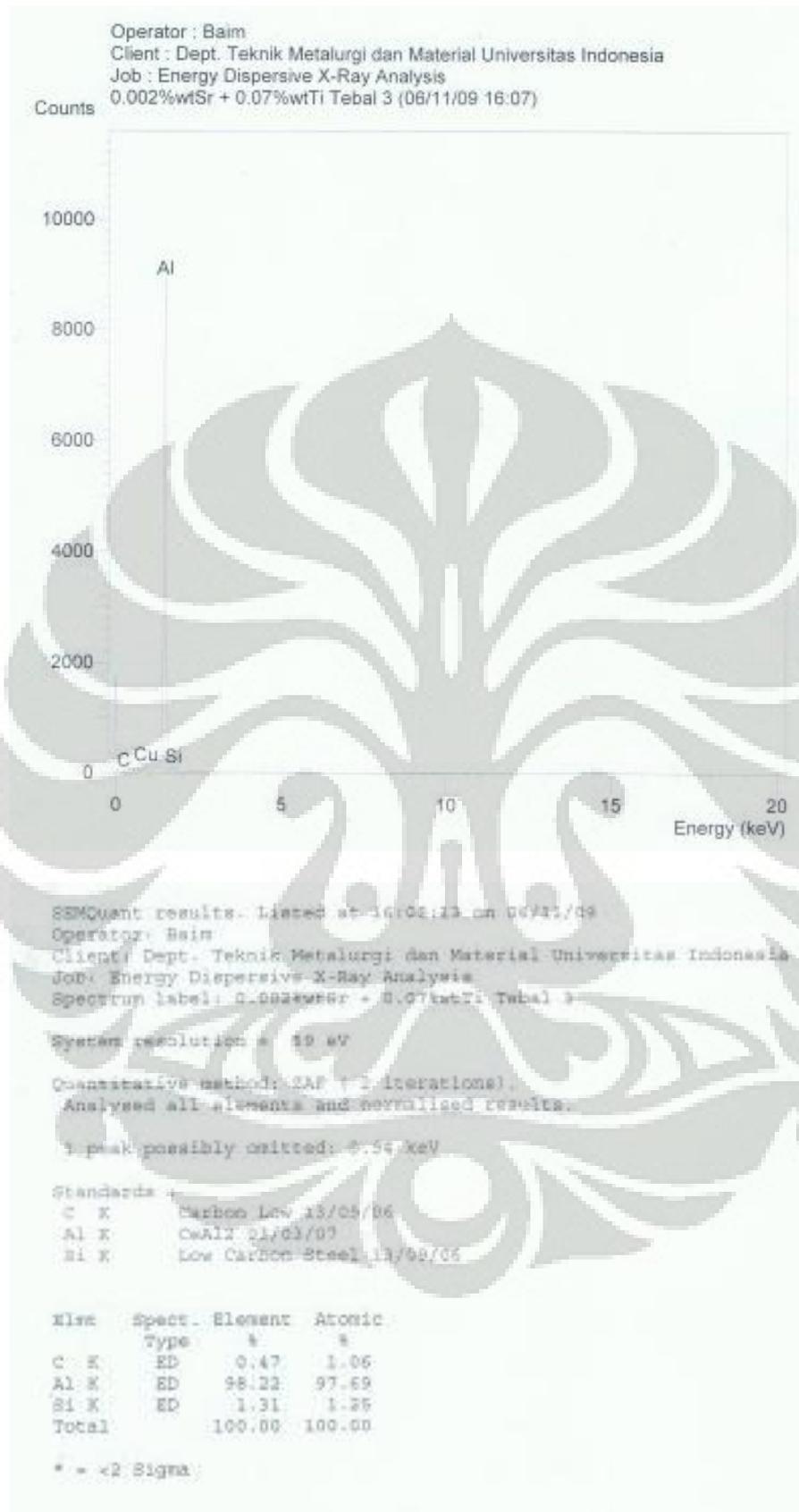
Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
Analysed all elements and normalised results.

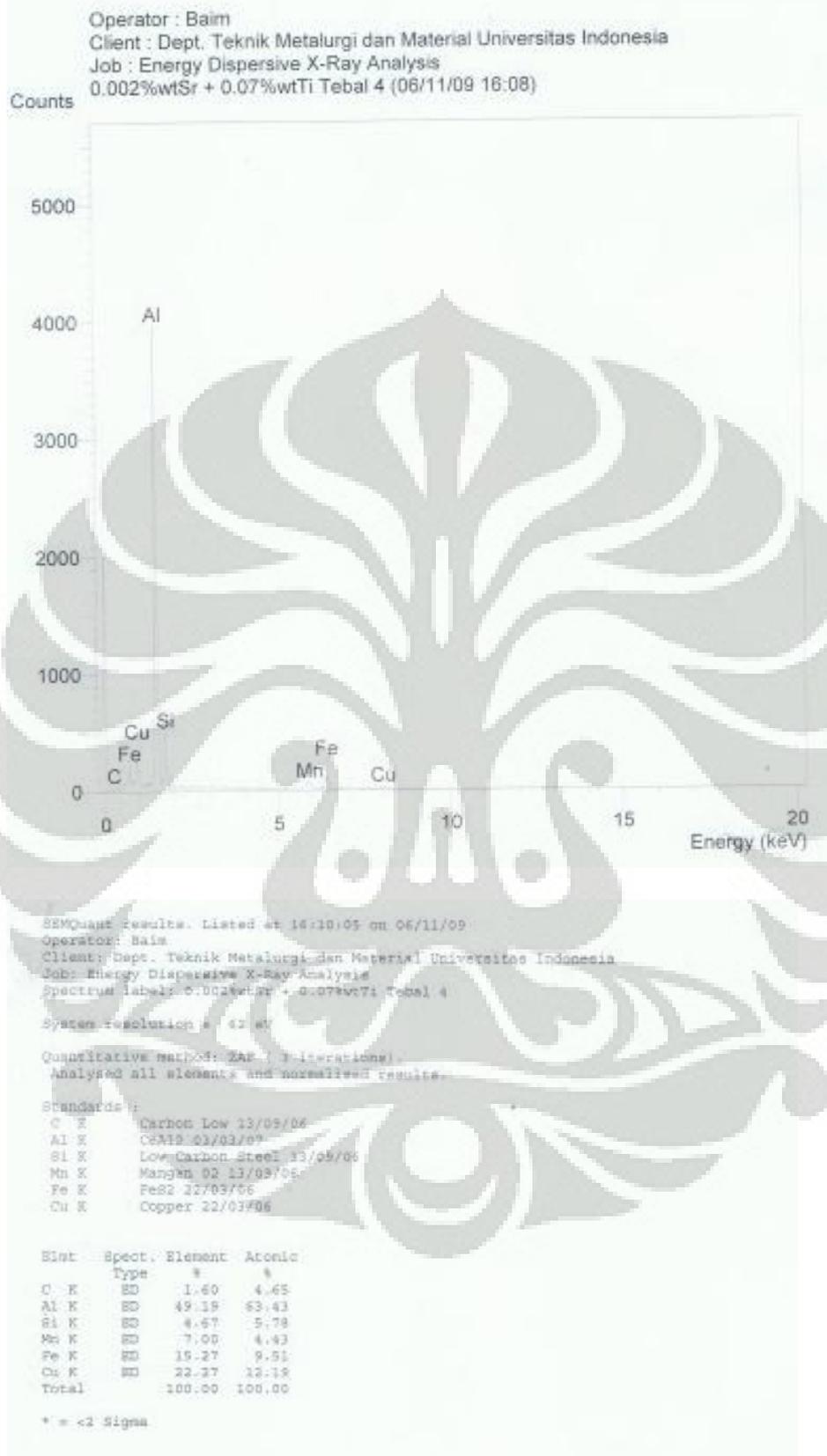
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
Al K CeAl3 01/03/07  
Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
Cu K Copper 22/01/06

Elst	Spect	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	1.01	3.54
Al K	ED	30.67	49.35
Si K	ED	0.36	0.56
Cu K	ED	67.97	46.45
Total		100.00	100.00

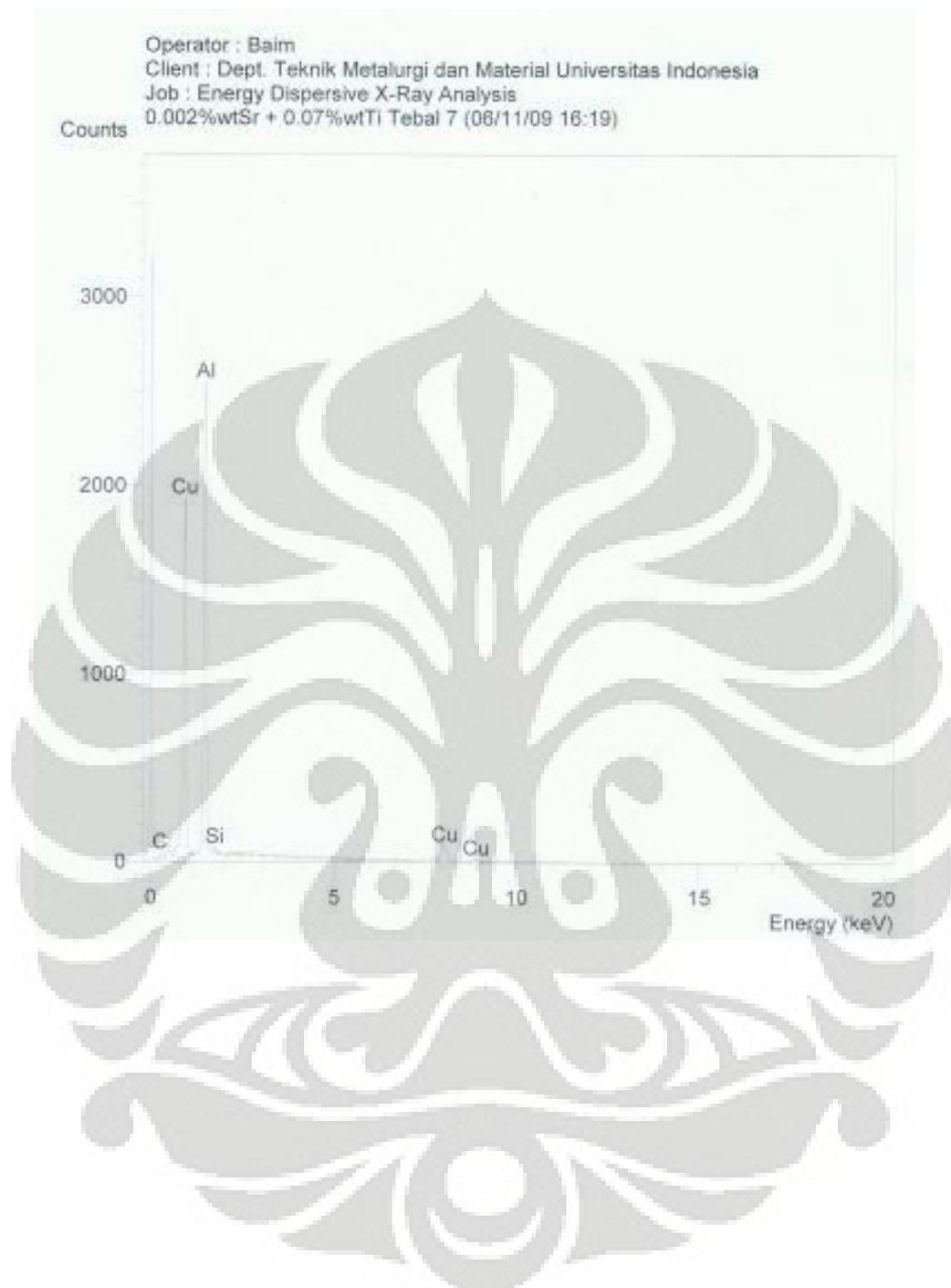
\* = <2 Sigma











Lampiran 8 : Hasil Pengujian XRD

