



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI  
0.02 wt. % Sr DAN 0.063, 0.083 DAN 0.108 wt. % Ti  
TERHADAP KARAKTERISTIK PADUAN ALUMINIUM AC4B  
HASIL PROSES *LOW PRESSURE DIE CASTING* (LPDC)**

**SKRIPSI**

**MOHAMMAD AZI FALLAH  
0606075044**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI  
0.02 wt. % Sr DAN 0.063, 0.083 DAN 0.108 wt. % Ti  
TERHADAP KARAKTERISTIK PADUAN ALUMINIUM AC4B  
HASIL PROSES *LOW PRESSURE DIE CASTING* (LPDC)**

**SKRIPSI**

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

**MOHAMMAD AZI FALLAH  
0606075044**

**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.**

**Mohammad Azi Fallah**

**0606075044**

**30 Desember 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Mohammad Azi Fallah  
NPM : 0606075044  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. %  
Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Karakteristik Paduan Aluminium  
AC4B Hasil Proses *Low Pressure Die Casting* (LPDC)

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 : Dwi Martha Nurjaya S.T, M.T (.....)  
Penguji 2 : Andika Pria Hutama, ST (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Desember 2009

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi 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 yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (3) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan baik moral maupun material; dan
- (4) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 30 Desember 2009

Penulis

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

---

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

Nama : Mohammad Azi Fallah  
NPM : 0606075044  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Karakteristik Paduan Aluminium AC4B Hasil Proses *Low Pressure Die Casting* (LPDC)**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Dibuat di: Depok  
Pada tanggal: 30 Desember 2009  
Yang menyatakan

(Mohammad Azi Fallah)

## ABSTRAK

Nama : Mohammad Azi Fallah  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Karakteristik Paduan Aluminium AC4B Hasil Proses *Low Pressure Die Casting*

Paduan aluminium tuang AC4B merupakan jenis material yang paling banyak digunakan sebagai bahan baku pada industri otomotif dikarenakan oleh sifatnya yang cukup baik. Akan tetapi, tingkat kegagalan akibat cacat pada hasil komponen proses LPDC cukup tinggi. Penambahan penghalus butir dan *modifier* menyebabkan pendinginan lebih terkontrol sehingga butir-butir menjadi lebih halus dan sifat mekanis logam menjadi lebih baik serta dapat memodifikasi struktur silikon eutektik pada fasa Al-Si dari *acicular* menjadi *fibrous* sehingga dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan UTS (*Ultimate Tensile Strength*), fluiditas, keuletan, kekuatan dampak dan sifat mampu mesin dari produk hasil pengecoran.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan kombinasi *modifier* pada komposisi 0.02 wt. % Sr dan penghalus butir pada komposisi 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap sifat mekanik, mampu alir, distribusi porositas pada paduan aluminium AC4B. Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian untuk mempelajari pengaruh kombinasi antara keduanya seperti pengujian kekerasan (menggunakan metode HRB, dengan pengambilan sampel uji pada daerah tipis dan tebal), uji tarik (sesuai standar ASTM E-18), uji fluiditas (pengukuran terhadap panjang fluiditas), uji vakuum (perhitungan terhadap fraksi volume porositas sesuai dengan standar ASTM E-562) dan pengamatan metalografi untuk pengukuran nilai DAS (*Dendrite Arm Spacing*) pada daerah tipis dan tebal serta pengamatan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray Analysis* (EDAX) untuk mengetahui jenis fasa yang terbentuk.

Pada kombinasi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr akan didapatkan nilai kekerasan maksimum sebesar 52.47 HRB untuk sampel tipis dan 51.3 HRB untuk sampel tebal, nilai UTS maksimum sebesar 251.105 MPa. Nilai elongasi maksimum didapatkan pada komposisi 0.083 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr sebesar 2.3 %. Nilai fluiditas minimum didapatkan pada komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr sebesar 63.360 cm. Fraksi volume porositas maksimum dimiliki oleh komposisi 0.63 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr sebesar 16 %. Sedangkan nilai DAS minimum dimiliki oleh komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.108 wt. % Sr sebesar 13.39  $\mu\text{m}$  untuk daerah tipis dan 27.20  $\mu\text{m}$  untuk daerah tebal.

### **Kata kunci :**

Penghalus butir, *modifier*, kombinasi, AC4B, aluminium, LPDC

## ABSTRACT

Name : Mohammad Azi Fallah  
Major : Metallurgy and Materials Engineering  
Tittle : Effect of Combination of Composition of 0.02 wt. % Sr and 0.063, 0.083 and 0.108 wt. % Ti in Aluminium AC4B Alloy Produced by Low Pressure Die Casting (LPDC)

Aluminium AC4B is widely used for otomotive industries because of its applicable. However, when this alloy is used to produce cylinder head by LPDC process, high reject rate if often found due to shrinkage, porosity and misrun. Addition of grain refiner and modifier is an alternative for this problem, because they can control solidification process so that refining the grains and improving mechanical properties. Aside from that, silicon phase is modified into fibrous, so that increasing the UTS, fluidity, ductility, impact strength, and machinability.

This study was aimed to study the effect of combination of 0.02 wt. % Sr modifier and grain refiner addition of 0.063, 0.083 and 0.108 wt. % Ti to mechanical properties, fluidity, porosity distribution of AC4B aluminium alloy. A series of test was done such as hardness test (HRB method and samples were taken from thin and thick regions of the part), tensile test (in accordance to ASTM E-18), fluidity test by spiral method, vacuum test measurement of porosity fraction in accordance to ASTM E-562 and quantitative metalograpy to measure the size of DAS (Dendrite Arm Spacing) in thick and thin regions. Besides that, determination of phase was conducted by using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDAX).

At a combination level of 0.108 wt. % Ti and 0.02 wt. % Sr, the maximum values of hardness test for thick and thin regions are 51.3 and 52.47 HRB, while the UTS was 251.105 MPa and the minimum level of fluidity of 63.36 cm with size of DAS for thick and thin regions of 27.2 and 13.39 cm.

### Key words :

Grain refiner, modifier, combination, AC4B, aluminium, LPDC

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 LATAR BELAKANG PENELITIAN .....	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN.....	2
1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN.....	3
1.3.1 Material Penelitian .....	3
1.3.2 Parameter Penelitian.....	3
1.4 MANFAAT PENELITIAN.....	4
<b>BAB 2 STUDI LITERATUR .....</b>	<b>5</b>
2.1 KARAKTERISTIK LOGAM ALUMINIUM .....	5
2.2 ALUMINIUM DAN PADUANNYA.....	8
2.3 PADUAN ALUMINIUM SILIKON .....	11
2.4 PADUAN ALUMINIUM TUANG AC4B .....	13
2.5 PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR PADUAN DALAM PADUAN ALUMINIUM TUANG .....	14
2.6 PENGARUH MIKROSTRUKTUR TERHADAP SIFAT MEKANIK .. .....	24
2.6.1 Fasa Intermetalik.....	24
2.6.2 <i>Dendrite Arm Spacing</i> (DAS).....	26
2.6.3 Ukuran dan bentuk butir .....	28
2.6.4 Modifikasi eutektik dan penghalusan fasa primer .....	29
2.7 PROSES PEMBEKUAN LOGAM .....	30
2.8 <i>MODIFIER</i> .....	37
2.8.1 Mekanisme modifikasi .....	37
2.8.2 Modifikasi Berlebihan ( <i>Over Modifikasi</i> ) .....	43
2.8.3 Pemudaran Unsur Modifikasi .....	43
2.8.4 Modifikasi stronsium .....	44
2.9 PENGARUH MODIFIKASI TERHADAP KARAKTERISTIK PADUAN AC4B .....	45
2.9.1 Pengaruh modifikasi terhadap struktur mikro.....	45
2.9.2 Pengaruh modifikasi terhadap sifat mekanis.....	48
2.9.3 Pengaruh modifikasi terhadap porositas .....	49
2.9.4 Pengaruh modifikasi terhadap fluiditas.....	53

2.10 PENGHALUS BUTIR.....	56
2.10.1 Efek Penghalus Butir Terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium .....	57
2.10.2 Mekanisme Penghalusan Butir Dengan AlTiB .....	60
2.10.3 Efek Pemudaran ( <i>Fading</i> ).....	65
2.11 EFEK PENAMBAHAN PENGHALUS BUTIR DAN <i>MODIFIER</i> .....	68
2.11.1 Pengaruh Penggabungan Penghalus Butir dan <i>Modifier</i> .....	69
2.12 TINJAUAN UMUM PROSES PENGECORAN <i>DIE CASTING</i> .....	77
2.13 PENGECORAN <i>LOW PRESSURE DIE CASTING</i> .....	81
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.....</b>	<b>82</b>
<b>3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN.....</b>	<b>82</b>
3.2 PERALATAN DAN BAHAN .....	83
3.2.1 Peralatan.....	83
3.2.2 Bahan .....	84
3.3 PROSES PENGECORAN .....	84
3.3.1 Perhitungan <i>Material Balance</i> .....	84
3.4 PROSEDUR PENELITIAN .....	89
3.4.1 Proses Pengecoran.....	89
3.4.2 Proses Preparasi Sampel .....	91
3.4.3 Proses Pengujian .....	93
3.4.3.1 Pengujian Komposisi Kimia .....	93
3.4.3.2 Pengujian Fluiditas.....	94
3.4.3.3 Pengujian Porositas .....	95
3.4.3.4 Pengujian Kekerasan .....	95
3.4.3.5 Pengujian Tarik.....	96
3.4.3.6 Pengamatan Struktur Mikro .....	97
3.4.3.7 Pengujian Kebocoran .....	98
<b>BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>100</b>
4.1 ANALISIS KOMPOSISI KIMIA HASIL PENGECORAN PADUAN ALUMINIUM AC4B.....	100
4.2 KARAKTERISASI PENGHALUS BUTIR <i>COVERAL GR-2815</i> DAN <i>MODIFIER Al-10Sr</i> .....	103
4.3 PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI TITANIUM DAN STRONSIUM TERHADAP KARAKTERISTIK PADUAN ALUMINIUM AC4B.....	105
4.3.1 Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Kekerasan Makro Paduan AC4B .....	105
4.3.2 Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Kekuatan Tarik Paduan AC4B .....	108
4.3.3 Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Fluiditas Paduan AC4B ...	112
4.3.4 Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Distribusi Porositas Paduan AC4B .....	114
4.4 PENGAMATAN MIKROSTRUKTUR .....	119
4.4.1 Pengamatan Dengan Menggunakan Mikroskop Optik ...	119

4.4.2 Pengamatan Dengan Menggunakan SEM / EDAX .....	123
4.5 ANALISIS TINGKAT KEGAGALAN PADA KOMPONEN <i>CYLINDER HEAD</i> DENGAN VARIASI PENAMBAHAN TITANIUM ....	130
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>135</b>
5.1 KESIMPULAN .....	135
5.2 SARAN .....	136
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>137</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>140</b>



## Daftar Gambar

Gambar 2.1 Komponen <i>cylinder head</i> pada kendaraan bermotor.....	8
Gambar 2.2 Jenis-jenis paduan aluminium yang sering digunakan.....	11
Gambar 2.3 Diagram Fasa Al-Si.....	12
Gambar 2.4 Kurva kelarutan hidrogen.....	17
Gambar 2.5 Letak presipitasi hidrogen pada larutan aluminium terdapat pada daerah SDAS ( <i>Secondary Dendrite Arm Spacing</i> ) .....	17
Gambar 2.6 Proses presipitasi hidrogen pada daerah DAS.....	18
Gambar 2.7 Pengaruh Mn terhadap paduan alumini.....	19
Gambar 2.8 Pengaruh Cu terhadap paduan aluminium .....	20
Gambar 2.9 Pengaruh Si terhadap paduan aluminium.....	22
Gambar 2.10 Fasa-fasa yang terbentuk pada paduan aluminium AC4B .....	25
Gambar 2.11 Struktur <i>dendrite</i> yang sedang tumbuh .....	26
Gambar 2.12 Sketsa geometris sel dendrit.....	27
Gambar 2.13 DAS ( <i>Dendrite Arm Spacing</i> ) .....	27
Gambar 2.14 Pengaruh <i>Dendrite Arm Spacing</i> terhadap sifat mekanis.....	28
Gambar 2.15 Energi bebas dari sistem <i>solid-liquid</i> dengan perubahan ukuran pada fasa <i>solid</i> (energi kritis).....	31
Gambar 2.16 Pembentukan batas muka saat <i>solid</i> terbentuk dari <i>liquid</i> .....	32
Gambar 2.17 Panas laten berpindah saat melewati <i>interface</i> melalui fasa <i>solid</i> ...	32
Gambar 2.18 Skema pembekuan logam.....	34
Gambar 2.19 Skematis pembentukan mikrostruktur dalam pengecoran. Pembentukan terarah menyebabkan terbentuknya struktur kolomnar, sedangkan pada bagian tengah cetakan terbentuk struktur kecil-kecil .....	34
Gambar 2.20 Kurva pembentukan logam .....	34
Gambar 2.21 Mekanisme solidifikasi ; (a) nukleasi dimulai, (b) pembentukan <i>chill zone</i> , (c) pembentukan kolomnar, dan (d) pembentukan daerah <i>equiaxed</i> .....	35
Gambar 2.22. Ilustrasi pembentukan butir pada bagian dekat dinding cetakan.....	36
Gambar 2.23 Skema pertumbuhan <i>acicular</i> silikon kristal dari proses pembekuan tanpa modifikasi .....	38
Gambar 2.24 Adsorpsi atom pengotor pada tahapan pertumbuhan kristal silikon yang menyebabkan terjadinya mekanisme <i>twinning</i> (kembaran) .....	38
Gambar 2.25 <i>Impurities</i> dapat menyebabkan timbulnya <i>twinning</i> (hitam).....	38
Gambar 2.26 Mekanisme solidifikasi eutektik pada daerah pendinginan.....	42
Gambar 2.27 Solidifikasi eutektik pada unsur modifikasi Na .....	42
Gambar 2.28 Pengaruh overmodifikasi terhadap struktur mikro aluminium .....	43
Gambar 2.29 Grafik perbandingan kadar stronsium dan waktu tunggu .....	44
Gambar 2.30 Derajat pengaruh modifikasi ; (A) tidak termodifikasi ; (F) termodifikasi sempurna.....	47
Gambar 2.31 Struktur mikro hasil SEM aluminium paduan A356 tanpa modifikasi dengan menggunakan SEM ; (kiri) perbesaran 100x ; (kanan) perbesaran 1000x	47

Gambar 2.32 Struktur mikro aluminium paduan A356 dengan modifikasi; (kiri) perbesaran 100x ; (kanan) perbesaran 1000x.....	48
Gambar 2.33 Nilai Indeks Kualitas (Q) terhadap kecepatan pendinginan pada paduan aluminium A356 dengan penambahan Sr.....	49
Gambar 2.34 Pengaruh penambahan 0.01wt.% Sr terhadap nilai kekerasan pada aluminium paduan 336.0.....	49
Gambar 2.35 Hubungan antara jumlah porositas dengan kandungan hidrogen.....	50
Gambar 2.36 Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi tanpa penambahan Sr .....	51
Gambar 2.37 Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi dengan penambahan <i>modifier</i> Sr.....	51
Gambar 2.38 Perbandingan tingkat porositas .....	52
Gambar 2.39 Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi pada paduan dengan rentang pembekuan pendek.....	54
Gambar 2.40 Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi pada paduan dengan rentang pembekuan panjang.....	54
Gambar 2.41 Metode pengujian fluiditas dengan menggunakan cetakan spiral....	54
Gambar 2.42 Pengaruh komposisi terhadap nilai fluiditas .....	55
Gambar 2.43 Kurva Pendinginan Al-Si .....	56
Gambar 2.44 Grafik perbandingan antara besar DAS dengan nilai UTS dan elongasi logam .....	57
Gambar 2.45 Kurva pembekuan logam sebelum dan setelah mengalami penambahan penghalus butir.....	57
Gambar 2.46 (a)(b)(c) Ilustrasi penyusutan pada jarak lengan dendrit, (d) Mikrostruktur dari porositas interdendritik ( perbesaran 80x).....	58
Gambar 2.47 (a) <i>Secondary dendrite arm spacing</i> (SDAS), (b) Dendrit pada paduan aluminium (50x) .....	58
Gambar 2.48 Pengaruh besar butir terhadap kecenderungan retak panas pada paduan Al-4.5Cu. Nilai dibawah 50 rentan terhadap retak panas .....	59
Gambar 2.49 Pengaruh energi antarmuka pada geometri dari nukleus yang terbentuk pada nuklean .....	61
Gambar 2.50 Struktur kristal TiAl <sub>3</sub> dengan aluminium.....	62
Gambar 2.51 Diagram fasa TiAl <sub>3</sub> .....	62
Gambar 2.52 Mekanisme terjadinya nukleasi pada sistem Al-Ti .....	63
Gambar 2.53 Zona pendinginan lanjut mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan <i>dendrite</i> .....	64
Gambar 2.54 Pemudaran penghalus butir jenis AlTiB pada paduan aluminium....	66
Gambar 2.55 Pengaruh waktu tahan terhadap ukuran butir dari logam yang diberi penghalus butir. A-B merupakan waktu kontak, B-C adalah waktu pudar.....	67
Gambar 2.56 Efek boron pada penghalusan butir dari A356.....	68
Gambar 2.57 Hubungan antara penghalus butir, rasio pendinginan, dan unsur modifikasi .....	69
Gambar 2.58 Struktur mikro Al-12Si setelah penambahan 0.03 wt.% Ti-0.05 wt.% Sr.....	69
Gambar 2.59 Mikrostruktur dari paduan Al-12Si ; (a) tanpa penambahan apapun, (b) mengandung 0.03 wt.%Ti, (c) mengandung 0.04 wt. %Sr, (d) dengan penambahan 0.03 wt.%Ti dan 0.05 wt.%Sr .....	70

Gambar 2.60 Pengaruh penambahan penghalus butir dan <i>modifier</i> terhadap ketahanan aus paduan Al-7Si .....	72
Gambar 2.61 Pengaruh penambahan penghalus butir dan <i>modifier</i> terhadap kekuatan tarik paduan Al-7Si .....	72
Gambar 2.62 Kandungan Sr setelah penambahan Ti .....	75
Gambar 2.63 Kadar porositas vs kadar silikon sebelum dan setelah penambahan <i>grain refiner</i> dan <i>modifier</i> .....	76
Gambar 2.64 (a) Tidak mengalami perlakuan khusus, (b) mengalami modifikasi, (c) mengalami penghalusan butir dan (d) mengalami penghalusan butir dan modifikasi .....	76
Gambar 2.64 Skematik proses <i>Low Pressure Die Casting</i> (LPDC) .....	81
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	82
Gambar 3.2 (a) Mesin GBF ; (b) Mesin LPDC .....	89
Gambar 3.3 Material umpan (a) <i>ingot</i> AC4B , (b) <i>scrap</i> AC4B .....	90
Gambar 3.4 Elemen yang akan ditambahkan (a) <i>master alloy</i> Al-10Sr , (b) penghalus butir <i>flux GR-Coveral 2815</i> .....	90
Gambar 3.5 Proses GBF-manual dengan menggunakan <i>lance</i> .....	91
Gambar 3.6 Daerah pemotongan sampel pada <i>cylinder head</i> .....	92
Gambar 3.7 Alat yang digunakan dalam preparasi sampel metalografi (a) Alat ampelas ; (b) Alat poles .....	93
Gambar 3.8 (a) Alat uji komposisi dan (b) Sampel uji komposisi kimia .....	93
Gambar 3.9 <i>Optical emission spectrometer</i> merk Shimadzu .....	94
Gambar 3.10 Alat uji fluiditas .....	94
Gambar 3.11 Alat pengujian porositas .....	95
Gambar 3.12 (a) Titik pengujian kekerasan pada sampel <i>cylinder head</i> ; (b) Alat uji kekerasan Rockwell .....	96
Gambar 3.13 Standar pengujian tarik standar ASTM E-8 .....	96
Gambar 3.14 Cetakan uji tarik .....	97
Gambar 3.15 (a) Alat SEM dan (b) Alat foto mikro .....	98
Gambar 3.16 Alat XRD .....	98
Gambar 3.17 Mesin uji bocor .....	99
Gambar 4.1 Mikrostruktur dari penghalus butir dengan perbesaran 800x .....	103
Gambar 4.2 Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) Al-10Sr .....	104
Gambar 4.3 Mikrostruktur dari <i>modifier</i> Al-10Sr dengan perbesaran 450x, etsa HF 0.5 % ... ..	104
Gambar 4.4 Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) Al-10Sr .....	105
Gambar 4.5 Perbandingan nilai kekerasan pada daerah tipis dan tebal untuk komposisi normal (0.00 wt. % Ti dan 0.00 wt. % Sr) dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti .....	106
Gambar 4.6 Perbandingan nilai UTS ( <i>Ultimate Tensile Strength</i> ) sebelum dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti .....	108
Gambar 4.7 Perbandingan nilai elongasi sebelum dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti .....	109
Gambar 4.8 Penampang hasil patahan sampel uji tarik komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr. Hasil foto menunjukkan bahwa adanya daerah gelap yang	

merupakan salah satu inisiasi terjadinya perpatahan prematur pada komponen hasil uji tarik .....	111
Gambar 4.9 Mikrostruktur hasil uji tarik dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan (a) 0.063, (b) 0.083 dan (c) 0.108 wt. % Ti .....	111
Gambar 4.10 Perbandingan panjang fluiditas sebelum penambahan dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti .....	112
Gambar 4.11 Perbandingan panjang sampel uji fluiditas pada komposisi normal dan setelah penambahan pada kombinasi komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti .....	114
Gambar 4.12 Perbandingan penampang sampel uji vakum untuk komposisi (a) tanpa penambahan dan setelah penambahan Sr konstan pada komposisi 0.02 wt. % dikombinasikan dengan (b) 0.063 wt. % Ti, (c) 0.083 wt. % Ti dan (d) 0.108 wt. % Ti .....	115
Gambar 4.13 Mikrostruktur porositas pada sampel uji fluiditas untuk komposisi (a) normal, (b) 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, (c) 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr dan (d) 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr .....	118
Gambar 4.14 Foto mikrostruktur paduan AC4B pada sampel tipis dan tebal paduan AC4B tanpa penambahan (a-b), dan pada kombinasi komposisi 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr (c-d), 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr (e-f), dan 0.108 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr (g-h), dengan menggunakan etsa Tucker dan perbesaran 200x..	120
Gambar 4.15 Perbandingan nilai DAS pada daerah tipis dan tebal tanpa penambahan dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti .....	121
Gambar 4.16 Hasil pengujian SEM untuk komposisi 0.063 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX .....	124
Gambar 4.17 Hasil pengujian SEM untuk komposisi 0.083 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX .....	126
Gambar 4.18 Hasil pengujian SEM untuk komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX .....	127
Gambar 4.19 Diagram fasa Ti-Sr .....	129
Gambar 4.20 Perbandingan presentasi kegagalan akibat misrun dan <i>shrinkage</i> pada paduan aluminium AC4B tanpa penambahan dan pada komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr .....	130
Gambar 4.21 Contoh cacat misrun .....	132
Gambar 4.22 Cacat <i>shrinkage</i> pada <i>cylinder head</i> (a); <i>shrinkage</i> pada bagian dalam <i>cylinder head</i> setelah dipotong (b) .....	132
Gambar 4.23 Perbandingan persentase kegagalan akibat bocor pada komponen <i>cylinder head</i> tanpa penambahan dan pada komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr .....	133

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Berat jenis beberapa jenis logam .....	6
Tabel 2.2 Sifat-sifat umum aluminium .....	7
Tabel 2.3 Penamaan paduan aluminium <i>as-cast</i> menurut standar AA .....	9
Tabel 2.4 Penamaan paduan aluminium tempa menurut AA .....	10
Tabel 2.5 Penamaan standar untuk proses pengerasan pada paduan aluminium...10	
Tabel 2.6 Komposisi kimia AC4B .....	13
Tabel 2.7 Karakteristik dari aluminium paduan AC4B ( 1-baik sekali, 5-buruk) .13	
Tabel 2.8 Kelarutan berbagai elemen pada aluminium cair.....	24
Tabel 2.9 Tahapan pengendapan fasa pada paduan Al-Si hipoeutektik.....	26
Tabel 2.10 Ukuran dan jarak <i>twining</i> pada kondisi <i>modified</i> .....	39
Tabel 2.11 Level porositas .....	39
Tabel 2.12 Bentuk dan komposisi <i>modifier</i> stronsium komersial .....	45
Tabel 2.13 Teori-teori penting mengenai penghalusan butir .....	63
Tabel 2.14 Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut pada aluminium.....	65
Tabel 2.15 Pengaruh penambahan penghalus butir dan <i>modifier</i> terhadap SDAS71	
Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti dibandingkan dengan standar QA AHM dan <i>Aluminium Association</i> (AA) .....	100
Tabel 4.2 Komposisi kimia penghalus butir berdasarkan analisa SEM X – <i>Ray Mapping</i> .....	103
Tabel 4.3 Fraksi volume porositas pada komposisi (a) normal, (b) 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, (c) 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, dan (d) 0.108 wt. % Ti + 0.02 wt. % .....	117
Tabel 4.4 Perbandingan nilai karakterisasi uji mekanis sebelum dan setelah penambahan.....	124
Tabel 4.5 Komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.16 dengan komposisi 0.063 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr .....	124
Tabel 4.6 Komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.17 dengan komposisi penambahan 0.05 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr .....	125
Tabel 4.7 Komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.18 dengan komposisi penambahan 0.07 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr.....	127

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG PENELITIAN

Saat ini perkembangan industri pengecoran paduan aluminium tuang di Indonesia tumbuh dengan pesat sejalan dengan meningkatnya kebutuhan akan komponen pada industri otomotif baik untuk industri roda dua maupun roda empat. Paduan aluminium tuang merupakan jenis material yang paling banyak digunakan sebagai bahan baku pada industri otomotif dikarenakan oleh sifatnya yang cukup baik. Oleh karena itu, perlu adanya peningkatan pengetahuan akan sifat-sifat paduan aluminium tuang seperti pengetahuan akan proses manufaktur aluminium tuang, pengetahuan akan berbagai metode untuk menghasilkan sifat yang lebih baik pada produk hasil cor aluminium tuang serta pengetahuan tentang berbagai jenis cacat pengecoran pada produk hasil pengecoran aluminium tuang dan cara penanggulangannya. Hal ini dilakukan agar dapat mengurangi tingkat kegagalan produk komponen hasil pengecoran aluminium di industri otomotif. Berbagai cara peningkatan hasil produk komponen pengecoran aluminium tuang telah dilakukan, salah satunya adalah dengan penambahan penghalus butir atau dengan penambahan unsur modifikasi. Proses penghalusan butir berguna untuk membuat butir menjadi lebih kecil, halus dan homogeny, sedangkan proses modifikasi adalah suatu proses penambahan unsur tertentu yang dapat merubah struktur mikro silikon pada paduan Al-Si dengan cara melakukan perlakuan terhadap logam cair pada saat proses pengecorannya<sup>[1]</sup>.

Paduan aluminium tuang yang sering digunakan sebagai bahan baku pembuatan komponen pada industri otomotif adalah paduan 333.0 *as-cast* yang sesuai dengan standar AA (*Aluminium Association*) atau AC4B (Al-Si-Cu) berdasarkan standar JIS (*Japan Industrial Standard*). Paduan ini sering digunakan untuk proses pengecoran komponen *cylinder head*, kipas pendingin, kotak bahan bakar, piston bertekanan udara, dan roda gigi<sup>[1]</sup>. Pada umumnya sebagian besar proses pembuatan komponen tersebut dengan menggunakan proses *die casting*,

sebagai contoh *cylinder head* yang dibuat dengan proses *Low Pressure Die Casting* (LPDC). Tingkat kegagalan akibat cacat pada hasil komponen proses LPDC cukup tinggi. Adapun jenis-jenis kegagalan yang umumnya terjadi adalah penyusutan (*shrinkage*), porositas, dan misrun. Dengan adanya penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi dapat menurunkan tingkat kegagalan komponen produk hasil pengecoran dengan cara meminimalisir cacat-cacat yang terbentuk<sup>[3]</sup>. Penghalus butir sebagai pembentuk inti dapat menyebabkan pendinginan menjadi lebih terkontrol sehingga butir-butir menjadi lebih halus dan sifat mekanis logam menjadi lebih baik. Sedangkan penambahan *modifier* terhadap paduan aluminium tuang dapat memodifikasi struktur silikon eutektik pada fasa Al-Si dari *acicular* menjadi *fibrous* sehingga dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan UTS (*Ultimate Tensile Strength*), fluiditas, keuletan, kekuatan impak dan sifat mampu mesin dari produk hasil pengecoran<sup>[4]</sup>.

Pengaruh penambahan *modifier* dan penghalus butir secara individual telah banyak dipelajari. Namun, penelitian terhadap pengaruh kombinasi penambahan dan interaksi antara keduanya pada proses pengecoran *Low Pressure Die Casting* (LPDC) belum banyak dilakukan. Terdapat berbagai jenis penghalus butir dan *modifier* yang dapat digunakan. Untuk penghalus butir diantaranya adalah Al-Ti-B dalam bentuk batangan maupun yang berbentuk serbuk. Sedangkan untuk *modifier* diantaranya adalah Al-10-Sr dalam bentuk batangan. Pada penelitian ini, digunakan penghalus butir berbentuk serbuk dan *modifier* berbentuk batangan. Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kombinasi komposisi *modifier* stronsium dan penghalus butir titanium pada komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0,063, 0,083 dan 0,108 wt. % Ti terhadap paduan aluminium AC4B hasil proses LPDC (*Low Pressure Die Casting*)<sup>[15]</sup>.

## 1.2 TUJUAN PENELITIAN

1. Untuk mempelajari pengaruh penambahan 0.02 wt. % Sr dan 0.03, 0.05, 0.07 wt. % Ti terhadap sifat mekanis, struktur mikro, sifat mampu alir, dan distribusi porositas paduan aluminium AC4B hasil proses LPDC.

2. Untuk mempelajari proses reaksi penghalus butir titanium dan unsur modifikasi stronsium pada paduan aluminium tuang AC4B.

### 1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN

#### 1.3.1 Material Penelitian

1. Material yang digunakan adalah paduan aluminium tuang AC4B.
2. Penghalus butir yang digunakan adalah serbuk Ti (nama dagang *coveral* GR-2815), dengan kombinasi komposisi 0.063, 0.083, dan 0.108 wt. % Ti. Penambahan dilakukan pada *holding furnace* mesin LPDC.
3. Unsur modifikasi yang digunakan adalah batangan Al-10%Sr, dengan komposisi penambahan 0.02 wt. % Sr. Penambahan dilakukan pada *holding furnace* mesin LPDC bersama titanium.

#### 1.3.2 Parameter Penelitian

1. Variabel komposisi tanpa titanium dan stronsium (0 wt. % Sr dan 0 wt. % Ti) dan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083, 0.108 wt. % Ti.
2. Proses pengecoran dilakukan di Pabrik LPDC, PT AHM dan pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik dan Laboratorium Metalografi & HST di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
3. Analisa struktur dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan di Laboratorium SEM Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
4. Penghalus butir yang digunakan adalah berupa serbuk Ti (nama dagang *coveral* GR-2815) yang didapat dari PT Foseco Indonesia, komposisi penambahan 0,063 wt. % Ti, 0,083 wt. % Ti, dan 0,108 wt. % Ti. Penambahan penghalus butir dilakukan pada *holding furnace* mesin LPDC.
5. *Modifier* yang digunakan adalah Al-10%Sr dengan komposisi penambahan 0.02 wt. % Sr.

6. Kapasitas ruang tahan LPDC adalah 500 kg dengan temperatur proses yang dipakai adalah 700-715° C, tekanan mesin 250-268 KPa.
7. Proses LPDC dengan temperatur pemanasan awal cetakan  $\pm 270^{\circ}\text{C}$ .
8. Pengujian fluiditas metode spiral tanpa pemanas dengan temperatur pemanasan awal cetakan  $\pm 300^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ .
9. Pembuatan sampel uji tarik pada cetakan berbentuk batangan.

#### 1.4 MANFAAT PENELITIAN

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan salah satu alternatif solusi untuk mengurangi jumlah kegagalan komponen produk AC4B melalui proses LPDC yang juga bermanfaat untuk meningkatkan kualitas komponen tersebut. Selain itu, penelitian ini diharapkan juga dapat memberikan tambahan studi literatur bagi pihak lain yang juga ingin mengetahui mengenai pengaruh penambahan *modifier* Sr dan penghalus butir Ti terhadap karakteristik paduan aluminium tuang Al-Si-Cu.

## BAB 2

### STUDI LITERATUR

#### 2.1 KARAKTERISTIK LOGAM ALUMINIUM

Aluminium merupakan salah satu unsur logam yang ada di alam dengan simbol Al, aluminium memiliki nomor atom 13 dengan konfigurasi elektron  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p$  dan berat atom 26.28. Isotopnya memiliki nomor massa 27 adalah satu-satunya isotopnya yang stabil. Sifat-sifatnya antara lain lunak, ringan dan merupakan logam yang berwarna abu-abu yang memiliki ketahanan terhadap korosi saat dalam keadaan murni yang disebabkan oleh aktifitas kimianya karena keberadaan lapisan permukaan oksidanya yang tipis<sup>[5]</sup>. Aluminium pertama kali ditemukan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1809 dan pertama kali berhasil direduksi sebagai logam oleh H.C Oersted pada tahun 1825. Secara terpisah pada tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C.M Hall di Amerika Serikat telah memperoleh aluminium. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah pada urutan kedua setelah besi baja dan merupakan yang tertinggi diantara material *non-ferrous* lainnya<sup>[5]</sup>.

Aluminium termasuk kedalam jenis logam yang mudah dipadukan dengan logam lainnya, dan saat ini lebih dari 300 jenis komposisi paduan aluminium telah dibuat untuk berbagai keperluan<sup>[5]</sup>. Sebagai logam yang sering digunakan dalam proses pengecoran logam, aluminium tuang memiliki beberapa karakteristik atau sifat-sifat tertentu yang membuatnya bersifat lebih ekonomis dan menarik untuk digunakan. Karakteristik tersebut<sup>[3]</sup>, antara lain :

1. Berat jenis aluminium bersifat lebih ringan bila dibandingkan dengan logam lain, yakni sepertiga dari berat jenis baja ( $7.83 \text{ g/cm}^3$ ), tembaga ( $8.93 \text{ g/cm}^3$ ) dan kuningan ( $8.53 \text{ g/cm}^3$ ). Berat jenis aluminium  $\pm 2.689 \text{ gr/cm}^3$ , dalam keadaan cair memiliki berat jenis sekitar  $2.3 \text{ gr/cm}^3$ . Karena berat jenisnya yang ringan, maka dapat dilakukan untuk proses pengecoran logam untuk benda-benda yang berukuran kecil dan tekanan cetakan yang juga relatif rendah sehingga dapat dipakai peralatan cetakan yang ringan. Tabel 2.1 menjelaskan tentang perbandingan berat jenis beberapa jenis logam<sup>[16]</sup>.

**Tabel 2.1** Berat jenis beberapa jenis logam<sup>[16]</sup>

Bahan	Titik cair (°C)	Berat jenis (g/cm <sup>3</sup> )
Air	0	0.9982(20°C)
Air raksa	-38.9	13.56(20)
Timah	232	5.52(232)
Timbal	327	10.55(440)
Seng	420	6.21(420)
Aluminium	660	2.35(760)
Tembaga	1083	7.84(1200)
Besi	1537	7.13(1600)
Besi cor	1170	6.9(1300)

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

Selain kelebihan-kelebihan tersebut, aluminium tuang juga memiliki beberapa kekurangan<sup>[3]</sup>, antara lain :

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

**Tabel 2.2** Sifat-sifat umum aluminium<sup>[3]</sup>

Sifat	Nilai
Nomor atom	13
Berat atom	26.98
Nomor valensi atom	3
Struktur kristal	FCC
Titik lebur (°C)	660.2
Titik didih (°C)	2480
Rata-rata panas spesifik (0-100°C) (cal/g.°C)	0.219
Konduktivitas panas (0-100°C) (cal/cms.°C)	0.57
Koefisien ekspansi linier (0-100°C) (x10 <sup>-6</sup> /°C)	23.5
Resistivitas elektrik at 20°C (μΩ.cm)	2.69
Kepadatan (g/cm <sup>3</sup> )	2.6898
Modulus elastis (GPa)	68.3
Rasio Poisson	0.34

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



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

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

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

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

## 2.2 ALUMINIUM DAN PADUANNYA

Dalam rangka meningkatkan sifat fisik dan mekanik aluminium, sering ditambahkan beberapa jenis unsur yang berguna untuk membentuk suatu paduan dengan sifat tertentu yang lebih baik bila dibandingkan dengan aluminium murni. Penambahan unsur paduan ini sering digunakan untuk pembuatan komponen kendaraan bermotor (contohnya adalah komponen *cylinder head* yang dapat dilihat pada Gambar 2.1), badan pesawat terbang, kaleng minuman, dan peralatan-peralatan lainnya. Penambahan unsur-unsur paduan yang berfungsi sebagai atom asing yang menyisip atau disisipkan dalam kisi aluminium dapat bersifat menguntungkan dan merugikan. Sifat mekanik dan fisik dari paduan akan meningkat. Akan tetapi, konduktivitas aluminium akan menurun dan penambahan unsur paduan dapat menaikkan volume dari benda kerja<sup>[6]</sup>.



**Gambar 2.1** Komponen *cylinder head* pada kendaraan bermotor<sup>[15]</sup>

Secara umum, paduan aluminium dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu aluminium cetak dan aluminium tempa. Paduan aluminium tuang merupakan

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

Logam aluminium termasuk kedalam jenis logam yang mudah dipadukan dengan logam lainnya, dan saat ini lebih dari 300 jenis komposisi paduan aluminium telah dibuat untuk berbagai keperluan<sup>[5]</sup>. Oleh karena itu, dilakukan sistem penamaan terhadap jenis paduan aluminium yang sangat banyak jumlahnya dan berfungsi untuk memudahkan penggolongan sifat paduan dan memudahkan dalam pemilihan paduan aluminium sesuai dengan sifat yang diinginkan dalam aplikasi tertentu. Terdapat berbagai macam penamaan material aluminium hasil pengecoran, salah satunya adalah menurut *Aluminium Association* (AA) yang digunakan oleh Amerika Serikat<sup>[11]</sup>. Tabel 2.3 menjelaskan tentang klasifikasi dari paduan aluminium *as-cast* menurut standar AA (ANSI H35. 1-1987)<sup>[11]</sup>.

**Tabel 2.3 Penamaan paduan aluminium *as-cast* menurut standar AA<sup>[3]</sup>**

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

Dalam sistem penamaan AA, terdapat empat angka dengan angka keempat dituliskan terpisah dari tiga angka lainnya (XXX.X) yang berfungsi untuk menentukan jenis produk yang dapat dibuat dari paduan aluminium tersebut. Dalam sistem penamaan AA, angka pertama menunjukkan kelompok paduan, angka kedua dan ketiga menunjukkan kemurnian minimum untuk aluminium tanpa paduan dan sebagai nomor identifikasi untuk paduan tersebut, angka keempat menandakan bentuk produk (.0 = spesifikasi coran, .1 = spesifikasi *ingot*, .2 = spesifikasi *ingot* yang lebih spesifik).

**Tabel 2.4** Penamaan paduan aluminium tempa menurut AA<sup>[3]</sup>

Nomor Seri	Unsur Paduan Utama
1xxx	Al murni ( $\geq 99\%$ )
2xxx	Tembaga (Cu)
3xxx	Mangan (Mn)
4xxx	Silikon (Si)
5xxx	Magnesium (Mg)
6xxx	Magnesium dan silikon
7xxx	Seng (Zn)
8xxx	Unsur lain-lain
9xxx	Seri yang tidak digunakan

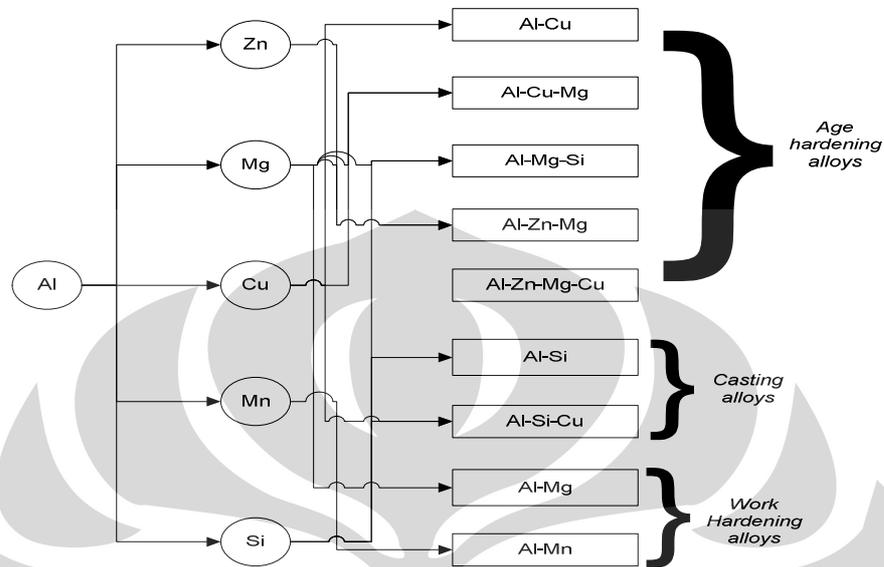
Biasanya, *ingot* versi XXX.1 dapat digunakan sebagai produk kedua (dilebur kembali dari sisa-sisa *ingot* aluminium) dimana *ingot* versi XXX.2 dibuat dari aluminium pertama. Beberapa nama paduan menggunakan huruf, setiap huruf yang diikuti oleh angka menjadi pembeda antara paduan dalam hal persentase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

**Tabel 2.5** Penamaan standar untuk proses pengerasan pada paduan aluminium<sup>[3]</sup>.

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

Jenis-jenis paduan aluminium yang umum digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.2 dimana pada umumnya paduan yang digunakan merupakan paduan aluminium dengan penambahan Zn, Mg, Si, Mn dan Cu. Setiap paduan memiliki

karakteristik masing-masing dan digunakan untuk kondisi tertentu sesuai dengan sifat yang dihasilkan oleh paduan tersebut. Setiap paduan memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing.



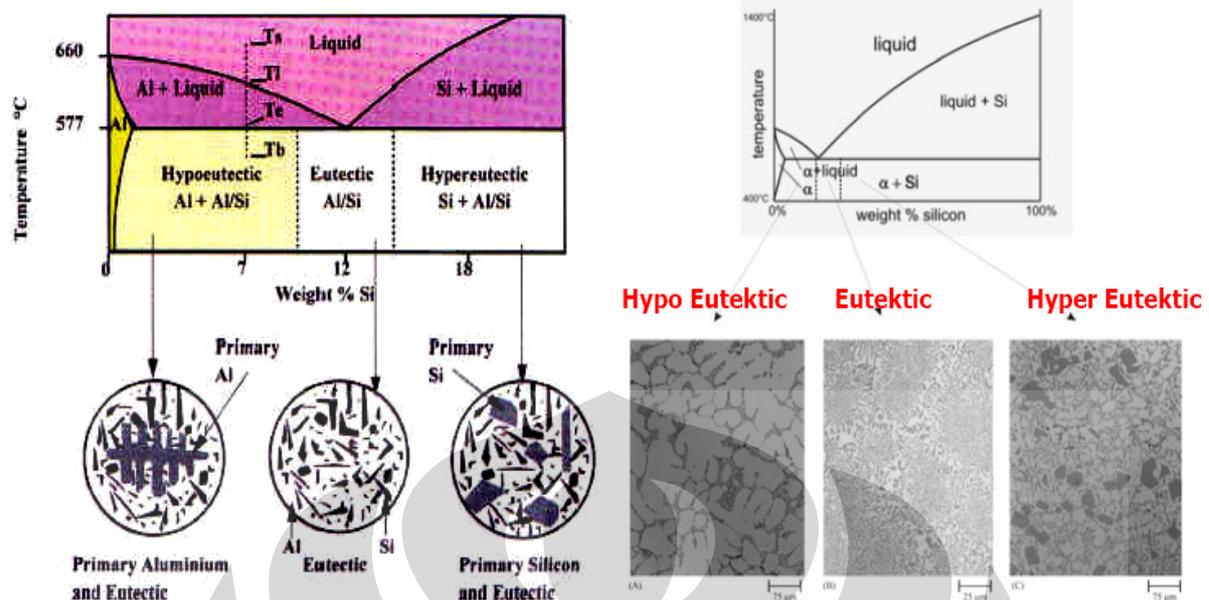
Gambar 2.2 Jenis-jenis paduan aluminium yang sering digunakan<sup>[3]</sup>

### 2.3 PADUAN ALUMINIUM SILIKON

Paduan aluminium yang paling umum digunakan untuk proses pengecoran logam aluminium adalah paduan aluminium silikon (Al-Si). Hal ini dikarenakan dengan adanya penambahan silikon pada paduan aluminium akan mengakibatkan paduan aluminium tersebut memiliki karakteristik cor yang sangat baik bila dibandingkan dengan paduan lainnya. Paduan ini memiliki variasi sifat fisik dan mekanik seperti sifat mampu cor, ketahanan korosi yang sangat baik dan sifat *machinability* yang baik<sup>[6]</sup>. Paduan Al-Si ini terbagi atas tiga jenis berdasarkan komposisi silikon-nya<sup>[9]</sup>, yaitu :

1. Hipoeutektik ( $< 11.7\% \text{ Si}$ ).
2. Eutektik ( $11.7\% - 12.2\% \text{ Si}$ ).
3. Hiper eutektik ( $> 12\% \text{ Si}$ ).

Gambar 2.3 menunjukkan diagram fasa aluminium silikon dengan bentuk fasa pada tiap jenis komposisi silikon<sup>[9]</sup>.



Gambar 2.3 Diagram Fasa Al-Si<sup>[6]</sup>

Dalam ketiga jenis aluminium ini, terdapat fasa  $\alpha$ -Al sebagai komposisi paduan yang utama karena banyak mengandung aluminium. Bentuk struktur ini akan sering muncul, baik dalam komposisi hipoeutektik, eutektik maupun hipereutektik karena strukturnya yang selalu terpisah pada fasa padatnya dalam setiap komposisi<sup>[8]</sup>. Fasa lain selain fasa  $\alpha$ -Al adalah fasa  $\beta$ , fasa yang merupakan partikel silikon yang tidak larut dalam fasa  $\alpha$ -Al. Dalam komposisi hipereutektik, fasa tersebut dapat menghasilkan silikon primer yang bentuknya relatif kasar sehingga tidak baik untuk paduan karena dapat menyebabkan terjadinya retak awal. Paduan yang mengandung komposisi silikon hipoeutektik yang lebih tinggi biasanya lebih cocok digunakan untuk proses pengecoran yang rumit dan untuk proses pengecaoran yang menggunakan cetakan<sup>[7]</sup>.

Pada rentang komposisi hipoeutektik, kadar silikon  $< 11.7\%$ . Pada daerah ini, terjadi pembekuan melalui fasa cair-padat. Struktur akhir dari komposisi ini adalah struktur yang kaya akan aluminium dan sebagai fasa utamanya adalah fasa  $\alpha$  dengan struktur eutektik sebagai tambahan. Komposisi eutektik mengandung kadar silikon antara 11.7-12.2%. Komposisi eutektik merupakan daerah dimana paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya. Adanya struktur eutektik ini mengakibatkan paduan aluminium silikon memiliki karakteristik mampu cor yang baik. Untuk komposisi hipereutektik, kandungan

silicon > 12.2% memiliki komposisi yang kaya akan silikon dengan fasa eutektik sebagai fasa tambahan. Banyak paduan silikon hipereutektik (12-30% Si) yang juga mengandung tembaga. Pada komposisi ini fasa silikon primer menghasilkan ketahanan terhadap abrasi yang sangat baik dan unsur tembaga memperbaiki kekuatan pada temperatur tinggi dan peningkatan kekerasan<sup>[1]</sup>.

## 2.4 PADUAN ALUMINIUM TUANG AC4B

Paduan aluminium tuang AC4B merupakan paduan aluminium yang dinamakan berdasarkan standar JIS (*Japan Industrial Standard*) H5202 sebanding dengan paduan aluminium tuang paduan 333.0 standar AA atau AA 356.0 *as-cast*. Paduan aluminium ini adalah paduan yang umum digunakan dalam proses pengecoran di industri otomotif, terutama dalam pembuatan komponen-komponen tertentu seperti kotak bahan bakar, *cylinder head*, dan *cylinder compresor*<sup>[7]</sup>. Paduan aluminium tuang AC4B ini termasuk kedalam seri 3 dimana unsur paduan utamanya adalah aluminium, silikon, dan tembaga. Selain unsur utama tersebut, juga terdapat unsur unsur lain dengan jumlah yang kecil seperti Mg, Fe, Ni, Zn, Mn, dan Ti. Komposisi dari paduan AC4B dapat dilihat pada Tabel 2.6. Kelebihan dari paduan AC4B ini adalah memiliki kekuatan dan kekerasan yang baik, sifat mampu cor yang baik karena kehadiran atom silikon, koefisien ekspansi thermal yang baik, dapat dilakukan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanisnya, tahan terhadap korosi, dan juga memiliki sifat mampu las yang baik<sup>[9]</sup>. Pada Tabel 2.7 diberikan karakteristik dan sifat mekanis dari paduan AC4B<sup>[3]</sup>.

**Tabel 2.6** Komposisi kimia AC4B<sup>[15]</sup>

Paduan	Nomor Seri	Komposisi kimia (wt. %)										
		Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr
AC4B	AA 333	2-4	7-10	0.5	1	1	0.5	0.35	0.2	0.2	0.1	0.2

**Tabel 2.7** Karakteristik dari aluminium paduan AC4B ( 1-baik sekali, 5-buruk)<sup>[3]</sup>

Paduan	Ketahanan retak	Kepadatan tekanan	Fluiditas	Kecenderungan penyusutan	Ketahanan korosi	Mampu las mesin	Mampu las
333	1	1	1	2	3	3	3

## 2.5 PENGARUH PENAMBAHAN UNSUR PADUAN DALAM PADUAN ALUMINIUM TUANG

Untuk meningkatkan sifat aluminium paduan, ditambahkan unsur-unsur dengan komposisi tertentu tergantung dari sifat yang diinginkan. Berikut ini adalah beberapa unsur yang sering dipadukan dalam proses pengecoran aluminium<sup>[6]</sup>:

### 1. Antimoni (Sb)

Antimoni diberikan dalam jumlah yang terbatas (biasanya 0.01 hingga 0.1 ppm) untuk aluminium dengan *grade* komersial. Antimoni memiliki kelarutan fasa padatnya sangat rendah pada aluminium (kurang dari 0.01 %). Untuk aplikasi paduan pembuatan roda gigi mengandung 4 % sampai dengan 6 % Sb, dimana antimoni tersebut dapat digunakan dan memberikan hasil lebih baik dari bismuth untuk menghindari dari retak panas pada paduan Al-Mg.

### 2. Arsen (As)

Paduan AsAl merupakan paduan semikonduktor. Unsur arsen merupakan unsur yang sangat beracun, yaitu dalam bentuk  $\text{AsO}_3$  dan harus dikontrol untuk batas yang sangat rendah untuk aluminium yang digunakan untuk pembungkus pengemasan makanan.

### 3. Berilium (Be)

Berilium sering digunakan dalam paduan aluminium yang mengandung magnesium untuk mengurangi oksidasi pada temperatur tinggi. Hingga 0.1 % Be digunakan untuk tempat pembuatan aluminium untuk baja yang digunakan untuk meningkatkan adhesi dari film aluminium dan mencegah pembentukan Fe-Al kompleks yang sangat berbahaya.

### 4. Bismuth (Bi)

Bismuth merupakan logam dengan titik lebur yang rendah seperti bismuth, timbal, timah dan cadmium ditambahkan ke aluminium untuk membuat paduan dengan kemampuan permesinan. Paduan-paduan ini memiliki kelarutan yang terbatas dalam aluminium padat dan membentuk fasa yang lunak dan fasa dengan titik lebur yang rendah yang dapat

memicu pemecahan kepingan dan membantu untuk melumasi alat potong. Keunggulan bismuth adalah nilai ekspansi pada proses solidifikasi menghambat penyusutan. Rasio 1 : 1 antara timbal dan bismuth digunakan untuk paduan Al-Cu, 201 dan pada paduan Al-Mg-Si, 6262. Sedikit penambahan bismuth (20-200 ppm) dapat ditambahkan untuk paduan Al-Mg untuk mencegah efek berbahaya dari sodium pada retak panas.

#### 5. Boron (Br)

Boron sering digunakan pada aluminium dan paduannya sebagai penghalus butir dan meningkatkan konduktivitas dengan pengendapan vanadium, titanium, kromium dan molibdenum. Boron dapat digunakan sendiri (pada kandungan 0.005-0.1 %) sebagai penghalus butir selama proses solidifikasi. Namun akan dapat menjadi efektif saat digunakan dengan unsur titanium yang berlebih. Penghalus butir komersial biasanya mengandung titanium dan boron dengan rasio 5:1.

#### 6. Besi (Fe)

Unsur besi meningkatkan ketahanan terhadap retak panas dan mengurangi kecenderungan cetakan menempel pada proses pengecoran. Meningkatnya kadar besi akan mengurangi keuletan. Besi dapat bereaksi membentuk fasa intermetalik, diantaranya adalah  $FeAl_3$ ,  $FeAlMn_6$ , dan  $\alpha AlFeSi$ . Fasa intermetalik ini berperan dalam peningkatan kekuatan, terutama dalam temperatur tinggi, tapi juga berperan dalam penggetasan struktur. Besi dapat membentuk fasa lumpur dengan unsur mangan, kromium, dan unsur lainnya.

#### 7. Cadmium (Cd)

Cadmium merupakan unsur dengan titik lebur yang relatif rendah yang ditemukan terbatas pada penggunaan aluminium. Penambahan hingga 0.3 % Cd pada paduan Al-Cu menghasilkan percepatan laju pengerasan lama, peningkatan kekuatan dan peningkatan ketahanan korosi. Pada batas 0.005-0.5%, digunakan untuk mengurangi waktu penuaan dari paduan Al-Zn-Mg.

## 8. Kalsium (Ca)

Kalsium adalah unsur yang memiliki kelarutan yang sangat rendah dalam aluminium dan membentuk senyawa intermetalik  $\text{CaAl}_4$ . Group aluminium paduan yang memiliki sifat superplastik yang mengandung 5% Ca dan 5% Zn. Kalsium akan berkombinasi dengan silikon membentuk  $\text{CaSi}_2$ , dimana senyawa ini tidak akan terlarut dalam aluminium. Akibatnya adalah terjadinya peningkatan konduktivitas dari paduan tersebut. Pada paduan Al-Mg-Si, kalsium akan menurunkan pengerasan penuaan. Efeknya pada paduan Al-Si adalah untuk meningkatkan kekuatan dan menurunkan elongasi namun tidak membuat paduan ini mampu mengalami perlakuan panas.

## 9. Hidrogen

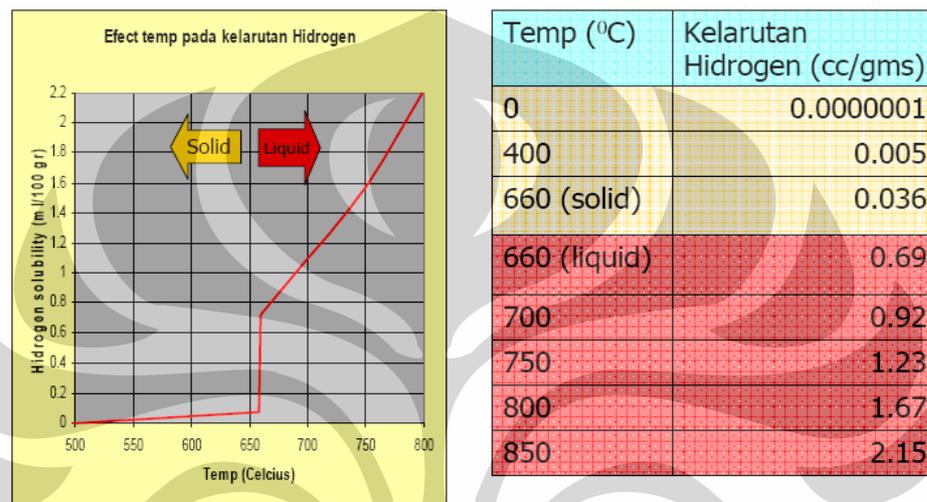
Hidrogen adalah satu-satunya gas yang dapat larut pada aluminium dan paduannya. Hal ini dikarenakan afinitas kelarutan hidrogen pada rentang temperatur yang tinggi sesuai persamaan reaksi :



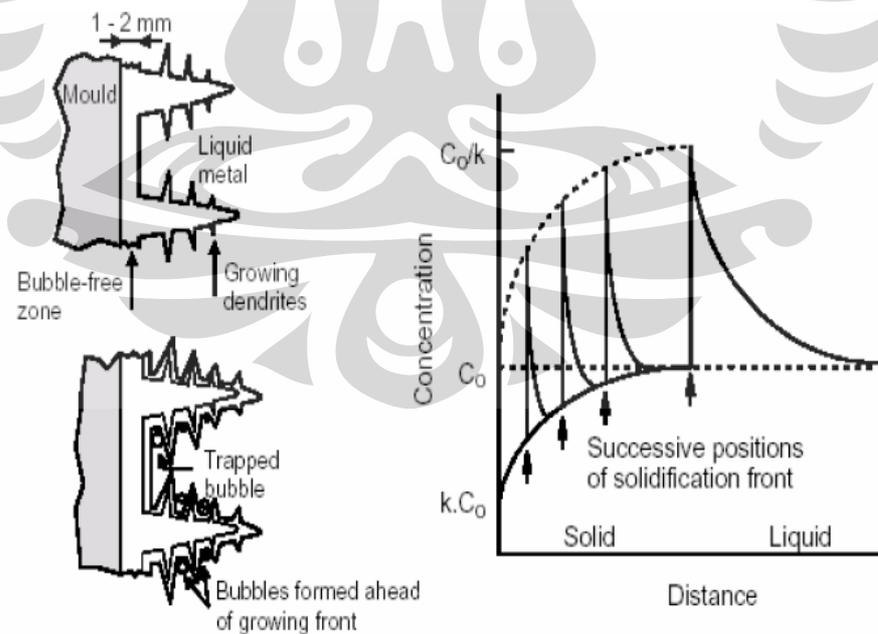
Di dalam cairan aluminium, hidrogen larut secara atomik. Selama proses pendinginan dan pembekuan, hidrogen berlebih yang terdapat pada aluminium cair akan mengendap membentuk molekul dan akhirnya mengakibatkan pembentukan porositas, baik porositas primer maupun sekunder. Proses pengendapan hidrogen mengikuti hukum nukleasi dan pertumbuhan fasa selama proses pembekuan. Semakin tinggi temperatur paduan aluminium, kelarutan hidrogen di dalam paduan juga semakin meningkat, seperti yang diperlihatkan dari kurva kelarutan hidrogen-temperatur pada Gambar 2.4. Sedangkan untuk letak presipitasi hidrogen pada larutan aluminium terdapat pada daerah SDAS (jarak lengan *dendrite* kedua), yang terdapat pada Gambar 2.5. Pada gambar ini dapat kita lihat letak presipitat hidrogen yang dapat menyebabkan terjadinya penyusutan akibat bertumpuknya porositas pada logam.

Hal ini akan mengakibatkan hidrogen yang tidak larut membentuk kumpulan molekul  $\text{H}_2$  menjadi porositas gas. Porositas gas atau porositas

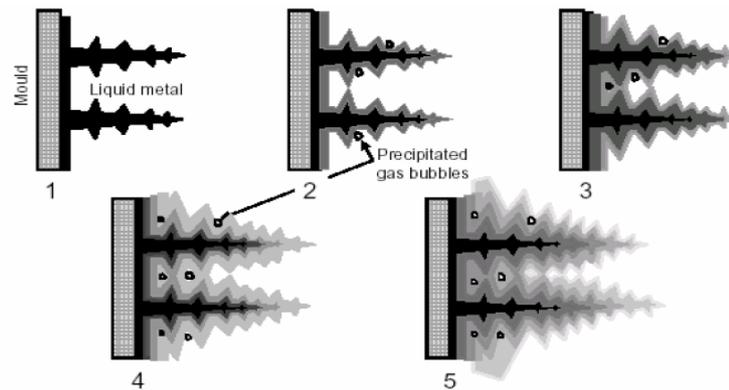
yang disebabkan oleh gas mempengaruhi beberapa sifat mekanik dari aluminium tuang antara lain menurunkan kekuatan tarik dan elongasi serta menurunkan kekuatan fatik dan impak. Bahkan, porositas yang saling terhubung akan menyebabkan bocor dalam kondisi dibawah tekanan serta memicu terjadinya retak panas. Proses terjadinya presipitasi hidrogen di daerah DAS (*Dendrite Arm Spacing*) dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.4 Kurva kelarutan hidrogen<sup>[17]</sup>



Gambar 2.5 Letak presipitasi hidrogen pada larutan aluminium terdapat pada daerah SDAS (*Secondary Dendrite Arm Spacing*)<sup>[18]</sup>



**Gambar 2.6** Proses presipitasi hidrogen pada daerah DAS (*Dendrite Arm Spacing*)<sup>[18]</sup>

Biasanya, hidrogen masuk kedalam aluminium melalui atmosfer lingkungan yang lembab, pemakaian fluks yang tidak optimal, krusibel dan batu tahan api yang basah dan memiliki banyak pori, peralatan yang basah seperti alat pengaduk, pengambil gumpalan bahkan bisa dari bahan baku seperti sisa ingot aluminium basah, kotor, dan berminyak. Pencegahan terjadinya hidrogen berlebih pada aluminium tuang dapat dilakukan dengan menghindari sumber-sumber masuknya hidrogen, menghindari pemanasan lebih cairan aluminium dan melakukan proses pemasukan gas dengan penginjeksi gas-gas stabil seperti nitrogen (N) atau argon (Ar) ke dalam cairan Al.

Selain itu penambahan unsur paduan juga berpengaruh terhadap kelarutan gas hidrogen dalam aluminium. Unsur paduan seperti silikon dan atau tembaga dapat menurunkan kelarutan gas hidrogen karena dapat menghambat terjadinya reaksi penguraian uap air. Hal yang sebaliknya diberikan oleh penambahan unsur paduan magnesium karena magnesium bertindak sebagai katalisator reaksi penguraian uap air oleh aluminium cair.

#### 10. Karbon (C)

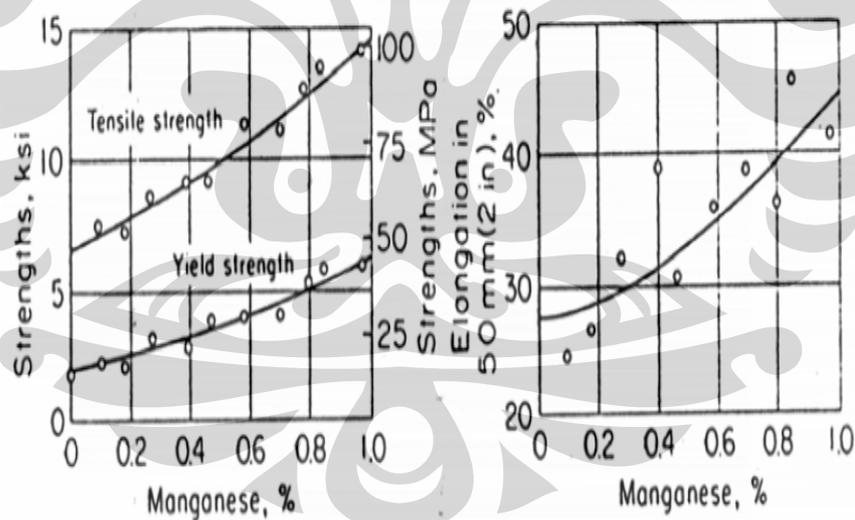
Biasanya karbon terdapat pada aluminium sebagai pengotor dalam bentuk *axycarbide* dan karbida yang biasanya ditulis dengan lambang  $Al_4C_3$ , namun, pembentukan karbida dengan *impurities* lain dapat saja terjadi, misalnya dengan titanium.  $Al_4C_3$  membusuk dengan keberadaan air dan uap air, hal ini akan memicu lubang-lubang kecil pada permukaan.

### 11. Magnesium (Mg)

Unsur magnesium merupakan unsur yang berperan dalam peningkatan kekuatan dan kekerasan dalam paduan aluminium silikon yang dilakukan perlakuan panas dan umum digunakan dalam paduan aluminium silikon yang mengandung tembaga, nikel, dan unsur lainnya. Fasa  $Mg_2Si$  meningkatkan kekuatan hingga batas kelarutan 0.7 % Mg, dimana dengan kadar lebih dari itu, tidak ada penambahan kekuatan yang signifikan. Paduan aluminium silikon kekuatan tinggi mempunyai kadar magnesium antara 0.4-0.07 %.

### 12. Mangan (Mn)

Adanya unsur mangan dapat membentuk fasa intermetallik  $MnAl_6$  yang dapat meningkatkan kekuatan logam. Mangan juga dapat digunakan untuk memudahkan dilakukan pembuatan kutub positif dan negatif serta penyelesaian kimia. Gambar 2.7 menjelaskan tentang pengaruh Mn terhadap paduan aluminium.



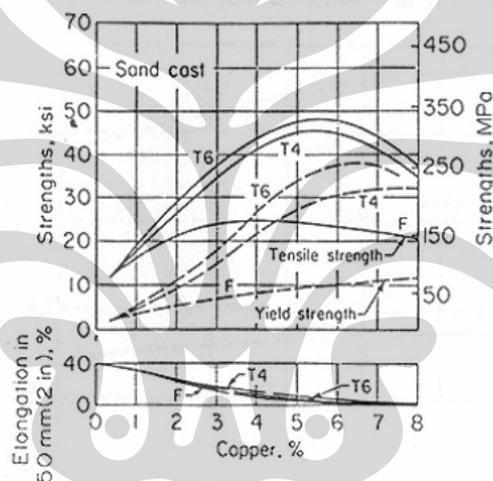
**Gambar 2.7** Pengaruh Mn terhadap paduan aluminium<sup>[3]</sup>

### 13. Nikel (Ni)

Unsur Nikel umumnya digunakan bersama dengan tembaga untuk meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi. Nikel juga mengurangi koefisien ekspansi thermal.

#### 14. Tembaga (Cu)

Unsur tembaga sebagai paduan akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam saat pengecoran dan saat dilakukan perlakuan panas. Paduan yang mengandung 4-5.5 % Cu mudah dilakukan perlakuan panas dan memiliki kekuatan yang tinggi. Tembaga secara umum mengurangi ketahanan terhadap korosi dan meningkatkan kerentanan terhadap korosi yang diakibatkan oleh pemberian tekanan. Tembaga juga mengurangi ketahanan terhadap retak panas dan meningkatkan kecenderungan untuk terjadinya penyusutan interdendritik. Untuk dapat melihat pengaruh penambahan tembaga kepada paduan aluminium dapat dilihat pada Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Pengaruh Cu terhadap paduan aluminium<sup>[3]</sup>

#### 15. Stronsium (Sr)

Unsur stronsium digunakan sebagai unsur modifikasi dalam pengecoran paduan aluminium silikon. Stronsium memodifikasi fasa silikon primer agar menjadi lebih halus.

#### 16. Silikon (Si)

Unsur silikon mempunyai peran yang sangat penting dalam peningkatan kekuatan dari aluminium hasil pengecoran. Penambahan unsur silikon meningkatkan fluiditas, ketahanan terhadap retak panas dan karakteristik *feeding*. Logam aluminium komersil memiliki kadar silikon hingga 30 % Si. Meningkatnya kadar silikon menyebabkan meningkatnya

fluiditas dalam mengisi cetakan tipis. Paduan aluminium silikon biasanya lebih tahan terhadap retak akibat proses solidifikasi dan memiliki mampu cor yang sangat baik. Silikon juga mengurangi berat jenis dan koefisien ekspansi thermal. Paduan Al-Si ini dibagi menjadi tiga daerah utama dalam diagram fasanya yaitu komposisi hipoeutektik; dengan kadar Si yang dipadukan  $\pm$  dibawah 11.7 %, eutektik; dengan kadar Si yang dipadukan  $\pm$  11.7-12.2 % dan hipereutektik; penambahan Si diatas 12.2 % seperti yang terlihat pada Gambar 2.3.

Fasa utama dari ketiga komposisi paduan ini adalah fasa  $\alpha$ -Al yang mengandung banyak Al. Perbedaan antara ketiga daerah ini terletak pada fasa-fasa pendamping matriks  $\alpha$ -Al, yaitu fasa silikon primer, aluminium primer, maupun fasa eutektik. Pada komposisi hipoeutektik, sesuai dengan diagram fasanya, maka aluminium dari keadaan cair akan membeku mengikuti garis lurus sesuai dengan penurunan temperatur sesuai dengan persamaan reaksi berikut ini :

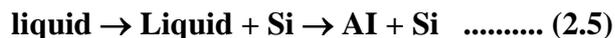


yang akan menghasilkan fasa Al primer yang berdampingan dengan fasa  $\alpha$ -Al dan fasa eutektik sebagai fasa tambahannya.

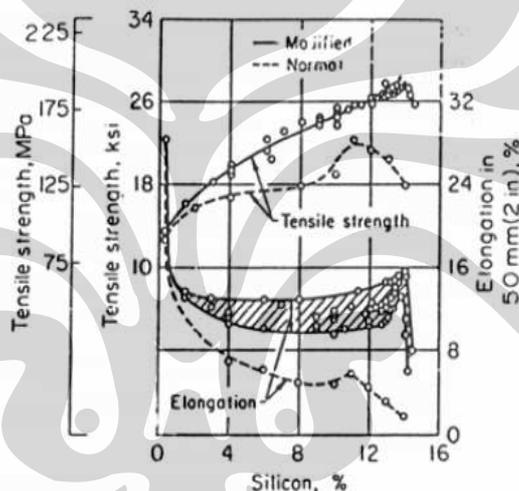
Komposisi eutektik, pembekuan Al liquid tidak harus melalui proses pembekuan fasa cair-padat seperti pada pembekuan hipoeutektik melainkan dapat langsung membeku. Skema pembekuannya sesuai persamaan berikut :



bentuk akhir fasa ini adalah fasa eutektik. Sedangkan untuk komposisi hypereutektik, proses pembekuan kembali mengikuti fasa liquid + Si terlebih dahulu sebelum akhirnya membeku menjadi fasa Al + Si dimana fasa terakhirnya memiliki struktur yang kaya akan silikon primer dengan fasa eutektik sebagai struktur tambahan sesuai dengan skematis berikut :



Komposisi hipereutektik ini menghasilkan kristal silikon primer yang menyebabkan paduan aluminium menjadi keras, mempunyai ketahanan aus yang baik serta ekspansi thermal yang rendah sehingga cocok untuk aplikasi temperatur tinggi seperti piston seperti pada Gambar 2.9. Namun, mampu mesinnya menjadi kurang baik. Secara umum, kandungan optimum dari silikon dapat ditentukan berdasarkan proses pengecorannya. Kadar optimum Si untuk proses pengecoran dengan pendinginan lambat seperti investment dan cetakan pasir adalah 5-7 % sedangkan untuk proses cetakan pengecoran adalah 8-12 %.



**Gambar 2.9** Pengaruh Si terhadap paduan aluminium<sup>[3]</sup>

Jika unsur silikon yang digunakan bersamaan dengan penambahan sejumlah AlTiB yang bertindak sebagai penghalus butir, maka kadar silikon yang lebih dari 2 wt. % akan dapat memicu efek *poisoning* terhadap keefektifan TiAl<sub>3</sub> sebagai inoculan. Hal ini telah diteliti oleh Qiu dan Taylor, yang menyatakan bahwa keefektifan TiAl<sub>3</sub> yang bertindak sebagai inoculan atau nuklean sebagai tempat tumbuh kisi kristal aluminium akan terganggu oleh hadirnya senyawa Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> yang menggantikan kisi kristal aluminium. Penelitian yang dilakukan berdasarkan atas kesesuaian kisi kristal antar senyawa TiAl<sub>3</sub>, Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, aluminium dan TiB<sub>2</sub>. Oleh karena itu, walaupun TiAl<sub>3</sub> telah mengalami

efek *poisoning* dikarenakan kadar Si yang lebih dari 2 wt. %, namun partikel  $TiB_2$  masih dapat menjalankan tugasnya sebagai inoculan.

#### 17. Titanium (Ti)

Titanium digunakan sebagai penghalus butir, biasanya dikombinasikan dengan unsur boron. Umumnya titanium diberikan pada kadar yang lebih dari yang diberikan untuk penghalusan butir untuk mengurangi kecenderungan terhadap retak panas dan penyusutan panas. Biasanya unsur titanium ini dengan aluminium membentuk senyawa  $Al_3Ti$ , atau dengan boron membentuk senyawa  $TiB_2$ .

#### 18. Timbal (Pb)

Timbal bisa digunakan sebagai paduan pada konsentrasi lebih dari 0.1 wt. % untuk meningkatkan sifat mampu mesinnya.

#### 19. Timah (Sn)

Timah sangat efektif digunakan dalam paduan aluminium karena meningkatkan sifat antifriksi dan karenanya sering digunakan pada aplikasi roda gigi. Biasanya, penambahan unsur Sn pada aluminium tuang mencapai 25 %. Selain itu, penambahan unsur ini juga meningkatkan sifat mampu mesinnya.

Pemilihan komposisi penambahan paduan berdasarkan :

- 1) Sifat mampu cornya (sifat kompleks yang bergantung pada kecenderungan dalam membentuk *dross*, geometri cetakan, dan karakterisasi solidifikasi paduan).
- 2) Sifat mekanik yang dibentuk.
- 3) Pemakaian sifat-sifat lainnya sesuai dengan sifat yang diinginkan.

Sifat mampu cor paduan aluminium dapat ditentukan dengan menggunakan cetakan yang dapat digunakan untuk menentukan fluiditas, retak panas, dan karakterisasi penyusutan yang terbentuk. Pada Tabel 2.8 dapat kita lihat berbagai kelarutan padat maksimum berbagai elemen pada aluminium cair<sup>[18]</sup>.

**Tabel 2.8** Kelarutan berbagai elemen pada aluminium cair<sup>[3]</sup>

Elemen	Temperatur (°C)	Kelarutan padat maksimum (wt. %)
Cadmium	649	0.4
Cobalt	657	<0.02
Tembaga	548	5.65
Kromium	661	0.77
Germanium	424	7.2
Besi	655	0.05
Lithium	600	4.2
Magnesium	450	17.4
Mangan	658	1.82
Nikel	640	0.04
Silikon	577	1.65
Perak	566	55.6
Timah	228	0.06
Titanium	665	1.3
Vanadium	661	0.4
Seng	443	70.0
Zirconium	660.5	0.28

## 2.6 PENGARUH MIKROSTRUKTUR TERHADAP SIFAT MEKANIS

Komposisi material, kondisi solidifikasi, kecepatan pembekuan dan perlakuan panas yang dialami oleh material merupakan beberapa hal yang sangat mempengaruhi struktur mikro yang dapat terbentuk dari suatu paduan aluminium. Struktur mikro yang terbentuk dapat mempengaruhi sifat fisik dan sifat mekanik dari suatu logam hasil pengecoran seperti kekuatan, ketahanan impak, kekarasan dan lainnya. Adapun bagian-bagian dari struktur mikro yang sangat berpengaruh terhadap sifat fisik dan sifat mekanik pada aluminium tuang adalah<sup>[1]</sup>:

1. Ukuran, bentuk, dan distribusi fasa intermetalik
2. *Dendrite arm spacing* (DAS)
3. Ukuran dan bentuk butir yang terbentuk
4. Modifikasi eutektik dan penghalusan fasa primer

### 2.6.1 Fasa Intermetalik

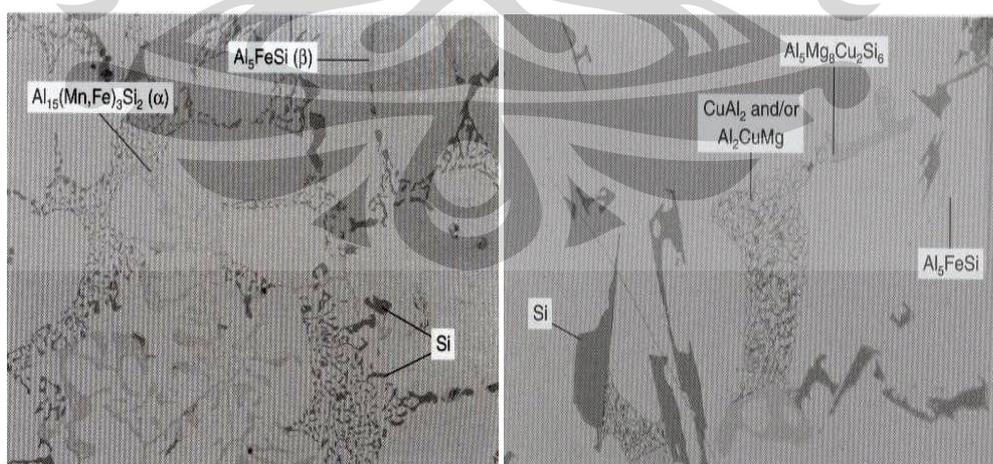
Fasa intermetalik adalah fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro paduan aluminium yang terbentuk sebagai akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Ada atau tidaknya fasa ini dalam paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi kimia dan mekanisme pembekuan yang terjadi. Keberadaan fasa intermetalik ini dapat menyebabkan terjadinya pengurangan sifat keuletan pada paduan aluminium silicon karena sifatnya yang getas dan dapat menjadi retak awal pada paduan aluminium tersebut. Fasa intermetalik ini

terbentuk akibat adanya unsur tambahan yang dapat membentuk oksida dalam paduan aluminium serta karena adanya overmodifikasi akibat penambahan modifier pada paduan aluminium tersebut<sup>[11]</sup>. Adanya pengontrolan laju pembekuan dan pendinginan pasca solidifikasi menimbulkan distribusi ukuran fasa intermetalik yang seragam sehingga sangat berpengaruh terhadap morfologinya. Laju pembekuan yang lambat menyebabkan fasa intermetalik yang kasar dan terdapat konsentrasi fasa kedua pada batas butir. Pembentukan fasa dipengaruhi oleh difusi sehingga semakin cepat laju pembekuan maka distribusi ukuran partikel akan semakin merata dan larutan padat semakin banyak<sup>[3]</sup>.

Pada reaksi solidifikasi paduan Al-Si hipoeutektik dan eutektik terjadi beberapa mekanisme pengendapan fasa<sup>[11]</sup>, antara lain:

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

Pengendapan fasa Mn dan Fe juga sering terjadi pada paduan aluminium silicon. Fasa yang paling sering terbentuk pada paduan Al-Si adalah fasa  $Al_5FeSi$  dan  $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$  serta pada akhir solidifikasi terjadi pengendapan fasa  $Mg_2Si$  dan  $Al_2Cu$ <sup>[10]</sup>. Pada Gambar 2.10 menjelaskan tentang fasa-fasa yang dapat terbentuk pada paduan aluminium AC4B. Sedangkan tahapan pengendapan fasa pada paduan Al-Si hipoeutektik terdapat pada Tabel 2.9.



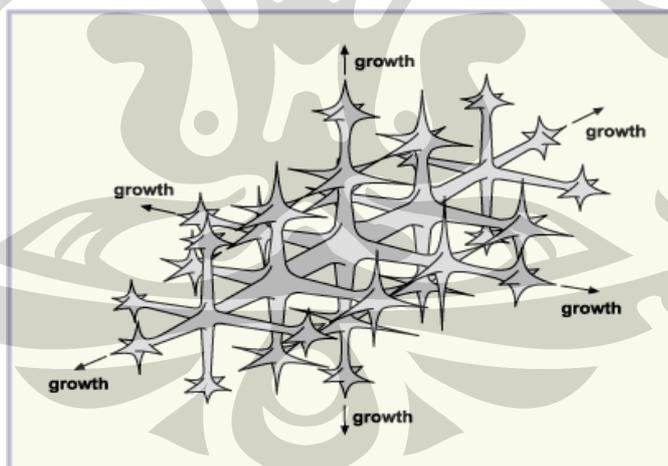
**Gambar 2.10** Fasa-fasa yang terbentuk pada paduan aluminium AC4B<sup>[17]</sup>

**Tabel 2.9** Tahapan pengendapan fasa pada paduan Al-Si hipoeutektik<sup>[10]</sup>

T (°C)	Fasa yang mengendap	Jenis Fasa	Keterangan	Reaksi
	$\alpha$ -aluminium		Awal solidifikasi dan pembentukan fasa $\alpha$ -aluminium	
650	$Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ primer (endapan)	<i>Pre-dendritic</i>	Pengendapan fasa yang mengandung Fe (titik koherensi <i>dendrite</i> )	$L \rightarrow Al + Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ $L \rightarrow Al + Al_5FeSi$
600	Dendrit aluminium dan $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ dan / atau $Al_5FeSi$	<i>Dendritic</i> <i>Post-dendritic</i> <i>Pre-eutectic</i>	Awal reaksi utama eutektik	$L \rightarrow Al + Si + Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ $L \rightarrow Al + Si + Al_5FeSi$
550	Al + Si eutektik dan $Al_5FeSi$ $Mg_2Si$	<i>Eutectic</i> <i>Co-eutectic</i>	Pengendapan fasa $Al_2Cu$	$Al + Al_2Cu + Si + Al_5FeSi$
500	$Al_2Cu$ dan fasa yang lebih kompleks $Al_2Cu$ dan fasa yang lebih kompleks	<i>Post-dendritic</i>	Pengendapan fasa kompleks Akhir dari solidifikasi	$L \rightarrow Al + Al_2Cu + Si + Al_5Mg_8Cu_2Si_6$

### 2.6.2 Dendrite Arm Spacing (DAS)

Struktur dendrit merupakan suatu struktur yang khas pada produk hasil pengecoran. Struktur dendrit terbentuk pada saat kecepatan *interface* cepat sehingga terbentuk struktur yang bercabang cabang, umumnya mengikuti arah kristalografi tertentu yang dapat dilihat pada Gambar 2.11<sup>[11]</sup>.

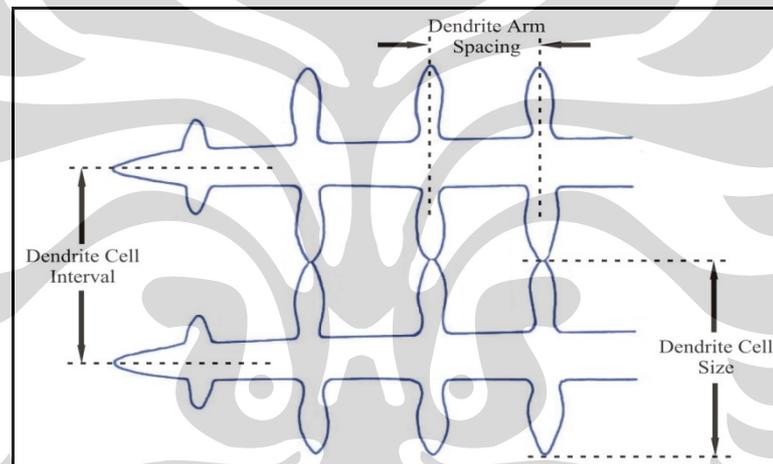


**Gambar 2.11** Struktur *dendrite* yang sedang tumbuh<sup>[10]</sup>

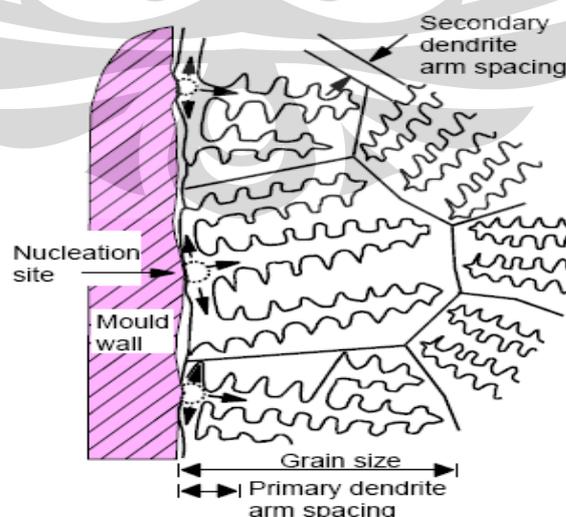
Ada beberapa hal penting yang menjadi acuan dalam menjelaskan karakteristik dendrite terdapat dalam Gambar 2.12, antara lain:

1. Jarak lengan dendrit, jarak antar lengan sekunder *dendrite*.
2. Jarak sel dendrit, jarak antara garis sumbu dendrit yang saling berdekatan.
3. Ukuran sel dendrit, lebar dendrit.

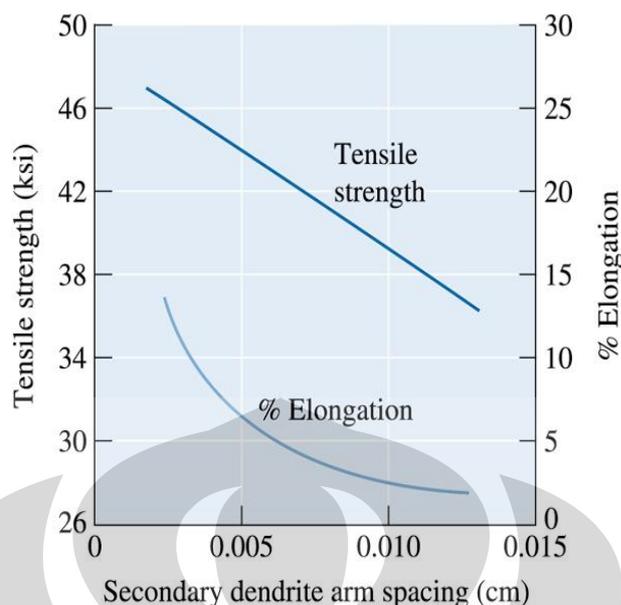
Jarak lengan dendrit atau *dendrite arm spacing* (DAS) ini dipengaruhi oleh kecepatan proses pembekuan pada pengecoran logam. DAS ini dihitung dari tengah cabang dendrit ke tengah cabang dendrit yang lain. Nilai DAS ini sangat berpengaruh terhadap sifat fisis dan mekanis pada suatu paduan logam. Nilai DAS yang semakin besar mengindikasikan struktur mikro yang kasar sehingga dapat disimpulkan bahwa sifat mekanis yang terbentuk tidak begitu baik. Sedangkan nilai DAS yang kecil mengindikasikan bahwa struktur mikro yang terbentuk halus sehingga sifat mekanis yang dihasilkan cukup baik<sup>[12]</sup>. Sedangkan Gambar 2.13 menjelaskan tentang mekanisme pembentukan DAS. Gambar 2.14 menjelaskan tentang pengaruh *dendrite arm spacing* (DAS) terhadap sifat mekanis paduan aluminium AC4B.



Gambar 2.12 Sketsa geometris sel dendrit<sup>[17]</sup>



Gambar 2.13 DAS (*Dendrite Arm Spacing*)<sup>[13]</sup>



Gambar 2.14 Pengaruh *Dendrite Arm Spacing* terhadap sifat mekanis<sup>[12]</sup>

### 2.6.3 Ukuran dan bentuk butir

Pada umumnya, terdapat banyak butir dalam struktur mikro suatu logam yang memiliki orientasi berbeda antara satu sama lain. Butir-butir ini memiliki bentuk dan ukuran masing-masing, tergantung dari tempatnya tumbuh, apakah dekat dengan permukaan cetakan maupun jauh dari permukaan cetakan sebagai media pembekuan. Semakin jauh jaraknya, maka struktur yang terbentuk dapat berupa kecil-kecil sedangkan apabila dekat jaraknya dengan permukaan cetakan, maka butir yang terbentuk dapat berupa butir kecil hasil pendinginan atau batang (perpanjangan butir kecil hasil pendinginan)<sup>[11]</sup>.

Bentuk dan ukuran butir-butir ini sangat berpengaruh terhadap sifat mekanis logam itu sendiri. Bentuk butir yang halus dan berbentuk kecil-kecil sangat diinginkan dalam struktur mikro suatu logam hasil pengecoran karena dapat menghasilkan kekuatan dan keuletan yang cukup baik. Butir yang berbentuk *columnar* atau kasar tidak begitu disukai karena dapat menurunkan sifat mekanis suatu logam. Bentuk dan ukuran butir dapat dibentuk dengan cara<sup>[11]</sup>, antara lain :

1. Pengontrolan laju pembekuan.
2. Variasi komposisi paduan yang akan digunakan.
3. Penambahan inoculan seperti penghalus butir yang dapat digunakan untuk membentuk inis butir yang heterogen.

#### 2.6.4 Modifikasi eutektik dan penghalusan fasa primer

Proses proses modifikasi didefinisikan sebagai proses penambahan unsur tertentu yang dapat merubah struktur mikro eutektik Si dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*<sup>[13]</sup>. Elemen modifikasi yang berasal dari unsur-unsur golongan IA, IIA dan unsur tanah jarang seperti Stronsium (Sr) dan Sodium (Na) untuk paduan Al-Si Hipoeutektik, sedangkan Fosfor (P) dan Antimoni (Sb) untuk paduan Al-Si Hipereutektik<sup>[13]</sup>.

Pada umumnya, penambahan unsur modifikasi pada konsentrasi yang sangat kecil yaitu berkisar antara 0.01-0.02 wt. %<sup>[8]</sup>. Efektifitas dari perlakuan modifikasi dapat dilihat dari derajat dan lama waktu terlewat dingin saat proses solidifikasi. Secara umum tujuan dilakukannya modifikasi adalah untuk<sup>[8]</sup>:

1. Meningkatkan UTS dan keuletan
2. Meningkatkan kekuatan impak dan ketangguhan
3. Meningkatkan kekuatan fatik
4. Sifat mampu mesin menjadi lebih baik
5. Kecenderungan terhadap retak panas rendah
6. Meningkatkan fluiditas

Proses penghalusan fasa primer atau penghalusan ukuran butir primer aluminium selama pembekuan merupakan salah satu faktor penting yang dapat memberikan pengaruh cukup besar terhadap efek peningkatan sifat fisik dan mekanik dari logam hasil pengecoran. Butir-butir fasa yang terbentuk terdiri dari dendrit-dendrit yang berawal dari nukleus dimana ukuran butir menentukan sifat mekanis logam yang dihasilkan. Butir kecil akan meningkatkan sifat mekanis sedangkan butir besar tidak mengalami peningkatan. Adapun efek dari penghalusan fasa primer ini antara lain :

- 1) Kekuatan tarik dan elongasi akan meningkat.
- 2) Distribusi porositas merata.
- 3) Ukuran butir akan mengecil.
- 4) Ukuran butir yang kecil sehingga dapat mendistribusi intermetalik dan menurunkan retak panas.

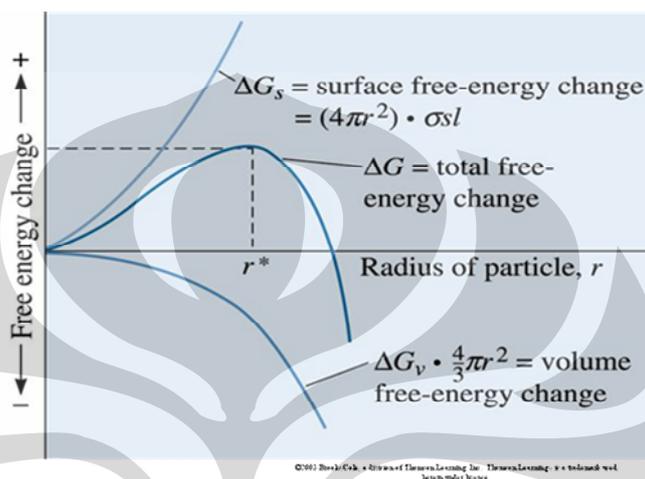
## 2.7 PROSES PEMBEKUAN LOGAM

Apabila logam murni perlahan-lahan didinginkan, maka pembekuan terjadi pada temperatur, konstan temperatur ini disebut sebagai titik beku, yang khusus bagi logam. Sebagai contoh, titik beku tembaga 1083°C, perak 961°C, aluminium 660°C dan timah 232°C. Dalam proses pembekuan logam cair, permulaan tumbuhlah inti-inti kristal. Kemudian kristal-kristal tumbuh disekeliling inti tersebut, dan inti lain yang baru muncul pada saat yang sama. Akhirnya seluruhnya ditutupi oleh butir kristal sampai logam cair habis. Ini mengakibatkan bahwa seluruh logam menjadi susunan kelompok-kelompok butir kristal dan batas-batasnya yang terjadi diantaranya, dan disebut sebagai batas butir. Ukuran butir kristal tergantung pada laju pengintian dan pertumbuhan inti. Apabila laju pertumbuhan lebih besar dari laju pengintian, maka akan didapatkan kelompok butir-butir kristal yang besar dan apabila laju pengintian lebih besar dari laju pertumbuhan ini maka akan didapatkan kelompok butir-butir kristal halus. Adapun proses-prosesnya, yaitu :

1. Keadaan cair.
2. Inti timbul.
3. Kristal tumbuh disekeliling inti, inti baru timbul.
4. Kristal menyentuh tetangganya menghentikan pertumbuhannya.
5. Pembekuan lengkap menjadi struktur berkrystal banyak.

Pembekuan coran dimulai dari bagian logam yang bersentuhan dengan cetakan, yaitu ketika panas dari logam cair diambil oleh cetakan sehingga bagian logam yang bersentuhan dengan cetakan itu mendingin sampai titik beku, dimana kemudian inti-inti kristal tumbuh. Bagian dalam dari coran mendingin lebih lambat daripada bagian luar, sehingga kristal-kristal tumbuh dari inti asal mengarah ke bagian dalam coran dan butir-butir kristal tersebut berbentuk panjang-panjang seperti kolom, yang disebut sebagai struktur kolom. Struktur ini muncul dengan jelas apabila *range* temperatur yang besar terjadi pada permukaan coran besar, seperti pada pengecoran dengan cetakan logam. Sebaliknya pengecoran dengan cetakan pasir menyebabkan perbedaan temperatur yang kecil

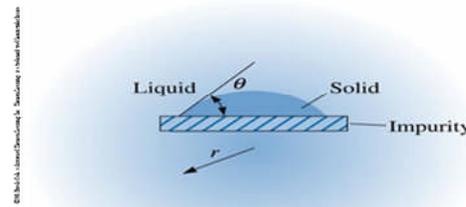
dan membentuk struktur kolom yang tidak jelas. Bagian tengah coran mempunyai perbedaan temperatur yang kecil sehingga merupakan susunan dari butir-butir kristal segi banyak dengan orientasi yang sembarang. Gambar 2.15 menjelaskan energi bebas dari sistem *solid-liquid* dengan perubahan ukuran pada fasa *solid* (energi kritis).



**Gambar 2.15** Energi bebas dari sistem *solid-liquid* dengan perubahan ukuran pada fasa *solid* (energi kritis)<sup>[16]</sup>

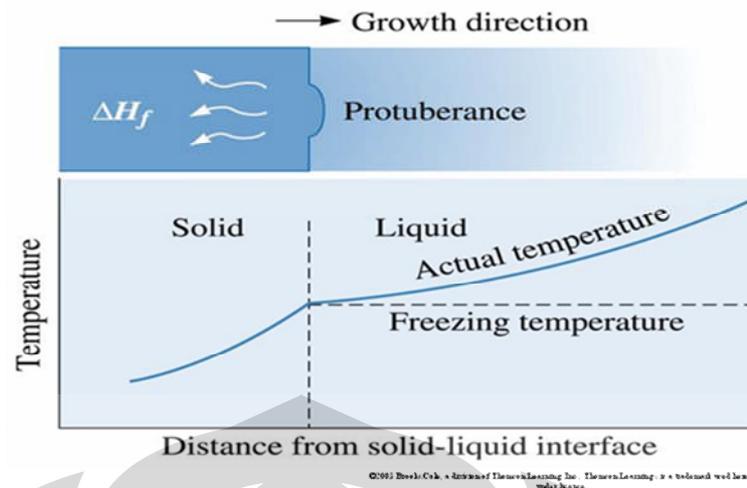
Produk dari suatu benda tuang sangat tergantung dari proses pembekuannya, oleh karena itu fenomena pembekuan dari tuangan dan variabel-variabel yang mempengaruhi struktur akhir benda tuang selama proses pembekuannya perlu diperhatikan. Pada waktu terjadi pembekuan atau pencairan, logam berada pada dua fasa sekaligus, yaitu fasa padat dan fasa cair. Fasa cair memiliki susunan yang tidak teratur apabila didinginkan mendekati temperatur pembekuannya maka akan terbentuk sekelompok atom yang bergabung dan kedudukannya teratur dimana kelompok ini makin lama makin banyak dan juga akan berkembang (inti) menjadi butir (padat). Perubahan fasa selalu menuju pada energi bebas yang terendah, perubahan fasa cair ke fasa padat suatu logam disebabkan perubahan logam cair menuju kondisi yang lebih stabil dengan berkurangnya energi bebas. Energi bebas dan energi ikatan dapat terjadi secara serentak dalam bentuk berlainan, dan pada akhirnya dapat diubah ke dalam bentuk panas. Kandungan panas dalam sistem tersebut dapat dihitung berdasarkan unit thermal. Energi bebas Gibbs dapat dijelaskan bahwa dalam kondisi tertentu energi

dapat diubah dan dilepaskan tanpa perubahan temperatur<sup>[16]</sup>. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 2.16 dan 2.17.



**Gambar 2.16** Pembentukan batas muka saat *solid* terbentuk dari *liquid*<sup>[16]</sup>

Beda energi antara fasa padat dengan fasa cair menghasilkan beda energi volume ( $\Delta G_v$ ) yang bernilai negatif. Saat pembentukan fasa padat tersebut terbentuk suatu batas antar permukaan antara kedua fasa tersebut, permukaan ini memiliki energi bebas permukaan ( $\sigma$ ) sebagai pertumbuhan fasa *solid* yang bernilai positif. Apabila permukaan beku diperhatikan, setelah logam yang belum membeku dituang keluar dari cetakan pada waktu pendinginan, maka terdapat dua kasus berbeda bahwa permukaan yang terbentuk bisa halus atau kasar. Permukaan halus adalah kasus dari logam yang mempunyai daerah beku (yaitu perbedaan temperatur antara mulainya dan berakhirnya membeku) yang sempit, dan permukaan yang kasar adalah kasus dari logam yang mempunyai daerah beku yang lebar. Disamping itu, cetakan logam menyebabkan permukaan halus dan cetakan pasir menyebabkan permukaan kasar. Dalam kasus daerah beku yang lebar, Kristal-kristal dendrit tumbuh dari inti-inti dan akhirnya pembekuan berakhir pada keadaan bahwa dendrit-dendrit tersebut saling bertemu.



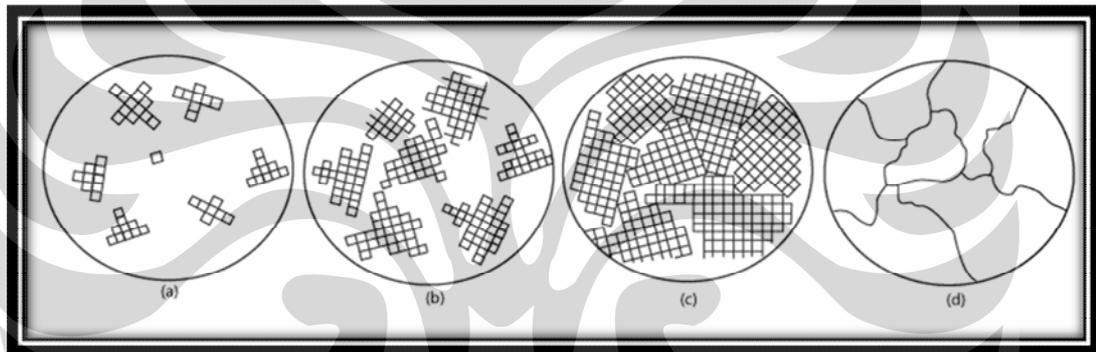
**Gambar 2.17** Panas laten berpindah saat melewati *interface* melalui fasa *solid*<sup>[18]</sup>

Apabila logam yang masih mencair dituang keluar cetakan pada waktu pendinginan, akan didapat permukaan yang kasar karena cairan di antara struktur dendrit mengalir keluar. Permukaan tersebut akan lebih kasar bagi perunggu dan besi cor putih karena mempunyai daerah beku yang lebar. Aluminium murni mebeku pada temperature tetap, tetapi panas pembekuan yang dibebaskan pada waktu membeku begitu besar sehingga permukaan bagian dalam menjadi kasar apabila dicor pada cetakan pasir, sedangkan baja karbon agak rendah (0.5-2.0%) mempunyai daerah beku yang sempit, sehingga permukaan tersebut diatas menjadi halus. Gambar 2.17 menjelaskan tentang panas laten berpindah saat melewati *interface* melalui fasa *solid*.

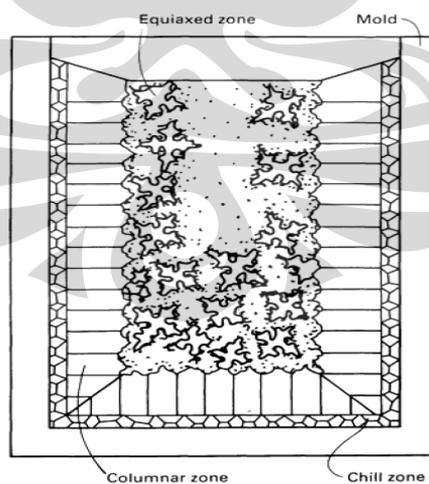
Pembekuan dari suatu coran maju perlahan-lahan dari kulit ke tengah. Jumlah waktu pembekuan dari kulit ke tengah sebanding lurus dengan  $V/S$ , yaitu perbandingan antara volume coran  $V$  dan luas permukaan  $S$  melalui mana panas dikeluarkan. Oleh karena itu, apapun bentuknya, umpamanya prisma, bujur sangkar, segitiga atau silinder, jumlah waktu pembekuannya kira-kira akan sama apabila harga  $V/S$  nya sama. Sebagai contoh, perpotongan dari dua bagian coran merupakan bagian yang besar dengan luas permukaan yang kecil dimana panas akan keluar lewat permukaan itu, dan selanjutnya cetakan dipanaskan sehingga laju penyerapan panas diperlambat. Oleh karena itu, waktu pembekuan bagian tersebut menjadi lama. Laju pertumbuhan lapisan beku dari suatu coran lebih cepat pada kulit dan lambat di bagian dalam, sedangkan kalau mempergunakan inti hal itu akan berubah. Kalau intinya kecil, maka inti dipanaskan dan tidak

banyak menyerap panas, sehingga pembekuan tidak maju dari kulit inti tersebut<sup>[16]</sup>. Gambar 2.18 menjelaskan tentang skema pembentukan logam, (a) inti mulai terbentuk, (b) butir mulai tumbuh, (c) butir mulai menumbuk satu sama lain dan (d) batas butir mulai terbentuk<sup>[8]</sup>.

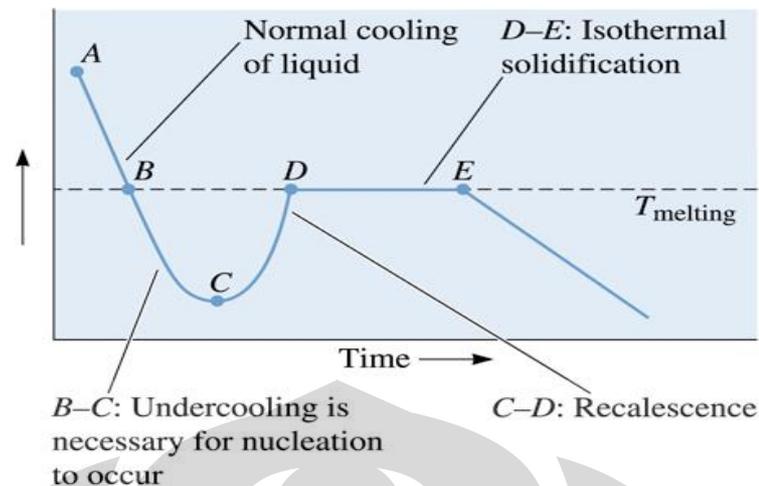
Pada proses pengecoran yang dilakukan pembekuan dimulai dari permukaan cetakan karena panas dari logam cair diserap oleh dinding cetakan. Logam cair yang kontak langsung dengan cetakan akan mengalami pembekuan terlebih dahulu karena suhu cetakan lebih rendah daripada logam cair. Hal ini menyebabkan inti-inti kristal tumbuh ke arah dalam cetakan. Kristal-kristal tumbuh dari inti asal mengarah ke bagian dalam coran dan butir-butir kristal tersebut berbentuk memanjang seperti kolom (lihat Gambar 2.19).



**Gambar 2.18** Skema pembekuan logam<sup>[8]</sup>

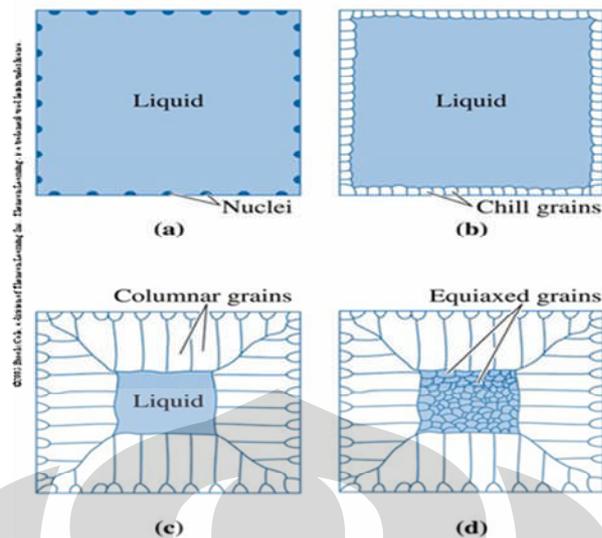


**Gambar 2.19** Skematis pembentukan mikrostruktur dalam pengecoran. Pembentukan terarah menyebabkan terbentuknya struktur kolomnar, sedangkan pada bagian tengah cetakan terbentuk struktur kecil-kecil<sup>[10]</sup>



**Gambar 2.20** Kurva pembekuan logam<sup>[8]</sup>

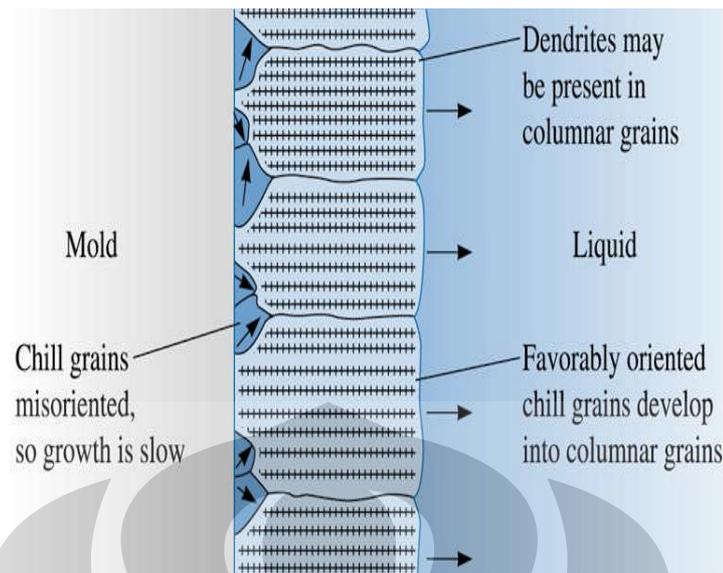
Gambar 2.20 menjelaskan tentang kurva pembentukan logam. Pada titik A, logam sudah membeku. Tetapi karena belum cukup bibit maka sistem menurunkan temperatur pada titik B (*undercooling*). Kemudian ketika bibit sudah cukup, maka logam mulai membeku dengan mengeluarkan panas. Sehingga temperatur naik sampai titik C lalu logam membeku seluruhnya. Ukuran butir kristal tergantung dari laju pengintian dan pertumbuhan inti. Jika laju pengintian lebih besar dari laju pertumbuhan maka akan didapatkan kelompok butir kristal halus. Namun jika laju pertumbuhan lebih besar dari laju pengintian maka akan didapatkan butir-butir kristal yang besar. Untuk dapat terjadi pembekuan perlu adanya jumlah bibit (nukleus) yang cukup. Oleh karena itu perlu dibuat pendinginan super agar jumlah bibit yang membeku cukup dan bibit tersebut tidak membeku lagi baru setelah bibit cukup temperatur akan naik kembali dengan bantuan sistem yang telah menyimpan panas mengeluarkan panasnya dan setelah seluruh panas keluar dari sistem temperatur akan kembali turun sampai logam cair benar-benar membeku<sup>[8]</sup>.



**Gambar 2.21** Mekanisme solidifikasi ; (a) nukleasi dimulai, (b) pembentukan *chill zone*, (c) pembentukan *columnar*, dan (d) pembentukan daerah *equiaxed*<sup>[16]</sup>

Gambar 2.21 menjelaskan tentang mekanisme solidifikasi pada proses pembekuan logam. Dari Gambar 2.21, kita dapat melihat bentuk mikrostruktur yang dihasilkan selama proses pembekuan berlangsung, antara lain :

- 1) *Chill zone*, daerah pendinginan cepat sehingga sering dihasilkan struktur yang berbutir halus tergantung dari perbedaan temperatur antara cetakan dan logam cair.
- 2) *Columnar zone*, daerah perpanjangan *chill* yang dikontrol oleh kecepatan perpindahan panas akibat adanya pertumbuhan kontinyu dari daerah *chill*.
- 3) *Equiaxed zone*, struktur yang berorientasi acak akibat adanya perbedaan temperatur antara *solid* dan *liquid* sudah sedemikian kecilnya sehingga pendinginan lanjut konstitusional menjadi efektif bagi proses nukleasi kristal-kristal baru.



**Gambar 2.22** Ilustrasi pembentukan butir pada bagian dekat dinding cetakan<sup>[12]</sup>

Pada proses pengecoran, struktur dendrit dapat berbentuk kecil-kecil maupun kolumnar, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.21. Pada saat logam cair dituang ke dalam cetakan, terbentuk nuklei pada bagian dinding cetakan, yang menyebabkan terbentuknya *equiaxed chilled zone*. Pembentukan daerah kolumnar pada bagian dekat dinding cetakan diakibatkan oleh berkumpulnya butir yang mempunyai orientasi yang sama sehingga terbentuk struktur kolumnar. Butir-butir pada bagian dekat dinding saling berkompetisi untuk tumbuh, sehingga hanya butir dengan orientasi tertentu saja yang dapat tumbuh, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.22.

## 2.8 MODIFIER

*Modifier* adalah unsur tertentu yang ditambahkan ke dalam paduan logam aluminium silikon dan berfungsi untuk merubah struktur mikro eutektik Si dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*<sup>[3]</sup>. Sedangkan untuk prosesnya disebut sebagai proses modifikasi silikon primer. Elemen modifikasi yang berasal dari unsur-unsur golongan IA, IIA dan unsur tanah jarang seperti Stronsium (Sr) dan Sodium (Na) untuk paduan Al-Si Hipoeutektik, sedangkan Fospor (P) dan Antimony (Sb) untuk paduan Al-Si Hipereutektik<sup>[3]</sup>. Elemen modifikasi biasa ditambahkan pada konsentrasi yang sangat kecil yaitu berkisar antara 0.01-0.02 wt. %<sup>[10]</sup>. Efektifitas dari perlakuan modifikasi dapat dilihat dari derajat dan lama

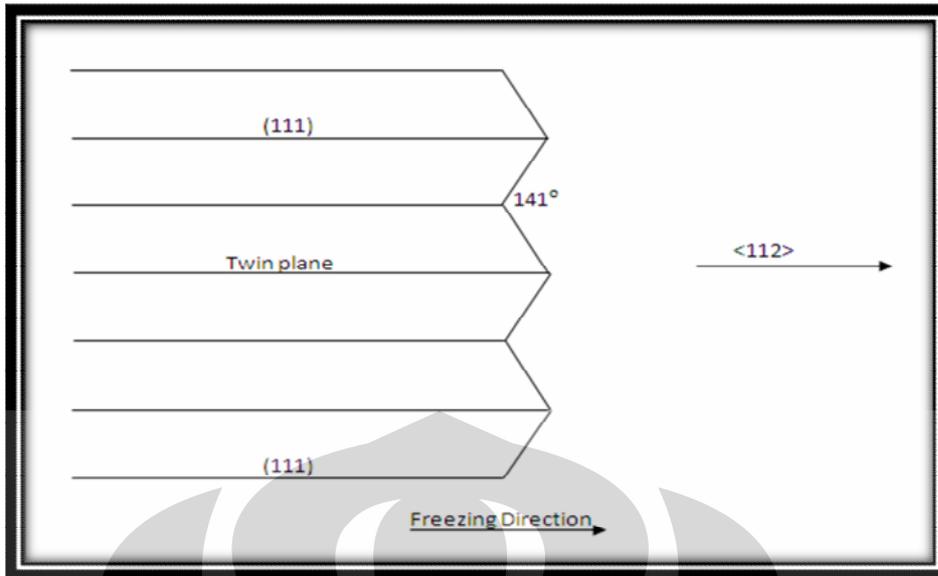
waktu *undercooling* saat proses solidifikasi. Secara umum tujuan dilakukannya modifikasi adalah untuk <sup>[5]</sup>:

1. Meningkatkan UTS dan keuletan.
2. Meningkatkan kekuatan impak dan ketangguhan.
3. Meningkatkan kekuatan fatik.
4. Sifat mampu mesin menjadi lebih baik.
5. Kecenderungan terhadap retak panas rendah.
6. Meningkatkan fluiditas.

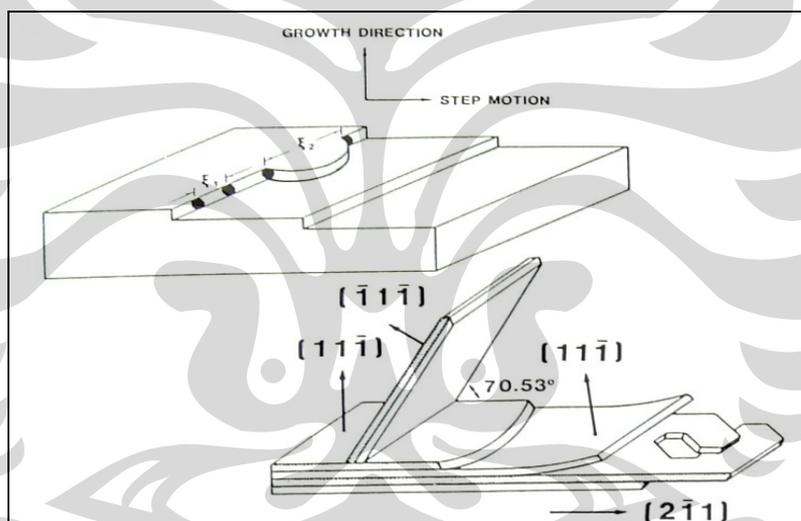
### 2.8.1 Mekanisme modifikasi

Dalam proses modifikasi, fasa silikon memiliki peranan penting dalam proses modifikasi. Silikon adalah unsur non-logam dan memiliki bentuk kristal pada paduan aluminium. Kristal silikon memiliki perilaku yang khusus saat berada dalam paduan Al-Si. Perilaku ini disebut perilaku *faceted manner* yang maksudnya ialah bahwa kristal silikon hanya memiliki arah kristalografi tertentu dalam pertumbuhannya<sup>[3]</sup>. Seperti pada Gambar 2.23 dan 2.24, kristal silikon memiliki arah bidang  $\langle 211 \rangle$ , dan arah pertumbuhan  $\langle 111 \rangle$ .

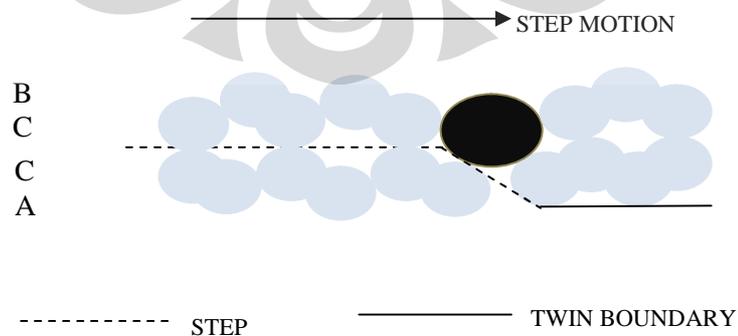
Kristal silikon juga memiliki sifat lain yang juga unik yaitu mudahnya terbentuk bidang kembar (berpasangan). Bidang ini merupakan salah satu bentuk cacat kristalografi yang dapat terbentuk pada saat sekumpulan atom silikon mengalami pergeseran posisi melewati suatu bidang kristalografi seperti terlihat pada Gambar 2.25<sup>[3]</sup>.



Gambar 2.23 Skema pertumbuhan *acicular* silikon kristal dari proses pembekuan tanpa modifikasi<sup>[3]</sup>



Gambar 2.24 Adsorpsi atom pengotor pada tahapan pertumbuhan kristal silikon yang menyebabkan terjadinya mekanisme *twinning* (kembaran)<sup>[10]</sup>



Gambar 2.25 *Impurities* dapat menyebabkan timbulnya *twinning* (hitam)<sup>[3]</sup>

Untuk mengetahui jarak *twinning* yang dihasilkan oleh setiap *modifier* berbeda, dapat kita lihat dari Tabel 2.10 dan besarnya porositas yang dihasilkan akibat adanya modifikasi dapat kita lihat dari Tabel 2.11<sup>[10]</sup>.

**Tabel 2.10** Ukuran dan jarak *twinning* pada kondisi *modified*<sup>[10]</sup>

Struktur	<i>Modifier</i>	Jarak kembaran saat konstanta pembekuan tetap (nm)
Acicular	<i>None</i>	400
Fiber	Na	5
Fiber	Sr	30
Fiber	Ba	30
Fiber	Ca	100
Fiber	Yb	50

**Tabel 2.11** Level porositas<sup>[10]</sup>

<i>Modifier</i>	Luas daerah (g/cm <sup>2</sup> )	Kepadatan (g/cm <sup>3</sup> )	Porositas (cm <sup>3</sup> )
Tanpa <i>modifier</i>	0.44	2.658	10.25
Stronsium	0.22	2.669	5.15
Sodium	0.39	2.661	9.3

Selanjutnya pada saat proses pembekuan, dapat diilustrasikan seperti bentuk anak tangga, dimana terjadi penambahan atom pada *interface solid-liquid* yang berlangsung pada setiap arah pertumbuhannya<sup>[3]</sup>. Akibat dari fenomena ini maka kemungkinan terjadinya cabang pada struktur kristal silikon adalah sangat kecil. Struktur silikon yang diperoleh dari peristiwa modifikasi adalah berbeda yang artinya telah terjadi mekanisme proses pertumbuhan kristal silikon yang berbeda pula. Pada saat digunakan elemen modifikasi, dihasilkan struktur kristalografi dengan jumlah bidang kembar yang lebih banyak daripada tanpa modifikasi<sup>[7]</sup>. Mekanisme modifikasi ini biasa disebut pertumbuhan kembaran secara mandiri, yang secara singkat adalah bahwa keberadaan elemen modifikasi seperti Sr mengganggu tahapan pertumbuhan dari kristal silikon, ini menyebabkan terjadinya kembaran<sup>[16]</sup>.

Pada literatur juga dijelaskan bahwa elemen yang mampu memodifikasi struktur silikon harus memiliki afinitas dan persenyawaan terhadap silikon<sup>[18]</sup>. Hal ini akan memfasilitasi adsorpsi Sr pada permukaan kristal silikon. Selain mempengaruhi tahapan pertumbuhan kristal silikon, unsur modifikasi juga menurunkan temperatur nukleasi dan temperatur pertumbuhan dari silikon<sup>[10]</sup>.

Penambahan stronsium juga berpengaruh terhadap temperatur solidifikasi eutektik, dan dapat diketahui bahwa terjadi penurunan temperatur nukleasi dan juga temperatur pertumbuhan sekitar  $10^{\circ}$  C, temperatur nukleasi mencapai titik minimum setelah  $\frac{1}{2}$  hingga 2 jam, setelah tercapai kondisi modifikasi optimum, grafik solidifikasi menjadi lebih datar. Setelah efek modifikasi memudar (efek pemudaran), temperatur nukleasi dan pertumbuhan kembali naik. Beberapa ahli menjelaskan tentang berbagai teori modifikasi yang dapat terjadi pada paduan aluminium, antara lain<sup>[18]</sup> :

#### 1. Teori Meracuni Pengintian (*Poisoning*).

Teori ini diperkenalkan oleh Guillet dan Search pada tahun 1922 yang meyakini bahwa perubahan pada struktur eutektik dengan penambahan sodium florida dan potasium florida bisa membersihkan oksida-oksida dan pengotor, seperti alumina dan silika yang akan mengalami efek penambahan fluks karena penambahan tersebut. Namun, Curran mengatakan bahwa sejak modifikasi aluminium silikon dengan memanfaatkan sodium metalik, pembersihan pengotor tidak berperan dalam proses modifikasi tersebut. Bagaimanapun, nukleasi lain seperti silikon yang tidak larut, aluminium *phospide*, silikon hidrida merupakan nukleasi yang sangat penting untuk silikon. Telah diyakini bahwa sodium akan membersihkan nukleasi tersebut dari aluminium cair yang menghasilkan struktur yang termodifikasi. Tapi dari percobaan yang telah dilakukan berikutnya pada paduan Al-Si, dengan filtrasi dan penggosokan dengan suatu gas stabil didapat bahwa perubahan struktur dari bentuk granular menjadi lamelar dan ini tidak dihasilkan melalui modifikasi. Faktanya, dengan sedikit penambahan Na (jumlahnya kurang dari persyaratan untuk terjadinya modifikasi secara utuh) didapatkan perubahan yang sama pada morfologi bentuk granular menjadi lamelar.

#### 2. Teori Eutektik Keempat

Pada tahun 1922 didapat bahwa modifikasi merupakan pembentukan suatu paduan terner Al-Si-Na. Morfologi silikon yang dimodifikasi diperkirakan merupakan morfologi tetap dari eutektik terner tersebut. Pada tahun 1924, Edward secara sistematis dari studinya mempelajari tentang kurva pendinginan dari paduan hipoeutektik dan hipereutektik Al-Si dan menemukan bahwa temperatur

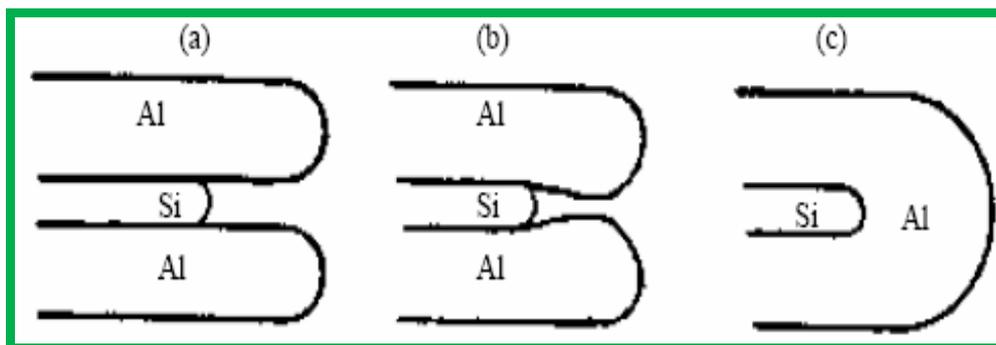
pembekuan eutektik lebih rendah dari nilai kesetimbangan ketika titik leburnya tetap pada temperatur eutektik yaitu  $577^{\circ}\text{C}$ . Pengamatan ini membuat mereka menyingkirkan kemungkinan bahwa paduan terner Al-Si-Na merupakan penyebab pada modifikasi karena ini merupakan sebuah sistem terner yang titik lebur dan pembekuannya bertepatan.

### 3. Teori Pertumbuhan Terbatas

Banyak hipotesa yang berasal dari akhir tahun 1940an sampai hari ini yang menerangkan bahwa proses modifikasi merupakan pembatasan pertumbuhan silikon melalui atom-atom *impurities* yang hadir dalam aluminium cair. Walaupun begitu ada berbagai macam pemikiran tentang bagaimana atom-atom pengotor tersebut bisa mempengaruhi pertumbuhan silikon. Berikut ini akan dijelaskan beberapa macam teori yang mendukung teori *restricted growth* pada proses modifikasi, antara lain :

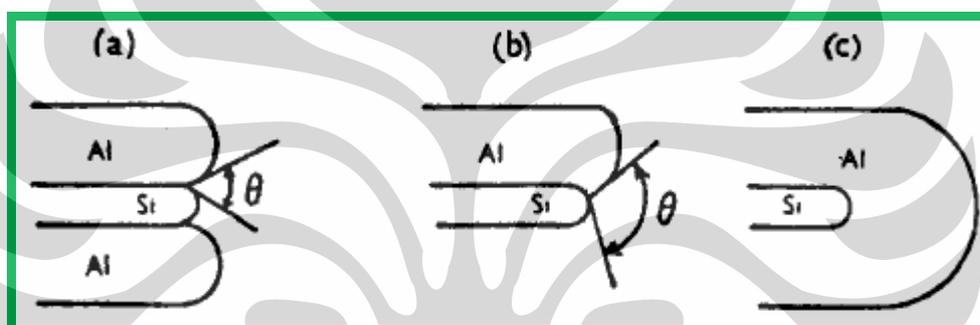
#### a. Teori Energi Permukaan

Pada tahun 1949 Thall dan Chalmers menjelaskan mekanisme modifikasi kimia pada eutektik aluminium silikon berdasarkan pada energi permukaan yang terdapat pada antar permukaan aluminium-silikon *solid*. Mereka mengatakan bahwa peningkatan laju pada antarmuka bergantung pada keseimbangan antara laju panas yang mengalir dari *liquid* ke *solid* yang melalui antarmuka dan panas laten yang dibebaskan selama proses solidifikasi. Konduktifitas termal untuk aluminium dan silikon dalam keadaan murni adalah  $0.53$  dan  $0.20 \text{ cal/cm}^2/^{\circ}\text{C}$  dan panas latennya  $94.6$  dan  $337 \text{ cal/g}$ . Karena adanya perbedaan nilai konduktivitas termal antara aluminium murni dan silikon murni serta perbedaan nilai panas latennya yang cukup besar, maka aluminium akan lebih cepat membeku dari pada silikon. Jadi, aluminium yang lebih dahulu berperan selama proses solidifikasi seperti terlihat pada Gambar 2.27. Dengan meningkatnya laju pendinginan, aluminium yang menutupi silikon akan semakin meningkat sampai tertutupnya secara utuh seperti terlihat pada Gambar 2.26.



**Gambar 2.26** Mekanisme solidifikasi eutektik pada daerah pendinginan<sup>[18]</sup>

Untuk modifikasi kimia, penurunan energi permukaan pada antarmuka aluminium-silikon solid pada saat penambahan *modifier* akan meningkatkan sudut antarmuka, seperti terlihat pada Gambar 2.27.



**Gambar 2.27** Solidifikasi eutektik pada unsur modifikasi Na<sup>[18]</sup>

#### b. Teori Pengendalian Difusi

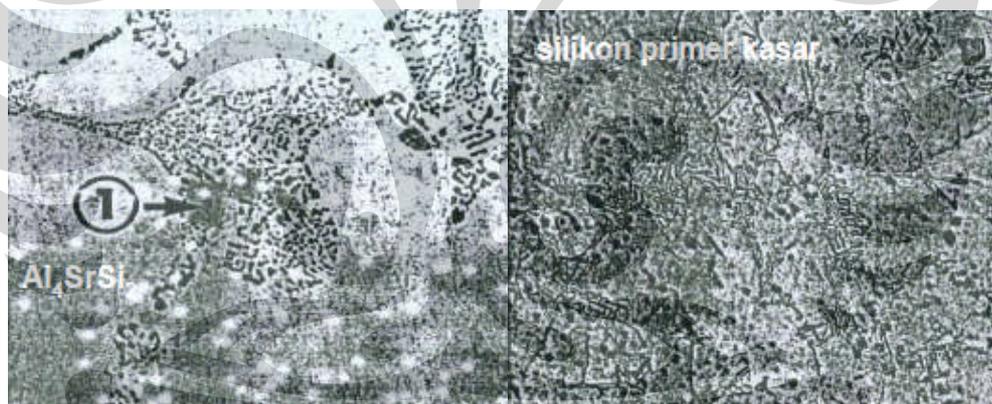
Teori ini berdasarkan pada pengamatan terhadap kelarutan sodium dalam aluminium dan silikon yang rendah. Dalam hal ini sodium akan tersegregasi di depan pertumbuhan antarmuka, yang mana akan membatasi difusi silikon dalam aluminium cair. Dari percobaan penghitungan pasangan difusi didapat bahwa Na akan menurunkan laju difusi silikon. Namun mekanisme ini dapat terbantahkan melalui sebuah studi mendalam yang dilakukan oleh Davies dan West. Dalam percobaannya paduan aluminium yang belum dimodifikasi dalam sebuah dapur dengan gracetakann temperatur yang tinggi pada laju pendinginan yang sangat lambat untuk memberikan cukup waktu bagi silikon untuk berdifusi. Kemudian Na ditambahkan dalam bentuk uap. Hasil mikrostrukturnya memperlihatkan modifikasi secara utuh. Sehingga dapat disimpulkan bahwa laju difusi silikon tidak memiliki peran dalam proses modifikasi.

### c. Peracunan Antarmuka

Salah satu percobaan mengenai ide tersebut dilakukan oleh Davis dan West. Paduan aluminium silikon eutektik yang belum dimodifikasi dalam suatu pengecoran vakum dengan adanya substrat silikon melalui teknik penuangan dari dasar dengan ataupun tanpa sodium pada atmosfernya. Mereka mengamati pertumbuhan silikon yang dalam kehadiran sodium yang dapat diabaikan jika dibandingkan dengan pertumbuhan silikon tersebut.

### 2.8.2 Modifikasi Berlebihan (*Over Modifikasi*)

Peristiwa *over* modifikasi merupakan peristiwa penambahan Sr yang berlebih yang akan menghasilkan dua fenomena, yang pertama yaitu terjadinya struktur Si yang kembali menjadi bentuk jarum yang kasar, fenomena kedua adalah terbentuknya fasa intermetalik  $Al_4SrSi_2$  sehingga menyebabkan tumbuhnya silikon primer kasar dan saling terhubung (lihat Gambar 2.28). Kedua hal ini jelas menurunkan kembali sifat mekanis dari paduan  $AlSi$ <sup>[3]</sup>.



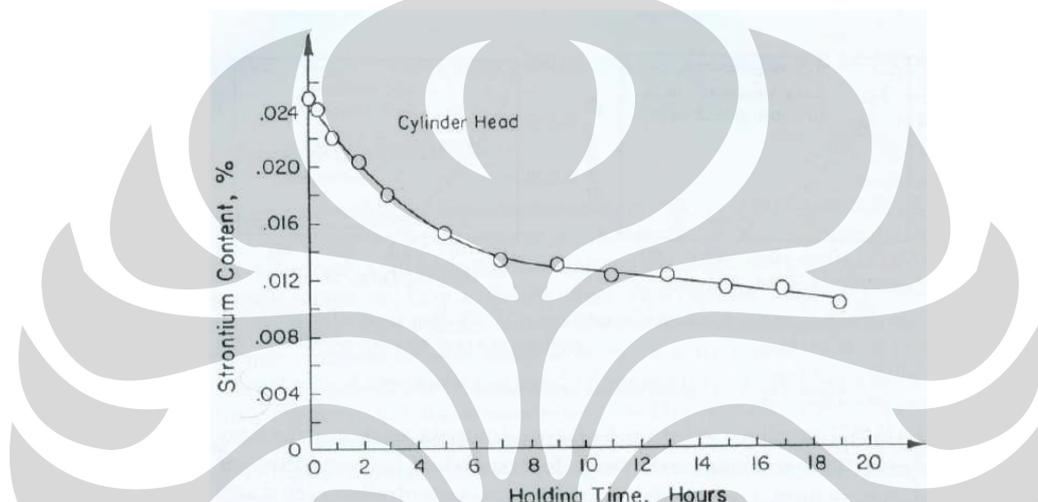
Gambar 2.28 Pengaruh *over*modifikasi terhadap struktur mikro aluminium<sup>[2]</sup>

### 2.8.3 Pemudaran Unsur Modifikasi

Selama proses penambahan, efek unsur modifikasi secara berkala akan menghilang seiring dengan berjalannya waktu. Efektivitas reaksi antara *modifier* dengan menurun dengan bertambahnya waktu tunggu, hal inilah yang disebut dengan pemudaran. Hal ini mungkin diakibatkan karena dua hal, yang pertama adalah akibat penguapan karena tekanan uap pada aluminium cair yang tinggi, dan yang kedua adalah karena unsur modifikasi yang teroksidasi seperti pada Gambar 2.29<sup>[3]</sup>. Setelah mekanisme pemudaran yang terjadi, unsur modifikasi masih

berada di dalam aluminium, namun dalam bentuk persenyawaan, sehingga menjadi tidak efektif lagi untuk menjadi unsur modifikasi. Unsur modifikasi yang baik adalah dalam bentuk atom bebas. Adapun sebab-sebab terjadinya peristiwa pemudaran Sr :

1. Penguapan pada tekanan yang tinggi saat temperatur lebur.
2. Oksidasi karena afinitasnya yang cukup tinggi terhadap oksigen.
3. Bereaksi dengan unsur lain yang reaktif dengannya.



Gambar 2.29 Grafik perbandingan kadar stronsium dan waktu tunggu<sup>[3]</sup>

#### 2.8.4 Modifikasi stronsium

Stronsium diperkenalkan pertama kali pada tahun 1975 sebagai unsur yang dapat memodifikasi paduan Al-Si. Pada awalnya, persentase stronsium yang harus ditambahkan sebagai unsur modifikasi pada paduan AlSi hipoeutektik adalah berkisar antara 0.07-0.08 wt. %, namun berdasarkan penelitian selanjutnya diperoleh hasil bahwa penambahan stronsium dalam jumlah kecil sudah mencukupi<sup>[14]</sup>. Stronsium memiliki waktu pemudaran lebih lama daripada Na, dan juga memiliki mekanisme pemudaran yang berbeda dengan Na. Unsur modifikasi Sr mengalami pemudaran diutamakan karena faktor oksidasi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa Sr mengalami pemudaran hingga setengah dari kadar awalnya dalam waktu 9 jam<sup>[10]</sup>. Selain itu, unsur modifikasi Sr akan lebih efektif jika digunakan pada pengecoran dengan pembekuan cepat. Dalam penggunaannya

stronsium lebih efektif dan aman daripada sodium. Dalam banyak penelitian juga diketahui bahwa kadar stronsium yang efektif dalam memodifikasi paduan Al-Si adalah antara 0.01-0.02 wt. %<sup>[10]</sup>.

Penambahan stronsium memiliki kecocokan sifat terutama pada pengaruhnya terhadap struktur mikro, sehingga penggunaan keduanya tetap dapat digunakan secara bersamaan. Namun kedua elemen modifikasi ini memiliki ketidakcocokan terhadap unsur Cl yang merupakan unsur utama bahan fluks. Bahan klorin ini akan mengganggu efek modifikasi yang terjadi, jadi dalam penggunaannya, setelah dilakukan perlakuan modifikasi dengan stronsium, sebaiknya diberikan metode penambahan fluks dengan gas argon<sup>[6]</sup>. Dalam penggunaannya, stronsium biasa ditambahkan dalam bentuk paduan batangan, karena jika digunakan stronsium murni akan menjadi tidak efektif karena Sr bereaksi dengan atmosfer (higroskopis). Berbagai jenis paduan stronsium sebagai unsur modifikasi dapat dilihat pada Tabel 2.12. Unsur modifikasi dapat ditambahkan dengan meletakkan pada bagian bawah dapur peleburan sebelum proses peleburan, ataupun dimasukkan setelah aluminium telah cair, namun harus dilakukan pengadukan agar unsur ini terdistribusi merata<sup>[6]</sup>.

**Tabel 2.12** Bentuk dan komposisi *modifier* stronsium komersial<sup>[6]</sup>

Paduan	Komposisi	Sumber Sr	Bentuk
A	Al-90%Sr	Murni	Batang
B	Al-3.5%Sr	Murni	Batang
C	Al-5%Sr	Murni	Batang, <i>waffle</i>
D	Al-10%Sr	Murni	<i>Waffle</i> , batang
E	Al-10%Sr-1%Ti	Murni	Batang
F	Al-10%Sr-14%Si	Sr <sub>2</sub> Si	<i>Waffle, buttons</i>

## 2.9 PENGARUH MODIFIKASI TERHADAP KARAKTERISTIK PADUAN AC4B

### 2.9.1 Pengaruh modifikasi terhadap struktur mikro

Modifikasi dapat mengakibatkan beberapa perubahan pada struktur mikro logam yang dihasilkan sebagai akibat dari adanya modifikasi eutektik tersebut. Terdapat lima variabel yang menentukan struktur mikro akhir dari paduan Al-Si yang dimodifikasi, yaitu<sup>[14]</sup> :

1) Jenis unsur modifikasi

Pada konsentrasi rendah unsur modifikasi Na menghasilkan struktur Si yang termodifikasi dengan baik, sedangkan untuk memperoleh hasil yang sama, dibutuhkan konsentrasi yang lebih banyak jika digunakan unsur modifikasi Sr.

2) Keberadaan pengotor

Jenis pengotor yang mengganggu proses modifikasi adalah unsur antimoni seperti fosfor. Namun, mekanismenya masih belum diketahui. Jika suatu paduan Al-Si mengandung fosfor dalam jumlah tinggi, diperlukan kadar Sr yang lebih tinggi pula, dan bahkan dengan kondisi ini hanya tercapai modifikasi sedang.

3) Jumlah unsur modifikasi

Jumlah unsur modifikasi Sr yang optimum adalah antara 0.01-0.02 wt. %, dan jika digunakan melebihi dari itu akan terjadi mekanisme modifikasi berlebihan.

4) Kecepatan pembekuan

Pengecoran dengan pembekuan cepat membutuhkan jumlah Sr yang lebih banyak dibandingkan pengecoran dengan kecepatan pembekuan lambat.

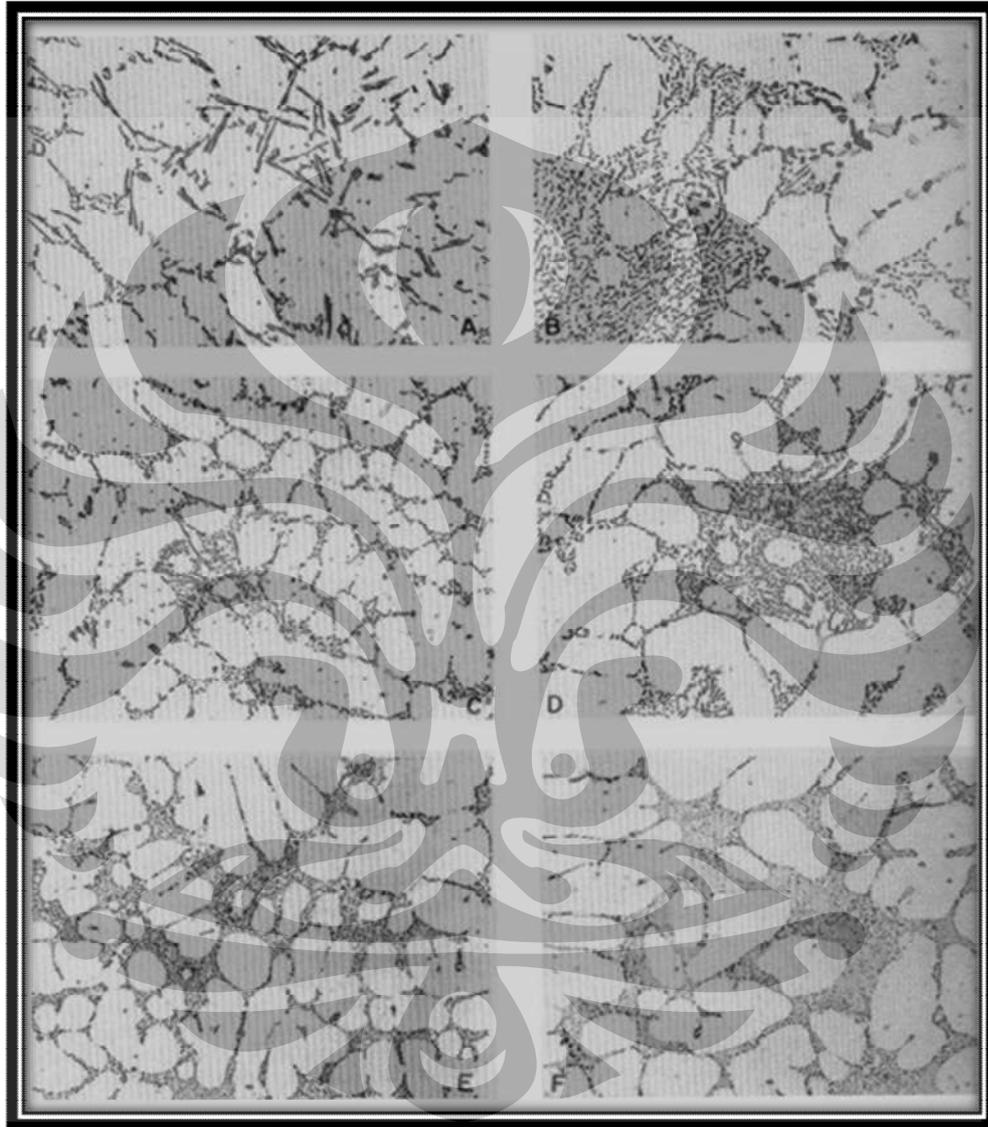
5) Kadar silikon

Kadar silikon yang lebih banyak membutuhkan kadar Sr yang lebih banyak pula.

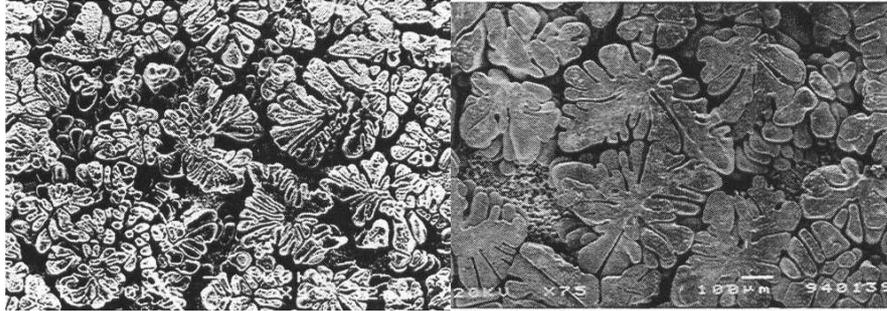
Sebaran mikrostruktur yang mungkin terjadi pada modifikasi paduan hipoeutektik diperlihatkan pada Gambar 2.30. Struktur ini dibagi menjadi 6 kelas, dimana kelas E merupakan kelas dengan struktur modifikasi yang paling baik. Pembentukan struktur yang sangat halus terjadi pada kelas F<sup>[1]</sup>. Efisiensi modifikasi dapat diketahui yaitu dengan cara menentukan proporsi struktur sesuai tipe modifikasi mikrostruktur<sup>[3]</sup>. Sebagai contoh, sebuah sampel mengandung 20% kelas 3, 50% kelas 4 dan 30% kelas 5. Maka tingkatan modifikasi dapat dihitung sebagai berikut :

$$M.R = (0.2 \times 3) + (0.5 \times 4) + (0.3 \times 5) = 4.1 \dots\dots (2.6)$$

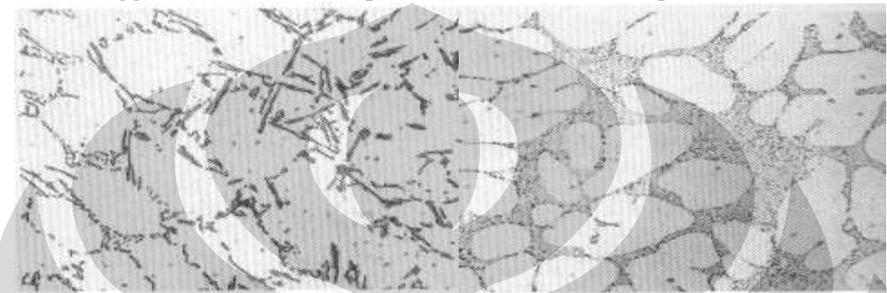
Gambar 2.31 menjelaskan tentang perbandingan struktur mikro hasil SEM paduan aluminium AC4B tanpa modifikasi dan setelah modifikasi. Sedangkan Gambar 2.32 menjelaskan tentang perbandingan struktur mikro aluminium AC4B sebelum dan setelah dilakukan modifikasi.



**Gambar 2.30** Derajat pengaruh modifikasi<sup>[19]</sup> (A) tidak termodifikasi ; (F) termodifikasi sempurna



**Gambar 2.31** Struktur mikro hasil SEM aluminium paduan A356 tanpa modifikasi dengan menggunakan SEM ; (kiri) perbesaran 100X ; (kanan) perbesaran 1000x<sup>[10]</sup>



**Gambar 2.32** Struktur mikro aluminium paduan A356 dengan modifikasi; (kiri) perbesaran 100x ; (kanan) perbesaran 1000x<sup>[10]</sup>

### 2.9.2 Pengaruh modifikasi terhadap sifat mekanis

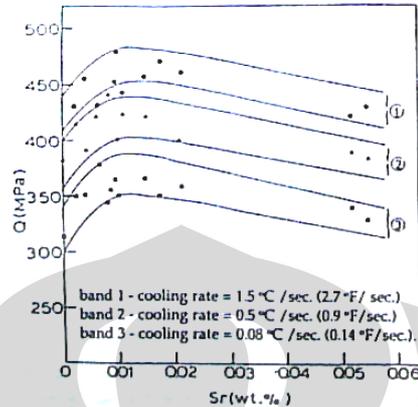
Penambahan *modifier* dalam logam cair dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan terhadap sifat mekanis logam. Namun, sebelum dilakukan penambahan unsur modifikasi kita harus memperhatikan beberapa hal dibawah ini, antara lain :

1. Kecepatan Pendinginan.
2. Kualitas Pengecoran.
3. Perlakuan Panas.
4. Kadar Magnesium.

Apabila keempat hal diatas tidak dapat dikendalikan dalam proses pengecoran, maka sulit untuk mengetahui pengaruh *modifier* terhadap kekuatan tarik. Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan pengaruh unsure modifikasi terhadap struktur mikro paduan Al-Si. Dengan dilakukannya modifikasi, kristal dari silikon yang awalnya berupa pelat-pelat berubah menjadi bentuk dan dari struktur yang kasar menjadi struktur halus<sup>[3]</sup>. Perubahan tersebut secara jelas mampu untuk meningkatkan nilai UTS dan keuletan dari paduan Al-Si<sup>[5]</sup>. Pengaruh *modifier*, kecepatan pendinginan terhadap kekuatan tarik dapat

digambarkan pada Gambar 2.33. Pada grafik diatas terdapat nilai Q yang berarti Indeks Kualitas, nilai ini diperoleh dengan :

$$Q = UTS + (k)\log \text{ elongasi} \dots (2.7)$$

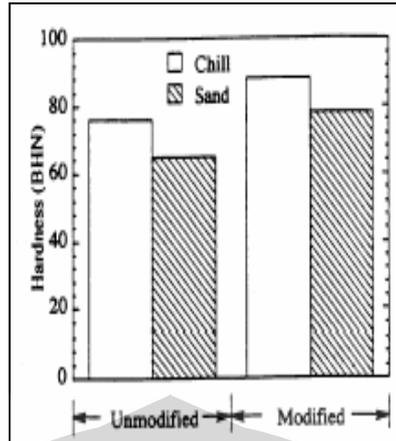


**Gambar 2.33** Nilai Indeks Kualitas (Q) terhadap kecepatan pendinginan pada paduan aluminium A356 dengan penambahan Sr<sup>[3]</sup>

Jika dihubungkan dengan porositas, unsur modifikasi akan tetap meningkatkan nilai kekuatan tarik meskipun porositas bertambah, karena porositas menjadi lebih terdispersi pada seluruh bagian produk cor.

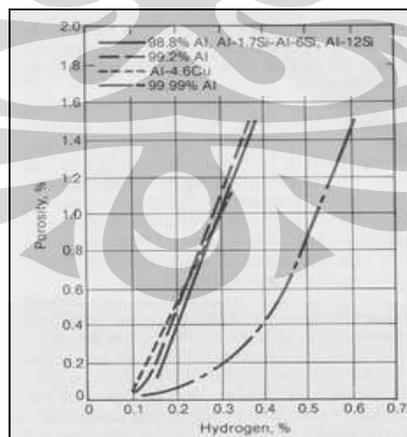
### 2.9.3 Pengaruh modifikasi terhadap porositas

Pengaruh unsur modifikasi terhadap nilai kekerasan berbeda-beda pada banyak literatur. Secara teoritis, seharusnya penambahan stronsium yang dapat mengubah struktur mikro menjadi lebih halus akan meningkatkan nilai kekerasan dari aluminium paduan tersebut<sup>[17]</sup>. Terjadinya penurunan nilai kekerasan pada beberapa literatur kemungkinan diakibatkan oleh porositas yang semakin terdistribusi merata, sehingga kekerasan pada bagian yang sebelumnya memiliki densitas tinggi menjadi rendah akibat porositas yang ada (lihat Gambar 2.34).



**Gambar 2.34** Pengaruh penambahan 0.01wt. % Sr terhadap nilai kekerasan pada aluminium paduan 336.0<sup>[17]</sup>

Modifikasi sangat berpengaruh terhadap distribusi porositas. Porositas merupakan jenis cacat pada proses pengecoran. Porositas berlebih dapat menurunkan sifat mekanis serta penampilan pada produk hasil cor. Terjadinya porositas diutamakan oleh karena kelarutan hidrogen<sup>[5]</sup>. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, hidrogen memiliki kelarutan yang tinggi terhadap aluminium cair. Kecepatan pembekuan yang tinggi akan menghasilkan struktur mikro dengan persen porositas yang kecil. Hal ini karena hidrogen tidak sempat berdifusi ke bagian interdendritik sehingga tidak terbentuk porositas<sup>[4]</sup>. Gambar 2.35 menjelaskan tentang hubungan antara jumlah porositas dengan kandungan hidrogen<sup>[11]</sup>.



**Gambar 2.35** Hubungan antara jumlah porositas dengan kandungan hidrogen<sup>[11]</sup>

Pada paduan Al-Si hipoeutektik, penambahan *modifier* tidak merubah jumlah porositas namun mengubah distribusi dan morfologi porositas. Pada

kondisi tidak termodifikasi, porositas terdistribusi kebanyakan pada bagian tebal dari benda cor dan memiliki bentuk tidak beraturan. Sementara pada kondisi termodifikasi, porositas mengalami distribusi merata (terdispersi) pada seluruh bagian benda cor dan memiliki bentuk bulat<sup>[4]</sup>. Gambaran mekanisme pengaruh modifikasi terhadap porositas dapat dilihat pada Gambar 2.36 dan Gambar 2.37. Pada Gambar 2.38 ditunjukkan tingkatan porositas berdasarkan standar ASM. Pada beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa penambahan modifier stronsium pada paduan aluminium-silikon hipoeutektik meningkatkan jumlah porositas makro (namun tetap terdispersi merata). Hal ini dapat disebabkan oleh :

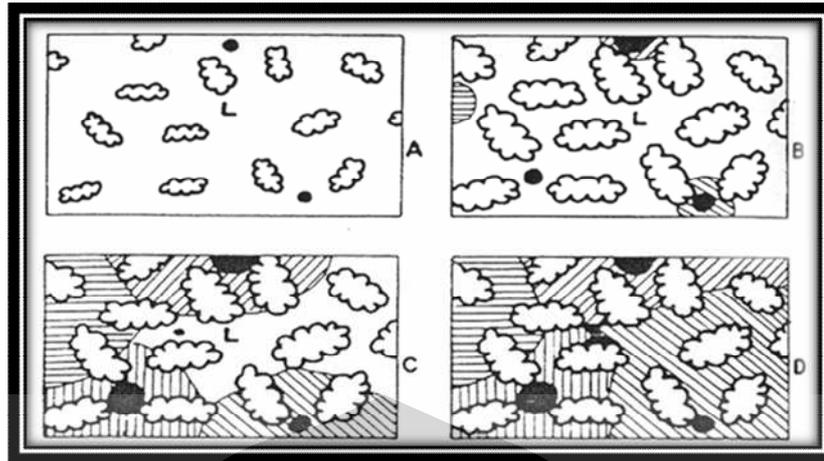
1. Turunnya tegangan permukaan aluminium cair sehingga membuat permukaan luar dari aluminium cair lebih lebih encer, hal ini memudahkan larutnya hidrogen<sup>[2]</sup>.
2. Terbentuknya lapisan oksida  $\text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  pada aluminium cair yang tidak bersifat protektif akibat penambahan stronsium. Pembentukan lapisan oksida ini mengakibatkan gas hidrogen mudah masuk ke dalam aluminium cair<sup>[4]</sup>.



**Gambar 2.36** Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi tanpa penambahan Sr<sup>[4]</sup>

Ket :

- A : Kondisi sebelum solidifikasi eutektik  
 B : Porositas muncul pada bagian interdendritik  
 C : Pertumbuhan porositas dipengaruhi oleh bentuk dendrit dan fasa eutektik  
 D : Hasil akhir terbentuk porositas dengan bentuk irregular dan bercabang - cabang



**Gambar 2.37** Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi dengan penambahan modifier Sr<sup>[4]</sup>

Ket :

- A : Porositas berbentuk bulat mulai muncul sebelum solidifikasi eutektik
- B : Fasa eutektik mulai tumbuh
- C : Tumbuhnya fasa eutektik berlanjut
- D : Porositas bulat terus bernukleasi pada bagian antar sel menghasilkan porositas tak beraturan sebagian.



**Gambar 2.38** Perbandingan tingkat porositas<sup>[11]</sup>

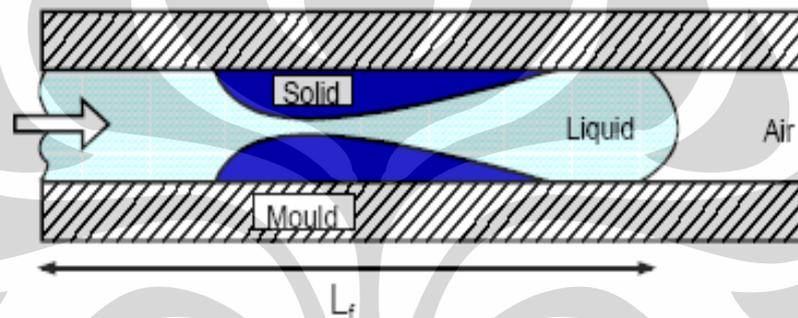
Perbedaan distribusi porositas antara cairan logam yang dimodifikasi dan yang tidak dimodifikasi dijelaskan dalam beberapa hal berikut<sup>[28]</sup> :

- 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.
- b) *Poor feedability* dalam suatu coran maka akan menuju pada *unfilled zones* dalam area interdendritik yang akan menyebabkan pembentukan porositas. Bagaimanapun, *feedability* itu sendiri dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti kisaran pembekuan, energi *interface* padat-cair, *feedings path*, nukleasi dan pertumbuhan eutektik, dan volum fraksi serta bentuk dari fasa intermetalik. Sr telah diketahui dapat mempengaruhi range pembekuan dan energi antarmuka padat-cair pada paduan aluminium-silikon. Dimana nantinya Sr tersebut akan dapat merubah distribusi pori pada paduan aluminium-silikon yang sudah dimodifikasi.
- c) Kehadiran inklusi seperti oksida dan stronsium yang berbau dasar oksida akan bertindak sebagai nuklei pada pori-pori yang disebabkan karena adanya gas hidrogen.

#### **2.9.4 Pengaruh modifikasi terhadap fluiditas**

Fluiditas adalah sifat mampu alir yang didefinisikan sebagai kemampuan logam cair untuk mengisi rongga-rongga cetakan pada proses pengecoran logam<sup>[13]</sup>. Fluiditas logam cair merupakan faktor penting dalam pengecoran khususnya untuk menghindari cacat-cacat yang sering terjadi pada benda cor yang sangat tidak diinginkan. Satuan yang digunakan sebagai ukuran fluiditas dari suatu logam cair adalah ukuran panjang berupa cm atau inci<sup>[13]</sup>. Suatu aliran logam cair dapat berhenti mengalir akibat terjadinya proses solidifikasi dendrit yang tebal pada bagian ujung aliran sehingga menghambat aliran logam cair di belakangnya. Oleh sebab itu, maka teori fluiditas dapat dijelaskan oleh karakteristik solidifikasi dari logam itu sendiri. Paduan yang memiliki fluiditas yang baik adalah paduan dengan rentang pembekuan pendek, sedangkan paduan dengan range pembekuan panjang memiliki fluiditas yang buruk<sup>[18]</sup>.

Pada aliran logam paduan dengan rentang pembekuan pendek (Gambar 2.39), solidifikasi dimulai dari bagian dinding menuju ketengah logam cair. Bagian ini akan mengalami peleburan kembali secara terus-menerus hingga bagian yang membeku pada kedua sisi bertemu. Saat kondisi ini tercapai aliran berhenti<sup>[18]</sup>. Mekanisme solidifikasi aliran pada paduan dengan *range* pembekuan panjang (Gambar 2.40) berada pada bagian depan, dan tidak lagi berbentuk planar melainkan dendritik. Karena terjadinya pembekuan pada aliran logam, terjadi turbulensi pada bagian belakang aliran sehingga lengan-lengan dendrit yang telah membeku mengalami peleburan kembali dan terbentuk fasa lumpur berupa serpihan dendrit<sup>[18]</sup>.

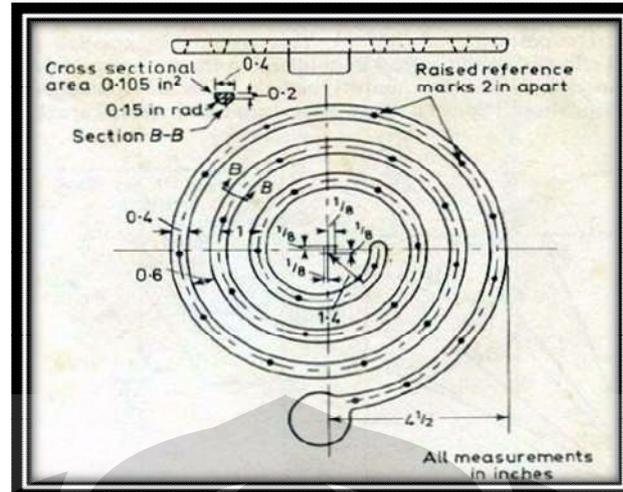


**Gambar 2.39** Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi pada paduan dengan rentang pembekuan pendek<sup>[18]</sup>



**Gambar 2.40** Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi pada paduan dengan rentang pembekuan panjang<sup>[18]</sup>

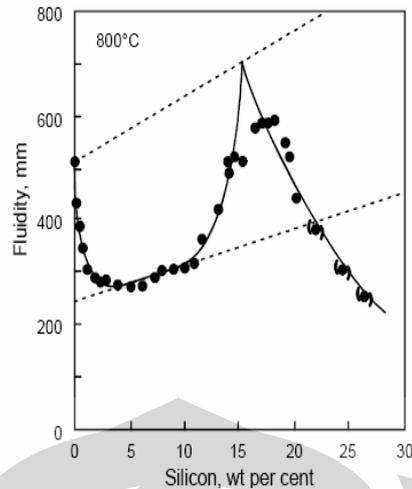
Pengujian fluiditas didasarkan pada kondisi yang mensimulasikan proses pengecoran logam dan pengukuran fluiditas sebagai total jarak yang dilalui oleh cairan logam dalam sistem saluran tertutup. Ukuran dalam pengujian seperti ini adalah waktu alir<sup>[11]</sup>. Metode yang biasa digunakan adalah pengujian fluiditas spiral seperti pada Gambar 2.41. Dari pengujian ini diperoleh indeks fluiditas yang merupakan panjang logam yang membeku dalam saluran spiral. Semakin panjang logam yang membeku, semakin besar nilai fluiditasnya.



**Gambar 2.41** Metode pengujian fluiditas dengan menggunakan cetakan spiral<sup>[18]</sup>

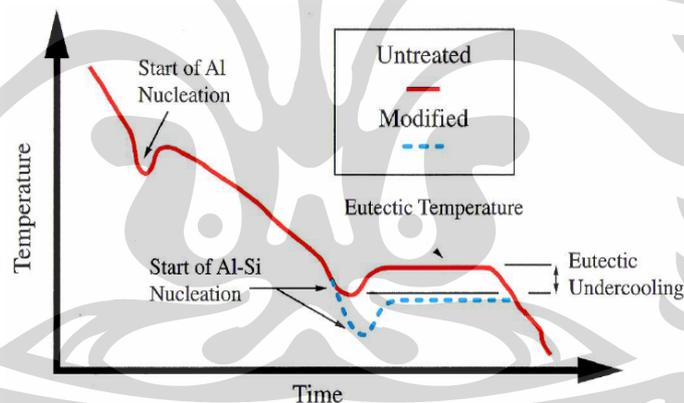
Secara keseluruhan terdapat dua hal yang mempengaruhi nilai fluiditas dari logam cair, yaitu karakteristik logam cair dan kondisi pengecoran. Faktor-faktor dari karakteristik logam cair adalah tegangan permukaan, sifat permukaan lapisan oksida, keberadaan inklusi dan komposisi<sup>[2]</sup>. Sedangkan kondisi pengecoran yang dimaksud adalah temperatur, tekanan, kecepatan pengecoran, jenis material cetakan dan karakteristik permukaan cetakan<sup>[2]</sup>. Fluiditas sangat dipengaruhi oleh kadar silikon, yaitu semakin tinggi kadar silikon maka nilai fluiditas akan semakin tinggi pula. Terlihat pada Gambar 2.42 bahwa titik eutektik memiliki fluiditas yang paling tinggi pada kadar silikon 15 %.

Penambahan *modifier* Stronsium pada paduan Al-Si memiliki pengaruh yang baik terhadap nilai fluiditas paduan tersebut. Pada bagian sebelumnya dijelaskan bahwa fluiditas yang dimiliki oleh paduan dengan rentang pembekuan pendek lebih baik daripada fluiditas yang dimiliki oleh paduan dengan rentang pembekuan panjang. Disini *modifier* stronsium berperan, yaitu pada saat proses solidifikasi. Pada saat solidifikasi, penambahan stronsium akan menurunkan temperatur eutektik nukleasi dan pertumbuhan<sup>[10]</sup>. Pada kondisi ini, rentang pembekuan akan menjadi lebih pendek sehingga diperoleh peningkatan fluiditas.



**Gambar 2.42** Pengaruh komposisi silikon terhadap nilai fluiditas<sup>[18]</sup>

Penambahan *modifier* ke dalam paduan aluminium bisa mengubah temperatur dan komposisi eutektik<sup>[28]</sup>. Temperatur eutektik akan turun dan komposisi eutektiknya pun akan bergeser ke komposisi silikon yang lebih tinggi pada diagram fasa Al-Si (Gambar 2.42). Gambar 2.43 menjelaskan tentang kurva pendinginan Al-Si setelah mengalami proses modifikasi.



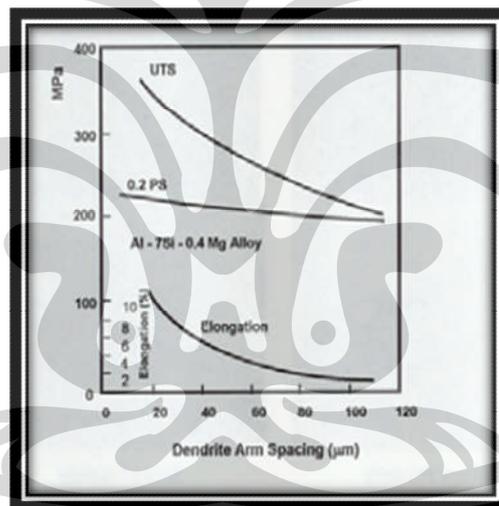
**Gambar 2.43** Kurva pendinginan Al-Si setelah mengalami proses modifikasi<sup>[18]</sup>

## 2.10 PENGHALUS BUTIR

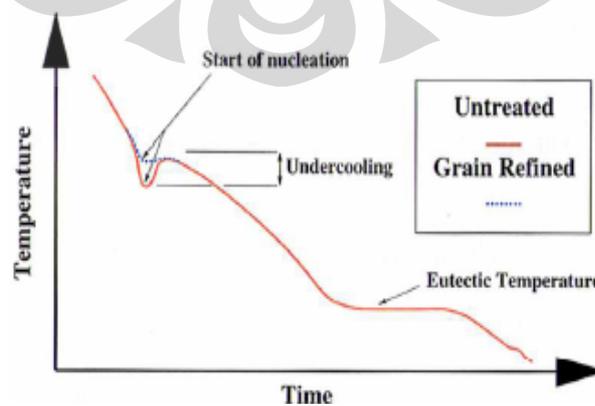
Penghalus butir adalah proses penghalusan ukuran butir primer aluminium selama pembekuan. Seperti yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, selama proses pembekuan, aluminium cair membentuk struktur dendrit. Kumpulan dari struktur dendrit-dendrit yang berawal dari nukleus disebut dengan butir. Jarak lengan dendrit (DAS) mempengaruhi nilai dan sifat-sifat mekanis dari paduan aluminium tuang. Semakin kecil DAS, maka semakin baik sifat-sifat mekanismenya. Hal ini berarti, semakin kecil ukuran butir juga dapat

meningkatkan sifat-sifat mekanis tersebut karena ukuran butir berbanding lurus dengan nilai DAS (lihat Gambar 2.44). Gambar 2.45 menjelaskan tentang kurva pembekuan logam sebelum dan setelah mengalami penambahan penghalus butir<sup>[15]</sup>.

Paduan aluminium, umumnya akan membentuk butir kolumnar dan kecil-kecil yang kasar saat pembekuan. Penghalusan butir bertujuan untuk menghaluskan butir pada logam aluminium sehingga meningkatkan sifat mekanis dari logam aluminium. Jenis penghalus butir yang umum digunakan adalah yang mengandung unsur Ti dan B dalam bentuk senyawa logam seperti  $TiAl_3$  atau  $TiB_2$ . Penambahan kadar Ti antara 0.02 wt. % sampai dengan 0.15 wt. % atau campuran Ti-B dengan kadar 0.01 wt. % sampai dengan 0.03 wt. % Ti dan 0.01 wt. % B sering digunakan dalam prakteknya. Penambahan penghalusan butir ini dapat berupa batangan ataupun serbuk.



Gambar 2.44 Grafik perbandingan antara besar DAS dengan nilai UTS dan elongasi logam<sup>[18]</sup>



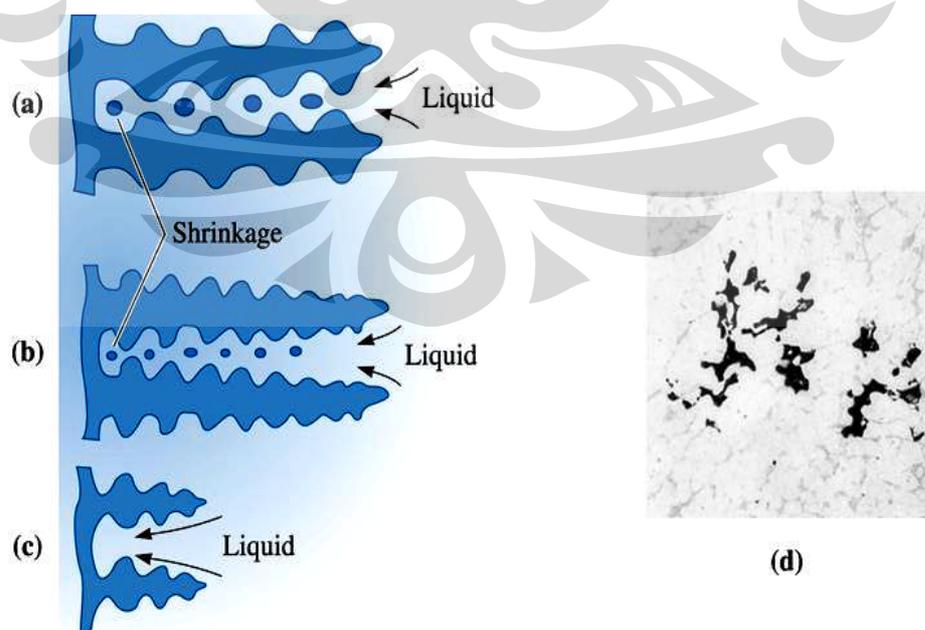
**Gambar 2.45** Kurva pembekuan logam sebelum dan setelah mengalami penambahan penghalus butir<sup>[15]</sup>

### 2.10.1 Efek Penghalus Butir Terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium

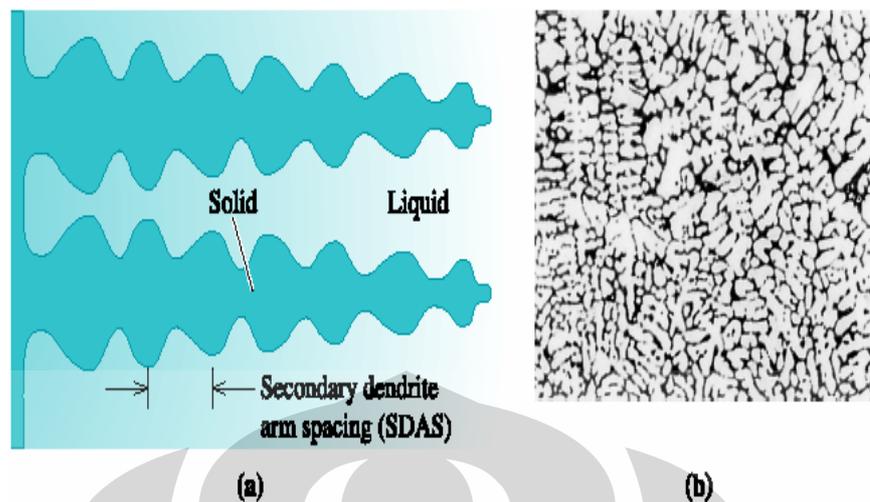
Selain menghaluskan butir, penambahan penghalus butir juga memberikan pengaruh-pengaruh lainnya terhadap sifat-sifat mekanis pada paduan Aluminium tuang yaitu :

1) Pendistribusian mikroporositas secara merata

Selama proses pembekuan, terjadi apa yang dinamakan porositas atau lubang pori. Porositas tidak dapat dihilangkan secara keseluruhan namun dapat diminimalisir. Kumpulan dari beberapa mikroporositas bisa juga membentuk penyusutan porositas yang terdapat pada celah antara DAS. Pengaruh penghalusan butir adalah untuk mendistribusikan porositas menjadi lebih merata, jadi yang terbentuk adalah pori-pori yang kecil. Logam yang tidak diberikan penghalus butir cenderung membeku dengan daerah yang mempunyai konsentrasi porositas yang tinggi<sup>[14]</sup>. Susut dapat terjadi diantara lengan-lengan dendrit, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.46 dan 2.47. Jarak antar lengan dendrit yang makin sempit akan menyebabkan porositas akibat penyusutan yang lebih kecil dan merata.



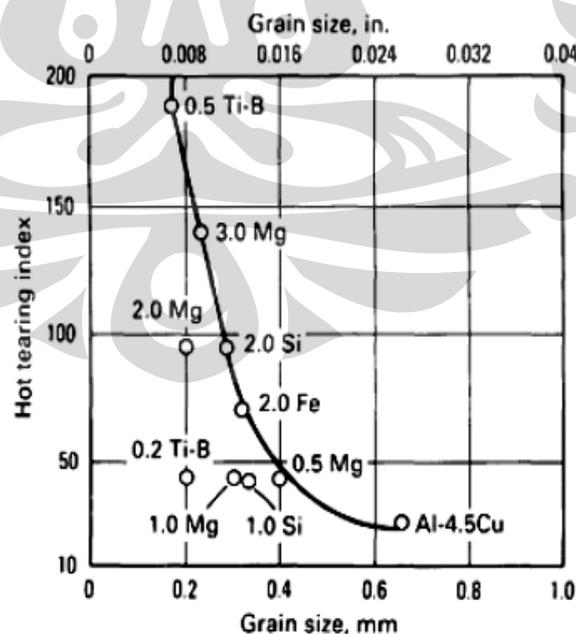
**Gambar 2.46** (a)(b)(c) Ilustrasi penyusutan pada jarak lengan dendrit, (d) Mikrostruktur dari porositas interdendritik ( perbesaran 80x)<sup>[12]</sup>



Gambar 2.47 (a) *Secondary dendrite arm spacing* (SDAS), (b) Dendrit pada paduan aluminium (50x)<sup>[11]</sup>

2) Menurunkan terjadinya retak panas

Penambahan penghalus butir diketahui akan mengurangi kecenderungan terhadap retak panas. Penghalusan butir akan berakibat setiap butir akan dikelilingi oleh lapisan tipis dari cairan, sehingga menurunkan temperatur saat penyusutan solid terjadi, dan menurunkan rentang temperatur dimana retak panas mudah terjadi.



Gambar 2.48 Pengaruh besar butir terhadap kecenderungan retak panas pada paduan Al-4.5Cu. Nilai dibawah 50 rentan terhadap retak panas<sup>[10]</sup>

Hal ini disebabkan oleh adanya lapisan tipis cairan yang menyelimuti butir logam sehingga menurunkan temperatur saat penyusutan terjadi dan rentang temperatur dimana retak panas dapat terjadi. Gambar 2.47 menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran butir maka ketahanan terhadap retak panas akan meningkat<sup>[14]</sup>.

3) Meningkatkan mampu mesin

Karena ukuran butir tereduksi, fasa sekunder dan porositas terdistribusi secara lebih merata, sehingga meningkatkan kemampuan permesinan<sup>[3]</sup>. Seperti yang telah diketahui bahwa salah satu cara untuk meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi adalah efek penguatan batas butir. Dimana, batas butir akan menjadi penghalang bagi dislokasi untuk bergerak. Oleh karena butir-butir menjadi kecil, maka batas butir akan semakin banyak dan meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi. Sifat mekanis seperti kekuatan tarik dan elongasi umumnya diperbaiki oleh penambahan penghalus butir. Dalam paduan Al-Si, hal ini lebih disebabkan oleh lebih meratanya porositas, daripada perubahan dari ukuran butir. Dalam paduan Al-Cu, ukuran butir berperan cukup penting dalam mengatur distribusi intermetalik dan mengurangi kecenderungan terhadap hot tearing<sup>[14]</sup>. Berikut adalah tabel pengaruh penambahan penghalus butir terhadap sifat mekanis dari paduan A356 :

4) Meningkatkan kemampuan *finishing* anoda

Butir-butir dengan struktur besar akan mengakibatkan struktur permukaan produk hasil pengecoran berbentuk seperti kulit jeruk (*orange peel*). Struktur ini sangat kasar sehingga jika dilakukan anodizing akan tidak efektif karena permukaannya yang tidak rata. Penambahan penghalus butir akan membuat butir-butir menjadi kecil dan mengurangi struktur kulit jeruk tersebut sehingga meningkatkan kemampuan dan keefektifan proses *anodizing*.

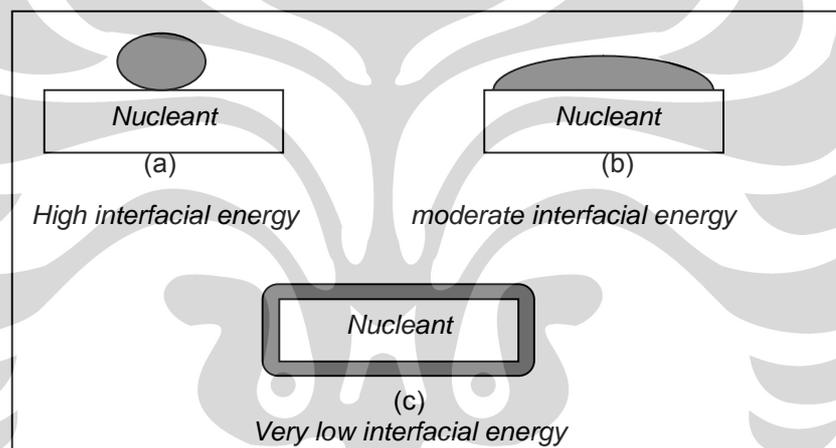
5) Mengurangi fluiditas

Nukleasi awal yang diakibatkan oleh penambahan penghalus butir menimbulkan nukleasi  $TiAl_3$  sehingga menyebabkan terjadinya aliran lumpur (padatan dengan cairan) dari saat penuangan, dan karena

lumpur dapat menyebabkan aliran logam cair menjadi lebih lambat dari cairan biasa, maka fluiditas dapat berkurang<sup>[3]</sup>.

### 2.10.2 Mekanisme Penghalusan Butir Dengan AlTiB

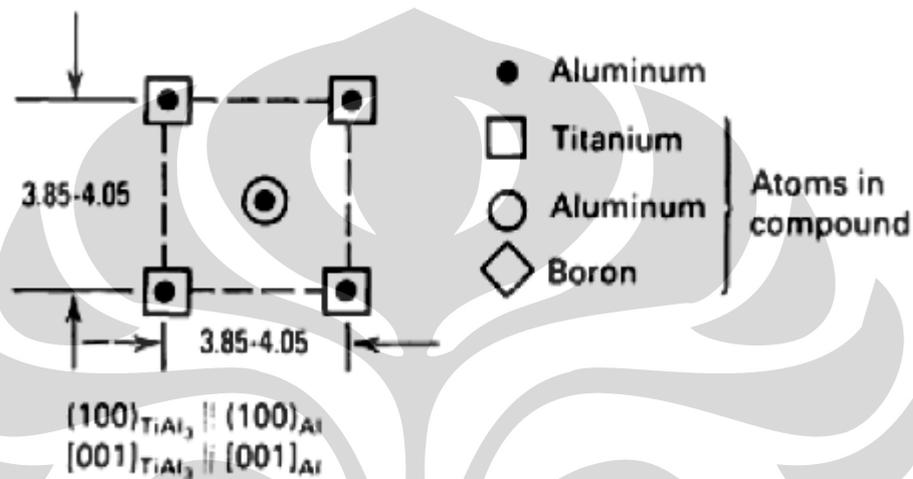
Ukuran butir sangat dipengaruhi oleh kecepatan pembekuan, semakin cepat kecepatan pembekuannya maka ukuran butir akan semakin kecil. Penghalus butir digunakan dengan tujuan untuk merangsang pertumbuhan inti sehingga butir yang terbentuk menjadi halus. Gambar 2.49 menjelaskan tentang pengaruh energi antarmuka pada geometri dari nukleus yang terbentuk pada nuklean.



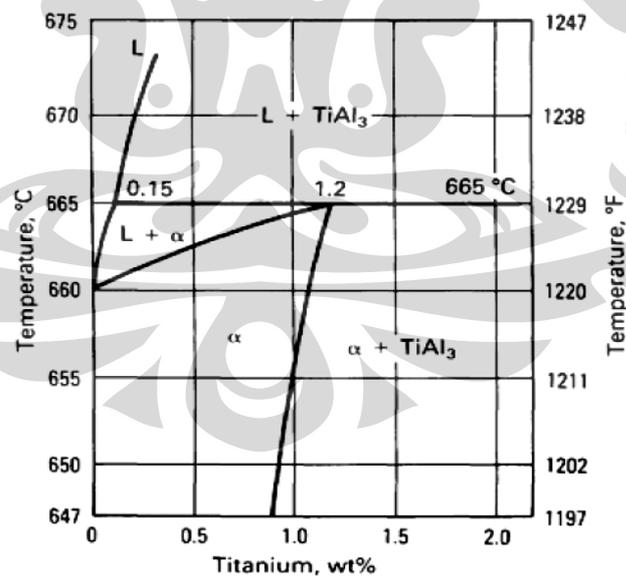
**Gambar 2.49** Pengaruh energi antarmuka pada geometri dari nukleus yang terbentuk pada nuklean<sup>[14]</sup>

Terdapat beberapa macam material *flux* untuk penghalusan butir dari aluminium. Beberapa industri pengecoran lebih memilih untuk menggunakan *flux* karena *flux* memiliki efek penghalusan butir yang lebih merata, lebih mudah dimasukkan ke dalam leburan, dan bisa ditambahkan pada temperatur rendah sehingga mengurangi bahaya oksidasi dan penyerapan gas. *Flux* yang digunakan untuk penghalusan butir pada paduan aluminium umumnya mengandung titanium, boron, zirkonium, dan karbon. Titanium dan boron, atau keduanya dianggap sebagai penghalus butir yang paling efektif. Kombinasi dari garam seperti *potassium fluorotitanate* dan *potassium fluoroborate*, umumnya digunakan untuk memasukkan titanium dan boron ke dalam leburan logam<sup>[9]</sup>.

Tidak semua partikel yang terlarut dalam leburan logam dapat bertindak sebagai nuklean, hanya yang memiliki energi antarmuka antara nuklei dan nuklean yang paling rendah yang merupakan penghalus butir yang efektif. Energi antarmuka yang rendah ini didapat apabila terdapat kesamaan dalam struktur kristal minimal dalam 1 bidang atom antara nuklei dan nuklean.  $\text{TiAl}_3$  mempunyai struktur yang mirip dengan aluminium (Gambar 2.50). Oleh karena itu, unsur ini merupakan penghalus butir yang efektif.



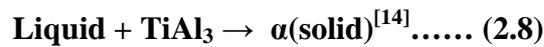
Gambar 2.50 Struktur kristal  $\text{TiAl}_3$  dengan aluminium<sup>[10]</sup>



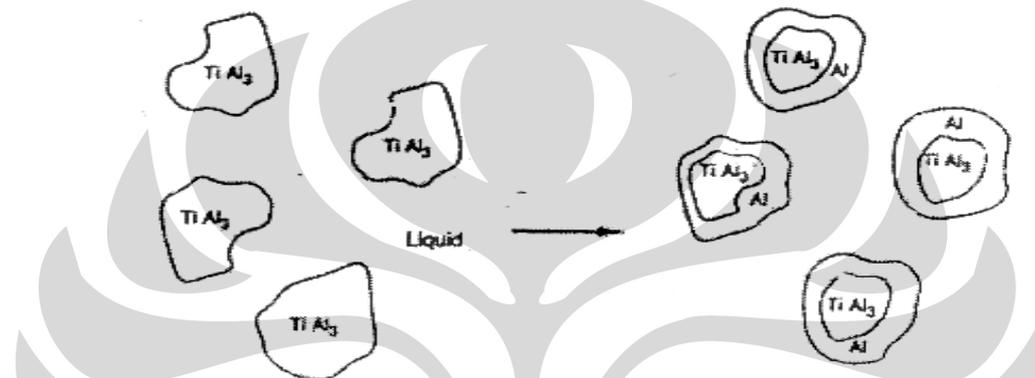
Gambar 2.51 Diagram fasa  $\text{TiAl}_3$ <sup>[10]</sup>

Untuk memahami mekanisme penghalusan butir oleh unsur titanium, maka harus diperhatikan diagram fasa dari Al – Ti pada Gambar 2.51. Partikel  $\text{TiAl}_3$

akan bereaksi dengan fasa cair pada pembekuan dibawah  $665^{\circ}\text{C}$  menurut reaksi sebagai berikut :



Fasa  $\alpha(\text{solid})$  yang terbentuk merupakan aluminium yang hampir murni. Fasa ini menyelimuti partikel  $\text{TiAl}_3$  (Gambar 2.52) dan bertindak sebagai tempat bertumbuhnya butir aluminium. Oleh karena itu, ukuran butir tergantung dari ukuran partikel  $\text{TiAl}_3$ , semakin kecil ukuran partikel  $\text{TiAl}_3$ , maka efektifitas penghalusan butir akan semakin meningkat.



Gambar 2.52 Mekanisme terjadinya nukleasi pada sistem Al-Ti<sup>[14]</sup>

Tabel 2.13 Teori-teori penting mengenai penghalusan butir<sup>[22]</sup>

Teori	Substrat penintian
<i>The nucleant paradigm</i>	terjadi pada borida atau karbida
Teori borida/karbida	
<i>Phase diagram theories</i>	via reaksi peritektik
<i>Peritectic hulk</i>	terjadi pada Ti-B
<i>Hypernucleation</i>	via reaksi peritekti pada borida
<i>Duplex nucleation</i>	terjadi pada $\text{Al}_3\text{Ti}$ dimana terbentuk pada permukaan partikel $\text{TiB}_2$
<i>The solute paradigm</i>	
Mekanisme <i>undercooling driven</i>	borida (atau partikel lain)

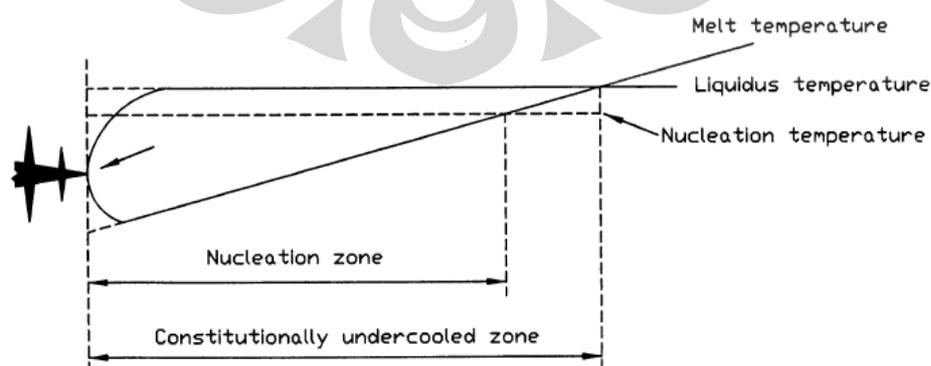
Ada beberapa teori mengenai mekanisme pembentukan inti pada aluminium yang ditambahkan penghalus butir. Teori-teori ini menjabarkan mengenai mekanisme pembentukan inti yang mungkin terjadi untuk terjadinya penghalus butir. Teori yang paling terakhir dikemukakan oleh M. Johnsson<sup>[40]</sup> mengenai teori paradigma unsur terlarut. Pada Tabel 2.13 diberikan ringkasan mengenai teori-teori sebelumnya mengenai penghalus butir. Dalam teori paradigma unsur terlarut dikemukakan dua alasan penting mengapa elemen

terlarut sangat esensial dalam penghalusan butir. Pertama adalah unsur-unsur terlarut mampu membatasi laju dari pertumbuhan butir sehingga akan memberikan waktu pembentukan inti untuk terjadi. Hal ini akan sangat penting apabila pengintian yang terjadi secara spontan dan tidak terarah. Kemampuan suatu elemen untuk membatasi laju pertumbuhan butir yang juga disebut kemampuan segregasi dari elemen ini dihitung melalui besarnya faktor pembatasan pertumbuhan (GRF) selama pembekuan. GRF dapat dihitung dengan menggunakan rumus<sup>[25]</sup>:

$$\text{GRF} = m \cdot C_0 \cdot (k-1) \dots (2.9)$$

dimana  $m$  adalah kemiringan garis liquidus,  $C_0$  adalah konsentrasi unsur terlarut yang terbesar (dalam hal ini adalah Ti), dan  $k$  adalah koefisien partisi kesetimbangan antara cairan dan padatan pada daerah antarmuka pertumbuhan butir.

Selanjutnya yang sangat penting adalah kemampuan segregasi dari unsur-unsur terlarut ini dengan cara menciptakan zona pendinginan lanjut mendatar di depan daerah antarmuka pertumbuhan butir. Zona pendinginan lanjut mendatar tersebut kemudian mengaktifkan partikel pembentuk inti lain di depan daerah antarmuka pertumbuhan butir, sehingga akan mengganggu pertumbuhan butir tersebut dan memberikan waktu kepada butir lain untuk tumbuh. Gambar 2.53 memperlihatkan adanya zona pendinginan lanjut mendatar 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 lebur<sup>[25]</sup>.



**Gambar 2.53** Zona pendinginan lanjut mendatar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit<sup>[25]</sup>

Pada Tabel 2.14 diperlihatkan kemampuan segregasi beberapa unsur terlarut pada paduan aluminium. Titanium diketahui sebagai unsur yang memiliki daya segregasi terbesar sebab 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>[25]</sup>.

**Tabel 2.14** Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut pada aluminium<sup>[25]</sup>

Unsur	$k$	$m$	$(k - 1)m$	Konsentrasi		Tipe Reaksi
				Maksimum (wt%)		
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

Teori paradigma unsur terlarut telah menambahkan serta melengkapi teori-teori penghalusan butir 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. Teori ini juga sependapat dengan teori pembentukan inti duplex yang menyebutkan bahwa  $TiAl_3$  sebagai partikel pembentuk inti yang tumbuh pada permukaan  $TiB_2$ , namun sekali lagi keberadaan unsur-unsur terlarut memegang peranan yang sangat penting<sup>[25]</sup>.

### 2.10.3 Efek Pemudaran (*Fading*)

Pemudaran merupakan kejadian dimana penghalus butir kehilangan kemampuannya setelah beberapa waktu atau dengan kata lain pengaruh yang dihasilkan akibat penambahan penghalus butir tidak akan menghasilkan apa-apa

seiring dengan berjalanya waktu. Penyebab utama terjadinya mekanisme pemudaran diantaranya<sup>[27]</sup>, yaitu:

1) Pengendapan (*settling*)

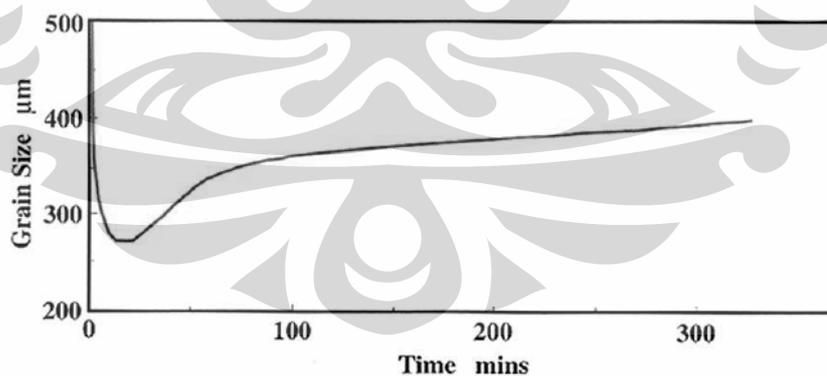
Pengendapan bisa terjadi pada logam cair yang tidak mengalami pengadukan secara kontinyu, sehingga menyebabkan  $TiB_2$  dan  $TiAl_3$  yang berperan sebagai penghalus butir masing-masing memiliki berat jenis  $4.5g/cm^3$  dan  $3.35 gr/cm^3$  yang memudahkannya mengalami pengendapan pada aluminium cair yang hanya memiliki berat jenis  $2.7 g/cm^3$ .

2) Penggumpalan

Proses penggumpalan dapat terjadi karena partikel-partikel borida dapat dengan mudah mengalami penggumpalan sehingga densitasnya meningkat dan akhirnya mengendap lebih cepat ke dasar *furnace*.

3) Pencemaran

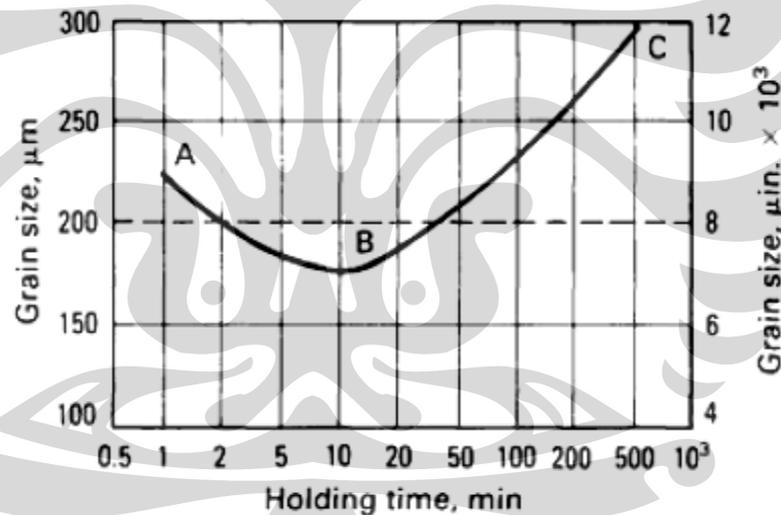
Pencemaran merupakan permasalahan yang sangat serius karena dapat terjadi dengan sangat cepat dan tidak dapat dikembalikan. Elemen pencemar kimia seperti zirkonium dipercaya dapat mensubstitusi titanium pada partikel  $TiAl_3$  atau pun  $TiB_2$  menjadi  $(Zr,Ti)Al_3$  atau  $(Zr,Ti)B_2$ , hal ini dapat membuat pembentukan inti menjadi berkurang.



Gambar 2.54 Pemudaran penghalus butir jenis AlTiB pada paduan aluminium<sup>[26]</sup>

Mekanisme pemudaran dalam proses penghalus butir pada aluminium cair sangat perlu diperhatikan, dengan cara menemukan waktu kontak keefektifan yang paling tinggi penghalus butir dengan logam cair. Jika waktu kontak terlalu singkat, maka ukuran butir yang halus sulit untuk dicapai, dan jika waktu kontak

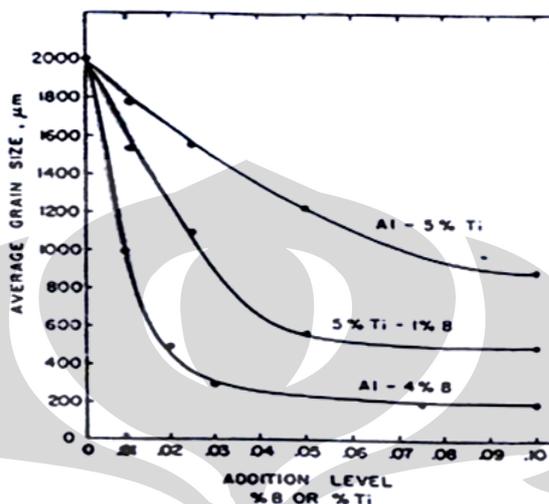
terlalu lama, keefektifan penghalus butir juga semakin turun<sup>[18]</sup>. Keefektifan dari  $\text{TiAl}_3$  and  $\text{TiB}_2$  sebagai penghalus butir hanya dapat terlihat pada waktu 20 menit awal setelah pencampuran<sup>[26]</sup>. Oleh karena itu, untuk menghindari mekanisme pemudaran, perlu dilakukan pengadukan pada aluminium cair secara berkala agar partikel-partikel tersebut dapat kembali merata ke seluruh aluminium cair dan dapat bertindak sebagai nukleat<sup>[26]</sup>. Kemampuan penghalus butir akan berkurang seiring dengan waktu, hal ini disebut dengan waktu pudar. Hal ini disebabkan oleh berat jenis dari  $\text{TiAl}_3$  yang lebih tinggi ( $3.35 \text{ g/cm}^3$ ) dibandingkan dengan aluminium ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ) sehingga partikel partikel  $\text{TiAl}_3$  akan jatuh ke bawah dan mengendap di bagian bawah mesin sehingga tidak efektif lagi untuk menjadi penghalus butir<sup>[16]</sup>. Setelah waktu pudar terlewati, maka besar butir akan perlahan menjadi besar kembali, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.54.



**Gambar 2.55** Pengaruh waktu tahan terhadap ukuran butir dari logam yang diberi penghalus butir. A-B merupakan waktu kontak, B-C adalah waktu pudar<sup>[10]</sup>

Pada saat terjadi efek pudar, maka penghalus butir perlahan-lahan akan kehilangan pengaruhnya terhadap ukuran butir, sehingga setelah waktu pudar selesai, logam akan kembali ke keadaan seperti sebelum diberikan penghalus butir (lihat Gambar 2.55). Penambahan unsur boron akan menambah waktu pudar sehingga efek penghalus butir akan bertahan lebih lama. Kemampuan penghalusan butir tergantung dari morfologi dari fasa intermetalik yang terdapat di dalam paduan. Penghalus butir yang kurang baik mengandung  $\text{TiAl}_3$  berbentuk

seperti kubus, sedangkan penghalus butir yang baik mengandung fasa intermetalik duplex yang terdiri dari partikel  $TiAl_3$  yang diselimuti oleh partikel borida, seperti  $TiB_2$ <sup>[14]</sup>. Gambar 2.56 menunjukkan pengaruh penambahan boron terhadap ukuran butir pada A356.



Gambar 2.56 Efek boron pada penghalusan butir dari A356<sup>[14]</sup>

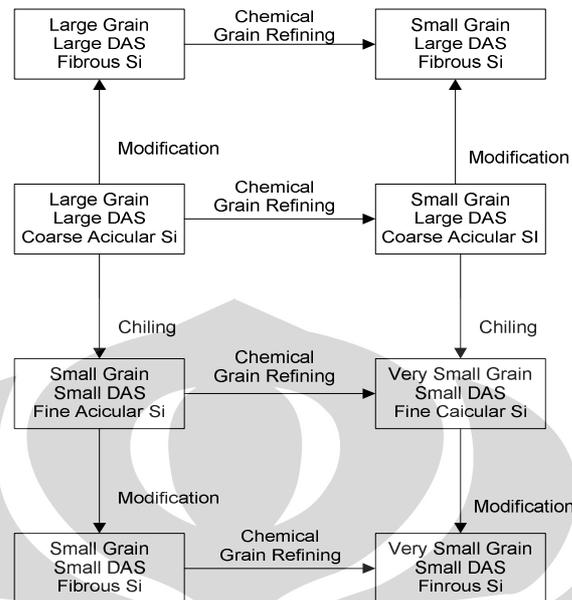
## 2.11 EFEK PENAMBAHAN PENGHALUS BUTIR DAN MODIFIER

Penelitian mengenai penambahan penghalus butir dan *modifier* secara bersamaan ke dalam logam cair telah banyak dilakukan. Banyak para ahli yang berpendapat bahwa apabila ditambahkan kedua-duanya secara bersamaan maka akan didapatkan suatu peristiwa penghilangan satu sama lain yang disebut sebagai peristiwa peracunan. Peristiwa ini sebenarnya tidak hanya terjadi akibat interaksi antara penghalus butir dan *modifier* saja tetapi dapat terjadi antara penghalus butir dan unsur silikon dalam logam cair seperti yang telah kita bahas pada pembelajaran terdahulu<sup>[18]</sup>.

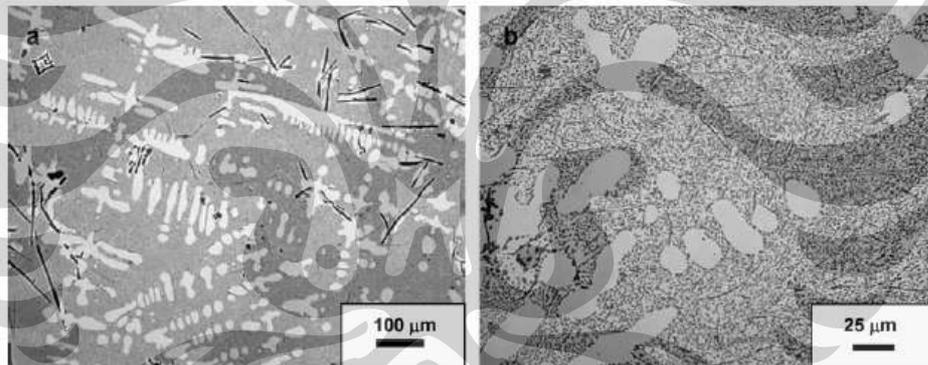
Hubungan antara penambahan penghalus butir dan *modifier* dapat dilihat dari pada Gambar 2.57. Sedangkan struktur mikro hasil penambahan keduanya dapat dilihat pada Gambar 2.58. Modifikasi dan penghalusan butir yang digunakan secara bersamaan dapat menyebabkan efek negatif terhadap kedua proses tersebut<sup>[18]</sup>, antara lain :

1. Zona *Mushy* (zona lumpur) akan menjadi lebih lama.
2. Jari-jari dari saluran cair akan menjadi lebih kecil sedangkan jumlah dari saluran arus akan meningkat.

3. Dapat menyebabkan timbulnya banyak porositas.



Gambar 2.57 Hubungan antara penghalus butir, rasio pendinginan, dan unsur modifikasi<sup>[26]</sup>



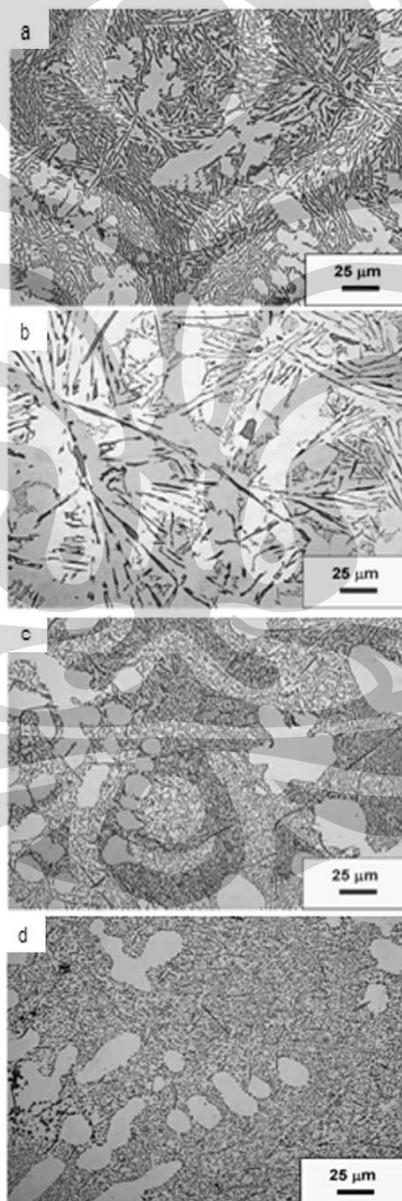
Gambar 2.58 Struktur mikro Al-12Si setelah penambahan 0.03 wt.% Ti-0.05 wt.% Sr<sup>[26]</sup>

### 2.11.1 Pengaruh Penggabungan Penghalus Butir dan *Modifier*

1) Pengaruh terhadap struktur mikro

Juan Asensio-Lozano et al<sup>[28]</sup> melakukan penelitian mengenai efek penambahan penghalus butir Al-3Ti-1B serta *modifier* Al-10Sr pada paduan Al-12Si. Pada penelitian ini dikatakan bahwa dengan penambahan batangan Al-3Ti-1B memiliki pengaruh yang cukup baik pada penghalusan dendrit dari fasa  $\alpha$ -Al. Penambahan Ti meningkatkan fraksi volume dari fasa  $\alpha$ -Al dan silikon pertama berbentuk kubus serta menghaluskan ukuran butir. Penambahan *master alloy* Al-10Sr akan meningkatkan fraksi volume dari

dendrit  $\alpha$ -Al primer. Pada Gambar 2.59 diperlihatkan perubahan struktur mikro pada paduan Al-12Si pada penambahan penghalus butir dan/atau *modifier*. Setelah penambahan Ti, diamati bahwa elemen ini memiliki kemampuan untuk mengurangi struktur columnar serta meningkatkan struktur *cellular*. Penambahan Ti pada paduan dengan modifikasi Sr akan memberikan efek pada transisi *columnar-cellular* dari struktur butir, meskipun masih terlihat adanya campuran keduanya. Penambahan Sr akan mentransformasi struktur silikon eutektik menjadi *fiber/globules* yang seragam dan terdistribusi.



**Gambar 2.59** Mikrostruktur dari paduan Al-12Si ; (a) tanpa penambahan apapun, (b) mengandung 0.03 wt.% Ti, (c) mengandung 0.04 wt. %Sr, (d) dengan penambahan 0.03 wt.% Ti dan 0.05 wt.% Sr<sup>[28]</sup>

## 2) Pengaruh terhadap nilai SDAS

A.K Prasada Rao et al<sup>[24]</sup> melakukan penelitian terhadap paduan Al-7Si dengan kombinasi antara penambahan penghalus butir serta *modifier*. Pengamatan dilakukan besarnya nilai SDAS. Tabel 2.15 memperlihatkan pengaruh penambahan penghalus butir dan *modifier* terhadap nilai SDAS. Nilai SDAS akan menggambarkan besarnya dendrit  $\alpha$ -Al yang ada. Semakin besar nilai SDAS akan menggambarkan semakin besarnya jarak antara dua lengan dendrit utama dalam material.

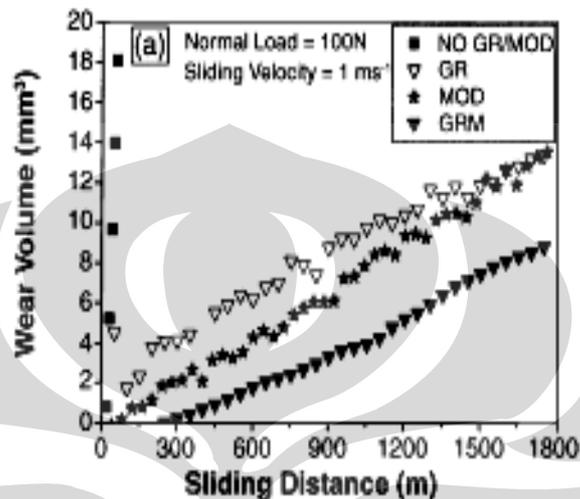
**Tabel 2.15** Pengaruh penambahan penghalus butir dan/atau *modifier* terhadap SDAS Al-7Si<sup>[24]</sup>

Penambahan pada Al-7Si		SDAS ( $\mu\text{m}$ )
<i>grain refiner</i>	<i>modifier</i>	
-	-	60
Al-1Ti-3B	-	24
-	0.02 % Sr	51
Al-1Ti-3B	0.02 % Sr	22

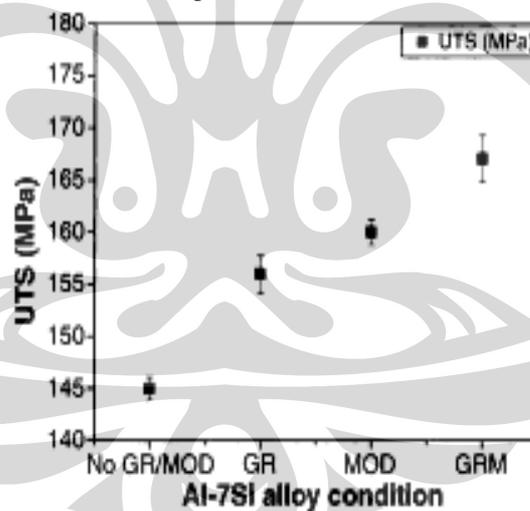
## 3) Pengaruh terhadap sifat mekanis

A.K Prasada Rao et al<sup>[24]</sup> melakukan pengujian keausan pada paduan Al-7Si yang ditambahkan penghalus butir dan *modifier*. Dari hasil pengujian ini didapatkan bahwa dengan penggabungan penghalus butir dan *modifier* akan membuat paduan Al-7Si memiliki ketahanan aus yang paling tinggi dibandingkan paduan yang diberikan penghalus butir saja, *modifier* saja, ataupun tanpa penambahan penghalus butir dan *modifier*. Hal ini lihat dari *wear volume specimen* dengan penggabungan penghalus butir dan *modifier* memiliki nilai yang paling rendah jika dibandingkan dengan lainnya. Gambar 2.60 menunjukkan pengaruh penambahan penghalus butir dan *modifier* terhadap ketahanan aus paduan Al-7Si. Pada uji kekuatan tarik paduan Al-7Si didapatkan paduan tanpa penambahan penghalus butir dan atau *modifier* memiliki kekuatan tarik yang rendah. Dengan penambahan penghalus butir atau *modifier* terjadi peningkatan UTS yang cukup signifikan. Pada Gambar 2.61 terlihat bahwa paduan dengan penambahan penghalus

butir dan *modifier* memiliki nilai UTS yang paling tinggi<sup>[24]</sup>. Peningkatan sifat mekanis yang terjadi berhubungan dengan struktur mikro yang terjadi dimana dengan kombinasi penghalus butir dan *modifier* membuat pembentukan dendrit dan silikon eutektik yang halus melalui kedua perlakuan tersebut.



Gambar 2.60 Pengaruh penambahan penghalus butir dan *modifier* terhadap ketahanan aus paduan Al-7Si<sup>[24]</sup>



Gambar 2.61 Pengaruh penambahan penghalus butir dan *modifier* terhadap kekuatan tarik paduan Al-7Si<sup>[24]</sup>

#### 4) Efek Terhadap Porositas

Shivkumar<sup>[22]</sup> menemukan bahwa jumlah porositas dalam paduan yang mengkombinasikan modifikasi dan penghalus butir lebih sedikit dari paduan yang hanya dimodifikasi saja tapi lebih banyak dari pada paduan yang dilakukan proses penghalus butir saja. Hal ini dikarenakan pada penggabungan penghalus butir dan *modifier* zona lumpur akan menjadi lebih

panjang, dan *radius liquid* salurannya akan semakin mengecil ketika jumlah aliran salurannya meningkat. Hal inilah sebagai salah satu penyebab meningkatnya porositas.

Beberapa ahli yang telah melakukan penelitian ini sebelumnya berkesimpulan sebagai berikut, antara lain :

- 1) Shivkumar et al<sup>[22]</sup>, telah mempelajari bahwa jumlah porositas pada logam hasil pengecoran dapat diminimalisir apabila kombinasi *grain refiner* dan *modifier* lebih rendah dari kadar *modifier* yang lebih rendah dan kadar penghalus butir yang lebih tinggi. Pada paduan aluminium A 356, penambahan penghalus butir akan meningkatkan temperatur nukleasi  $\alpha$ -Al primer sebesar 4-5°C, namun di sisi lain penambahan *modifier* Sr akan menekan temperatur eutektik sampai 7-8°C. Apabila dikombinasikan keduanya maka akan menghasilkan *range* solidifikasi atau perbedaan temperatur dari temperatur nukleasi  $\alpha$ -Al ke temperatur eutektik akan mengalami peningkatan sebesar 11-13°C. Penambahan sejumlah kecil Ti dan B akan menyebabkan pergeseran kurva pendinginan ke atas. Penambahan penghalus butir akan mempercepat nukleasi  $\alpha$ -Al primer karena adanya nuklei 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 nuklei dengan kesempatan tumbuh yang rendah pada waktu yang diberikan selama proses nukleasi dan pertumbuhan awal fasa  $\alpha$ -Al. Perubahan pada parameter temperatur eutectic merupakan hal yang sama baik bagi masing-masing ataupun kombinasi kedua *treatment* tersebut, yang mengindikasikan bahwa penghalus butir dan *modifier* tersebut bisa bertindak sendiri selama proses solidifikasi.
- 2) Liao dan Sun<sup>[21]</sup>, menyimpulkan bahwa mendekati komposisi paduan eutektik, efek dari boron akan melemah seiring dengan semakin meningkatnya kadar stronsium, secara tidak langsung dapat dikatakan bahwa efek penghalusan butir yang dilakukan oleh boron akan mengalami *poisoned* yang diakibatkan oleh unsur stronsium. Kefektifan Sr pada

logam cair akan mengalami pengurangan selama peningkatan Al-5%Ti-1%B yang mengalami modifikasi Sr. 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 SrB<sub>6</sub>. Dengan adanya kelebihan boron dalam aluminium cair dalam bentuk AlB<sub>2</sub> akan bereaksi dengan stronsium membentuk SrB<sub>6</sub> melalui reaksi seperti berikut ini :

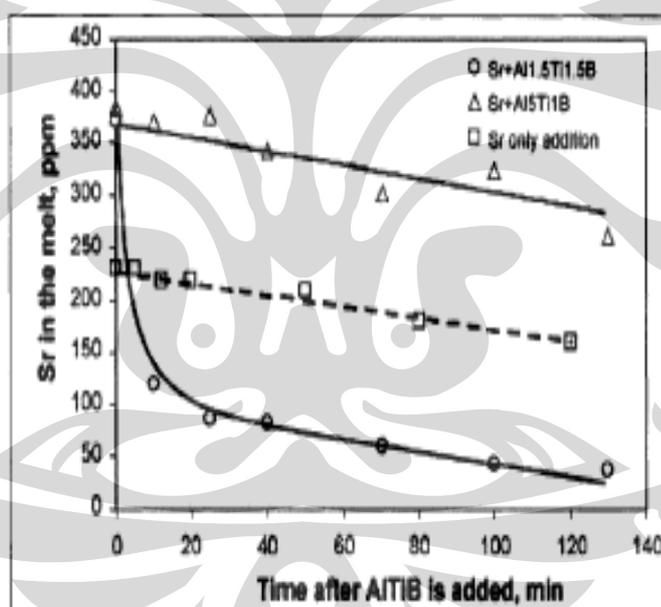


Partikel SrB<sub>6</sub> yang terbentuk memiliki berat jenis yang tinggi sekitar 3.422 g/cm<sup>3</sup> dan kemudian akan mengendap di bagian bawah cairan. Partikel SrB<sub>6</sub> tersebut akan terus tumbuh ketika mengendap. Sebagai hasilnya, maka senyawa intermetalik yang kaya akan stronsium dan boron akan berada dilapisan pada bagian bawah logam cair dan tentunya kadar stronsium dalam logam cair akan menurun secara drastis<sup>[29]</sup>.

Bagaimanapun, konsentrasi stronsium akan terus menurun seiring dengan bertambahnya waktu kontak dalam logam cair. Paduan aluminium-silikon cair diketahui kehilangan stronsium karena adanya oksidasi pada permukaan dan penguapan. Jadi penambahan penghalus butir bukan satu-satunya faktor yang menyebabkan hilangnya stronsium dalam logam cair. Rao et al<sup>[24]</sup>, menggunakan Al-5%Ti-2%C-15%Sr batangan untuk paduan LM25 yang sama dengan A356 pada pengujiannya menyimpulkan bahwa efek *poisoning* ini dapat saling menguntungkan apabila Sr dan boron berada dalam batasan tertentu, contohnya saat mereka sama-sama melemah karena adanya efek *fading*. Interaksi ini memungkinkan untuk menimbulkan senyawa SrB<sub>6</sub>. Mereka percaya bahwa afinitas yang kuat dari B untuk Ti membentuk inti TiB<sub>2</sub> cenderung untuk menghambat reaksi antara Sr dan B untuk membentuk SrB<sub>6</sub> yang dapat mengakibatkan deaktivasi Sr sebagai *modifier*. Hal yang sama juga terjadi pada penurunan efektivitas stronsium sebagai *modifier* dalam aluminium cair ketika meningkatnya penambahan *master alloy* Al-5%Ti-1%B. Hal tersebut terjadi karena adanya efek *poisoning* dari penghalus butir terhadap

modifikasi stronsium yang dihasilkan dari interaksi antara stronsium dan titanium.

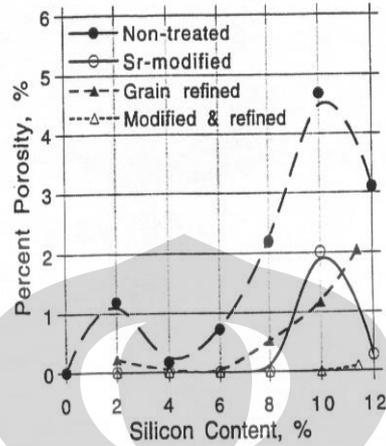
- 3) Lu dan Dahle<sup>[18]</sup>, menyimpulkan bahwa penambahan Al-1.5%Ti-1.5%B akan mengakibatkan penghilangan Sr secara cepat jika dibandingkan dengan treatment menggunakan Al-5%Ti-1%B, tetapi dapat menyebabkan terbentuknya silikon primer yang kasar dan halus. Penghilangan yang cepat dari efek modifikasi menindikasikan bahwa terjadi ketidakefektifan dalam penggunaan *modifier* Sr pada aluminium cair yang berguna untuk memodifikasi silikon eutektik. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pada logam yang di-*treatment* dengan Al-1,5%Ti-1,5%B akan memiliki stronsium bebas yang tidak cukup untuk memodifikasi semua silikon eutektik pada logam tersebut (lihat Gambar 2.62)<sup>[26]</sup>.



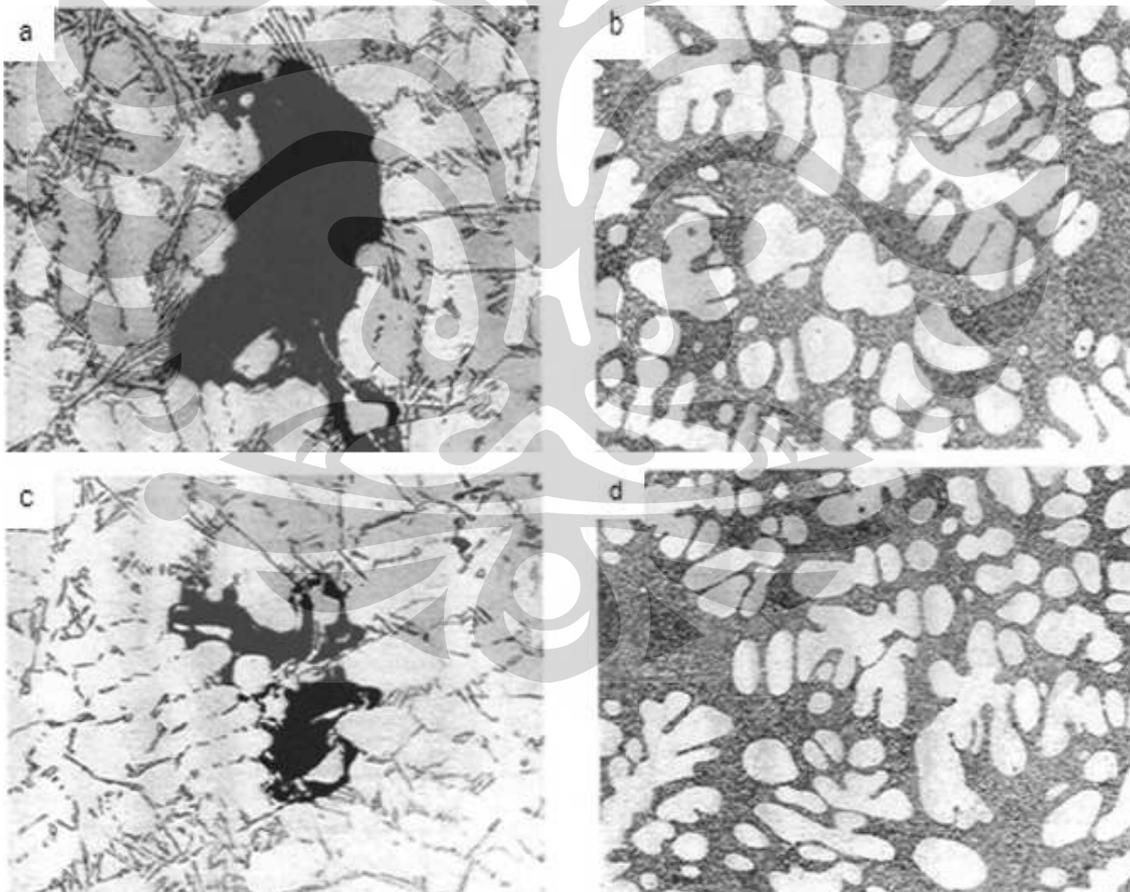
Gambar 2.62 Kandungan Sr setelah penambahan Ti<sup>[26]</sup>

- 4) Nogita dan Dahle<sup>[23]</sup>, menyimpulkan bahwa penambahan boron tidak memberikan efek yang cukup berarti terhadap *modifier* pemudaran melainkan hanya perubahan silikon primer menjadi lebih halus. Sehingga dapat disimpulkan bahwa Sr bersifat stabil pada logam cair dan dapat menyebabkan *recovery* yang cukup tinggi selama penambahan, boron

recovery kurang dari 50%. Temperatur pertumbuhan silikon eutektik akan berkurang seiring dengan rasio Sr-B.



**Gambar 2.63** Kadar porositas vs kadar silikon sebelum dan setelah penambahan *grain refiner* dan *modifier*<sup>[18]</sup>



**Gambar 2.64** (a) Tidak mengalami perlakuan khusus, (b) mengalami modifikasi, (c) mengalami penghalusan butir dan (d) mengalami penghalusan butir dan modifikasi<sup>[19]</sup>

Mereka menyimpulkan bahwa silikon eutektik yang berbentuk *fibrous* akan mengalami pendinginan lanjut lebih besar dari 2°C. Pada saat rasio Sr-B mencapai 0.4 dan setelah mengalami penembakan EDS didapatkan bahwa penambahan penghalus butir dan *modifier* dapat menyebabkan terjadinya peretakan paduan akibat terbentuknya  $Al_4SrSi_2$ . Dengan kata lain, dapat dikatakan juga bahwa interaksi antara penghalus butir dan *modifier* dapat menyebabkan berkurangnya kadar boron karena terbentuknya fasa silikon primer yang kasar (lihat Gambar 2.64). Gambar 2.63 menjelaskan tentang hubungan antara kadar porositas dan kadar silikon sebelum dan setelah penambahan *grain refiner* dan *modifier*.

## 2.12 TINJAUAN UMUM PROSES PENGECORAN *DIE CASTING*

Proses pengecoran *die casting* adalah salah satu metode pengecoran dengan menggunakan cetakan logam dan metode ini adalah cara yang tercepat dalam hal waktu untuk memproduksi komponen pengecoran dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan pengecoran cetakan pasir. Proses pengecoran dengan cetakan dilakukan dengan memberikan tekanan pada cairan metal sehingga melewati rongga atau celah dari *dies* (cetakan). Cetakan yang biasanya digunakan terdiri dari dua bagian yang dapat membuka dan menutup sepanjang batas garis vertikal. Pada mesin cetakan pengecoran, setengah cetakan tersebut biasanya dikenal dengan nama "*cover dies*" dan yang setengahnya lagi dikenal dengan nama "*dies ejector*".

Cetakan biasa yang digunakan terbuat dari baja paduan dan harus memiliki beberapa persyaratan antara lain :

1. Memiliki dimensi yang stabil
2. Memiliki ketahanan terhadap *heat cracking* yang baik
3. Memiliki ketangguhan yang baik
4. Memiliki ketahanan terhadap erosi yang baik.

Dalam prosesnya, pengecoran dengan metode ini biasanya dijalankan secara semi-otomatis dimana pada awal proses produksi operator akan melakukan proses penyetingan mesin dimana parameter-parameter produksi diprogramkan ke dalam mesin, seperti temperatur, tekanan yang akan diberikan, dan lain sebagainya. Kemudian, mesin akan bekerja mengikuti pengaturan yang diberikan oleh operator. Mesin cetakan pengecoran tersebut sebenarnya memiliki fungsi-fungsi utama, antara lain :

1. Menutup dua bagian cetakan tersebut dengan menggerakkan *dies moving* (*dies ejector*) ke arah cetakan yang tidak bergerak (*cover dies*).
2. Mengamankan bagian batas antara dua bagian cetakan tersebut agar tertutup dengan rapat, sehingga saat cairan metal dimulai diberikan tekanan, cetakan tidak akan membuka.
3. Memberikan tekanan pada *molten metal* ke dalam cetakan.
4. Membuka kembali cetakan dengan menggerakkan *moving dies* menjauh dari *fixed dies* dan *part* hasil proses dapat dikeluarkan.

Secara umum, jenis-jenis mesin *die casting* dibagi menjadi tiga bagian, yaitu :

#### 1. Mesin Ruang Panas

Mesin cetakan pengecoran jenis ini memiliki *furnace* tersendiri yang bisa berlaku sebagai dapur lebur atau dapur tahan. Biasanya tekanan yang diberikan pada cairan metal adalah dibawah  $150 \text{ Kg/cm}^2$ .

#### 2. Mesin Ruang Dingin

Ruang dingin yang dimaksud adalah baja silinder yang posisinya horizontal dimana pada bagian tersebut cairan metal akan diberikan tekanan. Mesin jenis ini ideal untuk logam seperti *aluminium alloy* yang tidak dapat dilakukan proses pengecoran dalam hal ruang panas mesin karena kereaktifan dari cairan aluminium dengan baja. Tekanan yang diberikan pada ruang dingin berkisar antara  $300 \text{ kg/cm}^2$  sampai dengan

1600 kg/cm<sup>2</sup>. Pada ruang dingin mesin biasanya meliputi beberapa tahap pemberian tekanan atau injeksi yang dilakukan pada cairan metal untuk memastikan keseragaman pengisian rongga cetakan dan mencegah pembentukan porositas pada *part* hasil pengecoran.

### 3. Peledakan udara

Mesin jenis ini berasal dari ruang panas mesin, dimana pada mesin jenis ini dipergunakan udara yang terkompresi untuk menekan cairan metal mengisi rongga cetakan. Dikarenakan bentuk dan model leher angsa *-gooseneck-*, maka mesin jenis ini dapat mendorong cairan metal dengan lebih mudah dengan menggunakan hembusan udara tersebut.

Karena sangat sedikit material cetakan yang dapat tahan terhadap temperatur penuangan yang sangat tinggi, sehingga material besi dan baja jarang dilakukan proses pengecoran dengan menggunakan metode ini. Biasanya, material yang dicor dengan menggunakan metode ini adalah material-material *non-ferrous*. Seng (Zn) yang mempunyai temperatur lebur sekitar 380<sup>0</sup>C sangat mudah dilakukan proses cetakan pengecoran ini dan logam-logam paduan lain yang biasanya dilakukan proses cetakan pengecoran adalah aluminium, magnesium, *copper-base alloy*, *tin-base alloy*, dan timbal (*lead*).

Adapun keuntungan menggunakan metode pengecoran *die casting* adalah sebagai berikut :

1. Memungkinkan produksi yang bersifat massal. Hal ini dikarenakan dengan menggunakan mesin ruang panas, dapat dihasilkan 300-350 *part* pengecoran per jam dan jika menggunakan mesin ruang dingin, dapat menghasilkan 75-150 *part* pengecoran per jam. Setiap waktu siklus yang berbeda-beda, mulai dari 3-12 detik pada mesin cetakan pengecoran modern.
2. Pengontrolan dimensi yang dapat dijaga sehingga sangat akurat. Pada seng (Zn), toleransi *part* dengan ukuran diatas 25 mm dapat mencapai  $\pm 0.075$  mm dan setiap penambahan ukuran 25 mm, toleransinya menjadi  $\pm 0.025$ mm.

3. Dapat digunakan untuk melakukan pengecoran terhadap *part-part* yang tipis. Pada kondisi baik, ketebalan minimal untuk seng (Zn) adalah 0.5 mm dan 0.8 mm untuk aluminium.
4. Dapat melakukan pengecoran untuk profil-profil yang detail yang sulit dan dengan tingkat akurasi yang tinggi.
5. Dapat meminimalisir *surface finish* dari *part* yang dihasilkan.
6. Cetakan pada mesin cetakan pengecoran dapat mempertahankan keakuratannya sehingga jutaan siklus pengecoran dapat dilakukan. Walaupun harga cetakan tersebut mahal, jika dibandingkan dengan sifat produksi massal yang dihasilkannya maka akan menjadi lebih ekonomis.

Namun, metode *die casting* ini juga memiliki beberapa kekurangan, antara lain :

1. Secara ekonomis, hanya dapat digunakan secara baik untuk logam-logam *non ferrous*.
2. Ukuran dari *part* yang diproses sangat terbatas. Untuk material seng (Zn), biasanya maksimum massa yang dapat dicor adalah sekitar 90 Kg dan untuk aluminium sekitar 20 kg.
3. Dikarenakan oleh harga cetakan yang relatif mahal, maka dibutuhkan produksi massal untuk memproduksi *part* yang diinginkan. Biasanya, minimum *part* yang harus dihasilkan untuk menutupi biaya yang disebabkan oleh pembelian cetakan saja sekitar 20.000 *part*.
4. Proses *die casting* biasanya dapat menyebabkan terperangkapnya gas sehingga menimbulkan porositas.

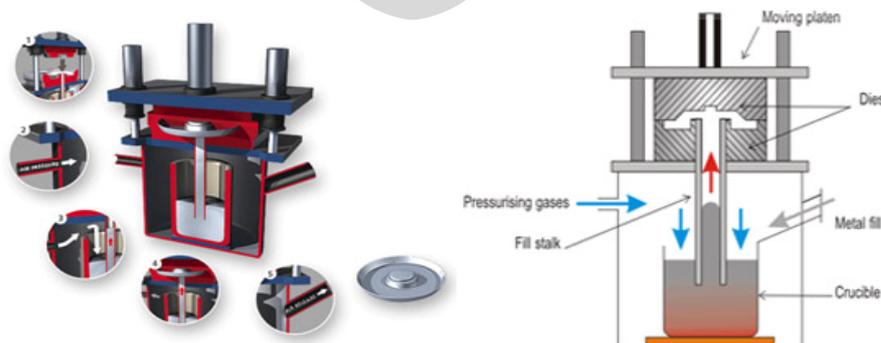
Seiring dengan perkembangan zaman, telah dikembangkan suatu metode pengecoran yang merupakan pengembangan dari metode *die casting*. Proses tersebut adalah proses *Low Pressure Die Casting* (LPDC). LPDC ini sedang marak dikembangkan dikarenakan proses yang dilakukan memiliki keuntungan sebagai berikut :

1. *Part* yang dihasilkan sedikit sekali yang terbentuk *flaw* (salah satu cacat kristal).
2. Dapat menghasilkan *part* dengan ketebalan yang lebih tipis jika dibandingkan dengan *part* yang dihasilkan dari proses *die casting*.

### 2.13 PROSES LOW PRESSURE DIE CASTING

Pengecoran LPDC merupakan salah satu jenis dari *permanent mold casting*. Pada jenis ini, digunakan cetakan permanen pada tanur yang tertutup. Prinsip kerjanya adalah dengan memberikan tekanan ke dalam tanur, sehingga logam cair masuk ke saluran menuju cetakan. Pada saat logam telah membeku, tekanan dilepaskan, cetakan dibuka, dan benda hasil cor diambil. Parameter-parameter yang mempengaruhi hasil dari LPDC ini adalah besarnya tekanan yang diberikan kepada logam cair, dan cetakan yang berperan dalam membentuk pembekuan terarah. Karena kebanyakan proses *low pressure die casting* menggunakan cetakan mempunyai satu jalan masuk cairan logam maka proses pemotongan saluran tuang bisa diminimalisasi<sup>[15]</sup>.

Kelemahan dari metode ini adalah adanya resiko inklusi yang disebabkan oleh naik turunnya cairan logam pada saluran menuju cetakan. Pada saat cetakan dibuka dan tekanan dilepaskan, cairan logam yang masih tersisa di saluran akan turun kembali ke tanur, dan proses yang berulang ulang dapat menyebabkan terbentuknya oksida di permukaan bagian dalam dari saluran. Hal ini dapat diatasi dengan memberikan tekanan balik pada saluran sehingga saluran tetap terisi oleh logam cair setiap saat<sup>[6]</sup>. Gambar 2.65 menjelaskan tentang skematik proses *Low Pressure Die Casting (LPDC)*<sup>[15]</sup>.



**Gambar 2.65** Skematik proses *Low Pressure Die Casting (LPDC)*<sup>[15]</sup>

Dalam pengecoran tekanan rendah, logam cair dimasukkan ke dalam krusibel tertutup kemudian dialirkan gas (biasanya udara tekan) yang bertekanan rendah di bawah satu atmosfer sehingga tekanan terjadi pada permukaan logam. Maka logam akan terdorong ke atas melalui pipa pengisi dan masuk ke dalam cetakan yang telah dipasang sebelah atas. Dengan demikian terbentuklah logam hasil coran. Dalam hal ini, penambahan tidak perlu dibuat karena pipa berfungsi sebagai penambah. Jadi, dalam pengecoran logam ini tekanan akan diberikan pada logam cair, penuangan dilakukan secara mekanik dan dipergunakan cetakan logam sehingga memungkinkan dilakukan produksi massal. Cara-cara pengecoran LPDC:

- 1) Karena logam cair secara langsung dipaksa masuk ke dalam cetakan melalui pipa pengisi dari krus tertutup, maka oksida logam cair hanya sedikit dan tidak akan terjadi bahwa oksida dari permukaan logam cair terbawa masuk ke dalam cetakan.
- 2) Penuangan terjadi secara berangsur-angsur dimana logam cair yang pertama dituangkan kemudian dipaksa didorong keatas oleh logam yang dituangkan sehingga terbentuk pembekuan mengarah dan logam mulai membeku dari bagian depan aliran logam. Akibatnya sukar terjadi rongga penyusutan, rongga udara, dan lain sebagainya sehingga didapat coran mampat serta baik. Selanjutnya mungkin juga mengecor paduan logam yang mempunyai daerah temperatur pembekuan sempit.
- 3) Karena adanya penambah dan saluran masuk yang besar tidak diperlukan maka persentase terpakai dari pengecoran logam menjadi sangat tinggi (diatas 90%), dengan demikian bukan hanya mengurangi jumlah logam cair dan biaya pengecoran, tetapi juga biaya pengolahan dapat diturunkan karena tidak perlu pemotongan penambah dan saluran-saluran.
- 4) Permukaan coran sangat halus dengan ketelitian ukuran yang sangat baik. Selain itu, dapat dibuat coran dengan bentuk yang lebih rumit. Kecepatan penuangan dapat diatur sehingga dapat dibuat pengecoran dengan dinding tipis atau pengecoran yang berukuran besar.

- 5) Biaya peralatan lebih rendah dan gerakan-gerakan mekanik dapat diatur secara otomatis sehingga produktivitas akan meningkat
- 6) Dapat menggunakan cetakan logam, cetakan grafit, cetakan kulit, cetakan resin dan cetakan proses CO<sub>2</sub>. Oleh karena itu, bahan coran tidak terbatas pada logam ringan saja, tetapi juga dapat digunakan untuk mengecor paduan dengan titik lebur tinggi seperti paduan tembaga, paduan besi, dan sebagainya.

Karena hal-hal itulah, saat ini LPDC telah banyak dipakai untuk mengecor paduan aluminium, dengan temperatur cairan  $\pm 700^{\circ}\text{C}$ , temperatur yang cocok untuk cetakan logam  $\pm 400^{\circ}\text{C}$ . tekanannya dari 0.15-0.7 kgf/cm<sup>2</sup> dan kecepatan peningkatan tekanan dari 0.025-0.060 kgf/cm<sup>2</sup> per detik. Namun, peningkatan tekanan dan waktu pendinginan untuk satu siklus berbeda-beda sesuai dengan bentuk dan tebal dinding dari coran<sup>[16]</sup>. Proses LPDC memiliki beberapa karakteristik yang khas dari proses dan produk. Karakteristik proses LPDC adalah<sup>[15]</sup>:

1. Menggunakan tekanan yang rendah yang berkisar pada nilai 0.2-0.3 Kgf/cm<sup>2</sup>.
2. Menggunakan inti dari pasir resin.

Karakteristik produk LPDC adalah<sup>[15]</sup>:

1. Ketebalan dinding *part* pengecoran minimal 3 mm.
2. Nilai toleransi yang diperbolehkan maksimum 0.25 mm.
3. *Surface finish* berkisar dari 4 sampai 12 mikron.
4. Ukuran lubang *core* minimal 6 mm.

Sebelum mesin dioperasikan, dilakukan proses *pre-heating*, yaitu pemanasan cetakan dengan menggunakan *burner*. Bahan bakar yang digunakan adalah LPG. *Pre-heating* dimaksudkan untuk:

- a. Mencegah kejutan panas atau *thermal shock* pada cetakan dan material *coating* yang dapat merusak cetakan dan *coating*.
- b. Cetakan berada pada temperatur ideal proses pengecoran untuk menghindari cacat misrun. Temperatur operasional cetakan adalah 400<sup>0</sup>C.

Selanjutnya operator mempersiapkan *jacket core* dan *port core* yang diperlukan untuk proses pengecoran. Sebelum dioperasikan, cetakan terlebih dahulu dibersihkan dengan *air blow gun* untuk menghilangkan *scrap* atau pasir yang mungkin tersisa dari proses sebelumnya. Kemudian *jacket core* dan *port core* dipasang atau di-*assy* pada cetakan didudukan yang telah ditentukan. Perhatikan posisi pemasangan *core*. Pemasangan yang salah akan berakibat:

- a. *Core* patah karena benturan *core* dengan *moving dies*. Akibatnya rongga *blank* pengecoran NG.
- b. *Core* terkikis karena bersinggungan dengan *moving dies*. Akibatnya terjadi rontokan pasir pada cetakan yang kemudian masuk ke dalam *part* pada saat injeksi. Pasir yang masuk ke dalam *part* menyebabkan cacat inklusi pasir pada *blank* pengecoran.
- c. Cetakan *upper* dan *lower* tidak dapat merapat sempurna, sehingga terjadi kebocoran aluminium keluar dari cetakan saat injeksi.

Setelah *jacket core* dan *port core* terpasang, diperlukan pembersih lagi dengan *air blow gun* untuk memindahkan pasir yang rontok saat proses *assy core*. Setelah cetakan bersih, proses pengecoran dimulai. Operator menekan tombol *start* pada mesin untuk menjalankan mesin *low pressure die casting*. Cetakan menutup saat proses injeksi akan dimulai. Parameter yang harus diperhatikan saat proses pengecoran, yaitu:

- a. *Air pressure* (tekanan udara untuk pendinginan cetakan)  $5-6 \text{ kg/cm}^2$ .
- b. *Press time* (waktu untuk memasukkan cairan ke dalam cetakan)  $140 \pm 40$  detik.
- c. *Cooling time* (waktu yang diperlukan untuk pembekuan cairan dalam cetakan)  $40 \pm 20$  detik.

Setelah proses injeksi selesai kemudian cetakan terbuka, selanjutnya operator menekan tombol *unloader "ON"*. Setelah itu *part* kepala tabung diambil secara otomatis oleh *unloader* unit. Selanjutnya operator melakukan pengecekan visual terhadap *part* yang dihasilkan. Dengan mengacu kepada standar *blank* pengecoran. Kepala tabung yang memenuhi standar visual (tidak cacat) dimasukkan dalam keranjang FG (berwarna hijau) untuk selanjutnya dikirim ke *station chipping*. Kepala tabung yang tidak memenuhi standar

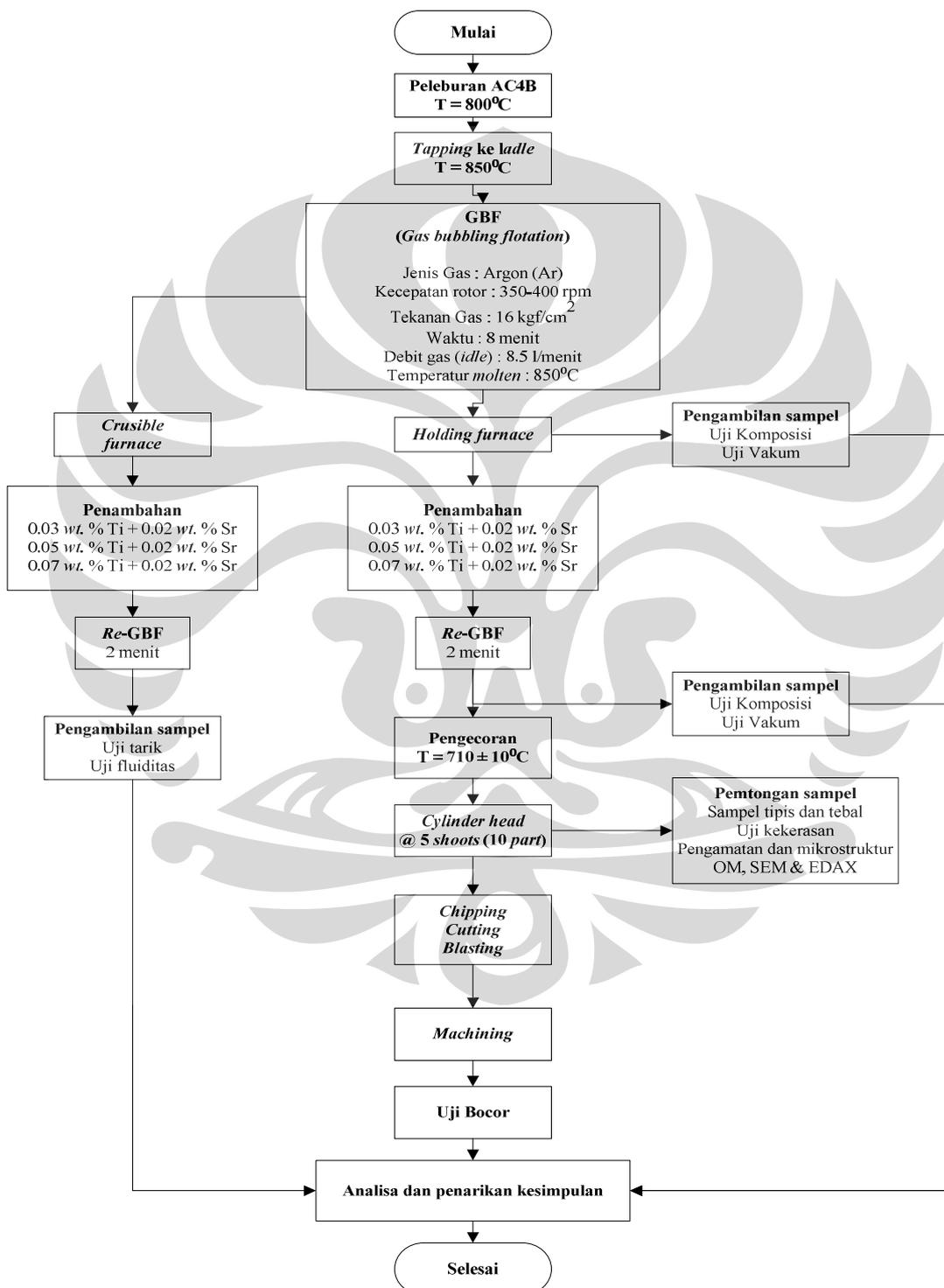
visual dimasukkan ke dalam keranjang *part reject* (warna merah). Pada *part* tipe KPH sebelum *blank* pengecoran dimasukkan ke dalam keranjang, terlebih dahulu melakukan *trimming* terhadap bagian *pin ejector*. Pada tahap ini, proses pengecoran telah selesai. *Part* selanjutnya dikirim ke *station chipping*.



# BAB 3

## METODE PENELITIAN

### 3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian<sup>[2]</sup>

### 3.2 PERALATAN DAN BAHAN

#### 3.2.1 Peralatan

Penelitian ini menggunakan peralatan :

1. Dapur peleburan FCECO dengan spesifikasi:
  - 1.1 Model HM - 150T buatan *Furnace Kakoki Co.Ltd*
  - 1.2 Kapasitas 1500 kg
  - 1.3 *Melting rate* 500 kg/jam
2. Mesin GBF(*Gas Bubble Flotation*) dengan spesifikasi:
  - 2.1 Model *Smart Clean* buatan PT Ostenko Promitra Jaya
  - 2.2 Agen atau material : Gas argon (Ar)
  - 2.3 Kecepatan rotor : 350-400 rpm
  - 2.4 Tekanan argon : 16 kgf/cm<sup>2</sup>
  - 2.5 Waktu : 8 menit
  - 2.6 Temperatur *molten* : 850 °C
  - 2.7 Debit gas Ar (*idle*) : 8,5 l/menit
3. Mesin *Low Pressure Die Casting* dengan spesifikasi:
  - 3.1 Model OG - LFR - 500P buatan Osaka Giken Co. Ltd
  - 3.2 Dapur induksi (*holding furnace*) :
    - a. Temperatur aluminium cair  $710 \pm 10$  °C
    - b. Kapasitas hingga 500 kg
  - 3.3 Mesin *inject* (LPDC) :
    - a. Temperatur *lower dies*  $375 \pm 75$  °C
    - b. Temperatur *upper dies*  $250 \pm 75$  °C
    - c. Tekanan *dies* sebesar  $256 \pm 6$  kPa
    - d. Waktu tekan 170 – 180 detik
4. *Ladle Bentone* yang di *preheat* dengan *burner* selama 30 – 60 menit
5. Neraca
6. *Forklift*
7. *Sludging rod*

8. *Skimmer*
9. *Cleaning Rod*
10. *Speedy*
11. *Injection Gas Bubble Flotation (Manual)*
12. Mesin potong *abrasive* (gergaji mesin) Heiwa
13. Cetakan spiral uji fluiditas
14. Cetakan sampel uji tarik
15. Alat uji vakum (uji porositas) OSTEK
16. Alat *spectometer* Shimadzu
17. Alat uji kekerasan (Rockwell B) merk Future Tech
18. Mesin amplas merk Ecomet
19. Mesin Poles merk Ecomet
20. Mikroskop optik merk Olympus
21. *Scanning Electron Microscope* LEO 420i
22. Lain-lain : spidol, tang penjepit, palu, masker dan sarung tangan.

### 3.2.2 Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan:

1. *Ingot* paduan aluminium AC4B
2. *Scrap* paduan aluminium AC4B
3. Penghalus butir merk *Coveral GR 2815* dalam bentuk *flux*
4. *Master Alloy Al-10 Sr*
5. *Flux* 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).

## 3.3 PROSES PENGECORAN

### 3.3.1 Perhitungan *Material Balance*

Sebelum melakukan proses peleburan dan pengecoran aluminium, dilakukan penghitungan banyaknya material yang akan diumpun ke dalam dapur, dengan asumsi bahwa material penghalus butir *Coveral GR – 2815 flux* yang digunakan mengandung kadar titanium sebesar 15 wt. % Ti serta dalam *master alloy Al-10 Sr* mengandung 10 % Sr. Oleh karena itu dilakukan perhitungan *material balance* dengan data-data yang terkait sebagai berikut :

Kapasitas *holding furnace* = 500 kg

Berat 1 *shot* (@2 part) = 3.8 kg

Berat Sampel:

Uji *Vacuum* = 0.15 kg

Uji Komposisi = 0.075 kg

Uji Tarik = 3 kg

Uji Fluiditas = 1 kg

Proses pengecoran ini dilakukan secara kontinu menggunakan satu *holding furnace* yang sama serta *dies* yang sama. Dilakukan secara bertingkat dari satu komposisi ke komposisi yang lain berurutan sesuai dengan variabel dari empat orang peneliti yang berbeda.

**1) Variabel komposisi 0.063 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr**

**Input :**

*Molten metal* = 405,251 kg

**Output :**

Sampel uji komposisi = 2 x 0.075 kg = 0.15 kg

Sampel uji vakum = 2 x 0.15 kg = 0.3 kg

Sampel uji fluiditas = 1 kg = 1 kg

Sampel uji tarik = 2 x 3 kg = 6 kg

*Cylinder head, 3 shoots* = 3.8 kg x 6 = 22.8 kg

**Total** = 30.25 kg

**Sisa** = 375.001 kg

Keadaan sebelum penambahan adalah 0.033 wt. % Ti dan 0 wt. % Sr . Sedangkan yang di inginkan adalah penambahan 0.03 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

sehingga komposisi akhir yang seharusnya tercapai adalah 0.063 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr.

Dalam *holding furnace* tersisa *molten* sebanyak 375.001 kg dengan kadar 0.033 wt. % Ti dan 0 wt. % Sr.

- Sr yang harus di masukan agar tercapai 0.02 wt. % Sr :

$$= 375.001 \text{ kg} \times (0.02 - 0) \%$$

$$= 0.075 \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan :

$$= 0.075 \text{ kg} \times 100/10$$

$$= 0.75 \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukan agar tercapai 0.064 wt. % Ti :

$$= 375.001 \text{ kg} \times (0.063 - 0.033) \%$$

$$= 0.1125 \text{ kg}$$

*Coveral GR 2815* yang ditambahkan :

$$= 0.1125 \text{ kg} \times 100/15$$

$$= 0.75 \text{ kg}$$

## 2) Variabel komposisi 0.083 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

Keadaan sebelum penambahan adalah 0.033 wt. % Ti dan 0.001 wt. % Sr. Sedangkan yang di inginkan adalah penambahan 0.05 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr sehingga komposisi akhir yang seharusnya tercapai adalah 0.083 wt. % Ti dan 0.021 wt. % Sr.

**Input :**

*Molten metal* = 431.167 kg

**Output :**

Sampel uji komposisi = 2 x 0.075 kg = 0.15 kg

Sampel uji vakum = 2 x 0.15 kg = 0.3 kg

Sampel uji fluiditas = 1 kg = 1 kg

Sampel uji tarik = 2 x 3 kg = 6 kg

*Cylinder head, 3 shoots* = 3.8 kg x 6 = 22.8 kg

**Total** = 30.25 kg

**Sisa** = 400.917 kg

Dalam *holding furnace* tersisa *molten* sebanyak 400.917 kg dengan kadar 0.001 wt. % Sr dan 0.033 wt. % Ti.

- Sr yang harus di masukan agar tercapai 0.02 wt. % Sr :

$$= 400.917 \text{ kg} \times (0.021 - 0.001) \% \\ = 0.0801 \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan :

$$= 0.0801 \text{ kg} \times 100/10 \\ = 0.801 \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukan agar tercapai 0.083 wt. % Ti :

$$= 400.917 \text{ kg} \times (0.083 - 0.033) \% \\ = 0.2004 \text{ kg}$$

*Coveral GR 2815* yang ditambahkan :

$$= 0.2004 \text{ kg} \times 100/15 \\ = 1.336 \text{ kg}$$

Ternyata setelah dilakukan pengujian komposisi hasil yang didapat belum sesuai dengan yang diinginkan sehingga dilakukan penambahan kembali kadar dari Sr dan Ti.

**Input :**

*Molten metal* = 400,917 kg

**Output :**

Sampel uji komposisi = 1 x 0.075 kg = 0.15 kg

**Sisa** = 400.902 kg

Dalam *holding furnace* tersisa *molten* sebanyak 400.902 kg dengan kadar 0.013 wt. % Sr dan 0.072 wt. % Ti.

- Sr yang harus di masukan agar tercapai 0.021 wt. % Sr :

$$= 400.902 \text{ kg} \times (0.021 - 0.013) \% \\ = 0.032 \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan :

$$= 0.032 \text{ kg} \times 100/10 \\ = 0.32 \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukan agar tercapai 0.083 wt. % Ti :

$$= 400.902 \text{ kg} \times (0.083 - 0.072) \%$$

$$= 0.04409 \text{ kg}$$

*Coveral GR 2815* yang ditambahkan :

$$= 0.04409 \text{ kg} \times 100/15$$

$$= 0.293 \text{ kg}$$

### 3) Variabel komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

Keadaan sebelum penambahan adalah 0.033 wt. % Ti dan 0.00 wt. % Sr. Sedangkan yang di inginkan adalah penambahan 0.07 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr. Sehingga komposisi akhir yang seharusnya tercapai adalah 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr.

**Input :**

*Molten metal* = 420.005 kg

**Output :**

Sampel uji komposisi = 2 x 0.075 kg = 0.15 kg

Sampel uji vakum = 2 x 0.15 kg = 0.3 kg

Sampel uji fluiditas = 1 kg = 1 kg

Sampel uji tarik = 2 x 3 kg = 6 kg

*Cylinder head, 3 shoots* = 3.8 kg x 6 = 22.8 kg

**Total** = 30.25 kg

**Sisa** = 389.775 kg

Dalam *holding furnace* tersisa *molten* sebanyak 389.775 kg dengan kadar 0.033 wt. % Ti dan 0.00 wt. % Sr.

- Sr yang harus di masukan agar tercapai 0.02 wt. % Sr :

$$= 389.775 \text{ kg} \times (0.02 - 0.00) \%$$

$$= 0.0779 \text{ kg}$$

*Master alloy Al-10Sr* yang ditambahkan :

$$= 0.0779 \text{ kg} \times 100/10$$

$$= 0.779 \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukan agar tercapai 0.108 wt. % Ti :

$$= 389.775 \text{ kg} \times (0.108 - 0.035) \%$$

$$= 0.2728 \text{ kg}$$

*Coveral GR 2815* yang ditambahkan :

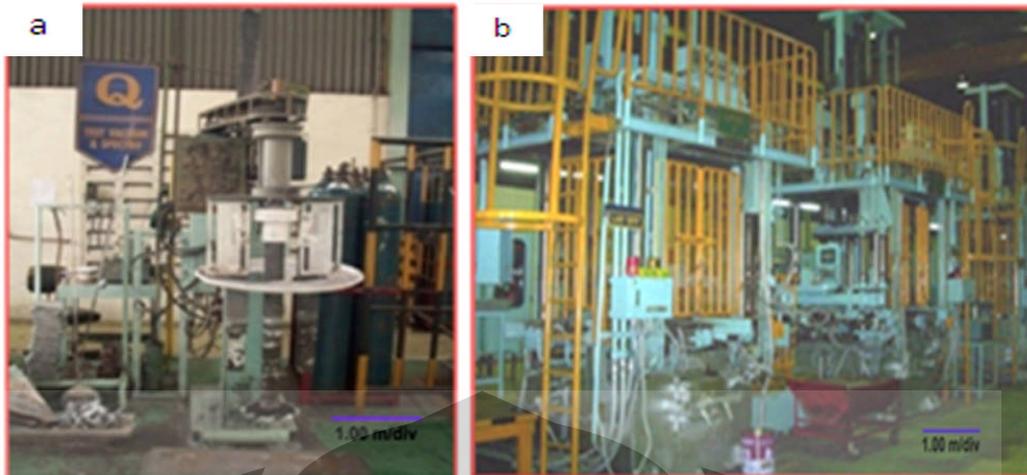
$$= 0.2728 \text{ kg} \times 100/15$$

$$= 1.8189 \text{ kg}$$

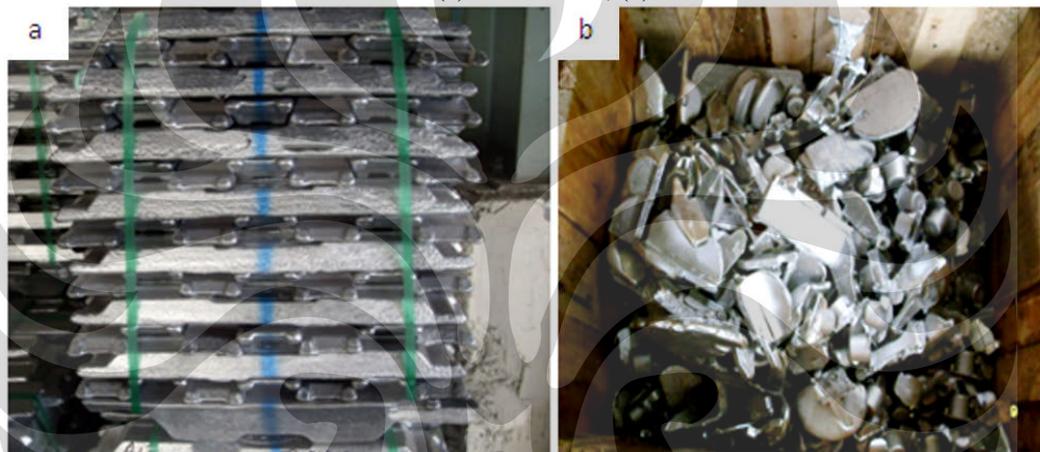
### 3.4 PROSEDUR PENELITIAN

#### 3.4.1 Proses Pengecoran

Proses peleburan ingot (70 %) dan *return scrap* (30 %) aluminium paduan AC4B dilakukan di PT AHM dengan menggunakan dapur *reverberatory*. Setelah *ingot* aluminium dan *return scrap* melebur pada suhu  $\pm 780$  °C, dilakukan proses *tapping* ke dalam ladle dengan kapasitas 500 kg (lihat Gambar 3.3). Ladle tersebut kemudian dibawa menuju alat GBF (*Gas Bubbling Flootation*) seperti pada Gambar 3.2 (a). Proses GBF bertujuan untuk mengeluarkan gas hidrogen terlarut dan juga untuk mengeluarkan kotoran yang ada dengan metode penyemprotan gas yang bersifat hampir vakum (argon) dan pengadukan (*stirring*) selama 8 menit. Kotoran yang mengapung permukaan aluminium cair dibersihkan dengan menggunakan penciduk khusus. Selama proses peleburan ini berlangsung dilakukan pula proses *fluxing*. Proses *fluxing* merupakan proses penambahan *cover flux Coveral 111* yang berfungsi memisahkan pengotor dari cairan aluminium sehingga pengotor dapat dengan mudah dibersihkan. *Cover flux* akan berperan sebagai *slag coagulant* atau pengikat kotoran yang ikut terlarut dalam aluminium cair dan mengapungkannya ke atas permukaan. Selanjutnya akan dilakukan proses pengangkatan kotoran (*disludging*) tersebut. Setelah proses GBF, ladle kemudian dibawa menuju mesin LPDC (*Low Pressure Die Casting*) dengan menggunakan *forklift*, pada mesin LPDC (Gambar 3.2 (b)), aluminium cair dimasukkan ke dalam *holding furnace* yang merupakan bagian bawah dari mesin LPDC.



Gambar 3.2 (a) Mesin GBF ; (b) Mesin LPDC<sup>[15]</sup>



Gambar 3.3 Material umpan (a) ingot AC4B , (b) scrap AC4B<sup>[15]</sup>



Gambar 3.4 Elemen yang akan ditambahkan (a) master alloy Al-10Sr, (b) penghalus butir flux Coveral GR-2815<sup>[15]</sup>

Setelah seluruh aluminium cair telah dimasukkan ke dalam *holding furnace*, proses pengecoran *cylinder head* dimulai, selain untuk menghasilkan sampel *cylinder head*, aluminium cair juga digunakan untuk pembuatan sampel uji

tarik, sampel uji spektro, sampel fluiditas, dan uji vakum. Pengecoran dimulai dengan komposisi 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, diikuti dengan komposisi 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr dan 0.108 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr (material yang ditambahkan dapat dilihat pada Gambar 3.4). Penambahan yang dilakukan sesuai dengan perhitungan *mass balance* yang didapat. Setelah penambahan, dilakukan pengujian komposisi untuk menentukan komposisi Ti dan Sr yang didapatkan. Setelah didapat komposisi yang sesuai dilakukan pengujian tarik, vakum dan fluiditas.

Agar hasil yang didapatkan lebih homogen maka dilakukan *re*-GBF atau *degassing* kembali pada aluminium cair tersebut (lihat Gambar 3.5). Metode yang digunakan dengan GBF manual atau *injection* GBF. Prinsip dari proses GBF manual ini sama halnya dengan proses GBF sebelumnya, hanya saja pada proses GBF manual gas argon di injeksikan dengan menggunakan *lance* yang dicelupkan ke dalam molten pada holding furnace. Proses ini berlangsung selama 2 menit. Setelah itu dilakukan proses *skimming* yaitu pengangkatan terak yang ada pada permukaan aluminium. Setelah bersih maka dilakukan pengujian vakum dengan alat OSTEK. Dari *holding furnace* kemudian diambil aluminium cair untuk dituang pada cetakan spektrometri, cetakan fluiditas dan cetakan uji tarik.



Gambar 3.5 Proses GBF manual dengan menggunakan *lance*<sup>[15]</sup>

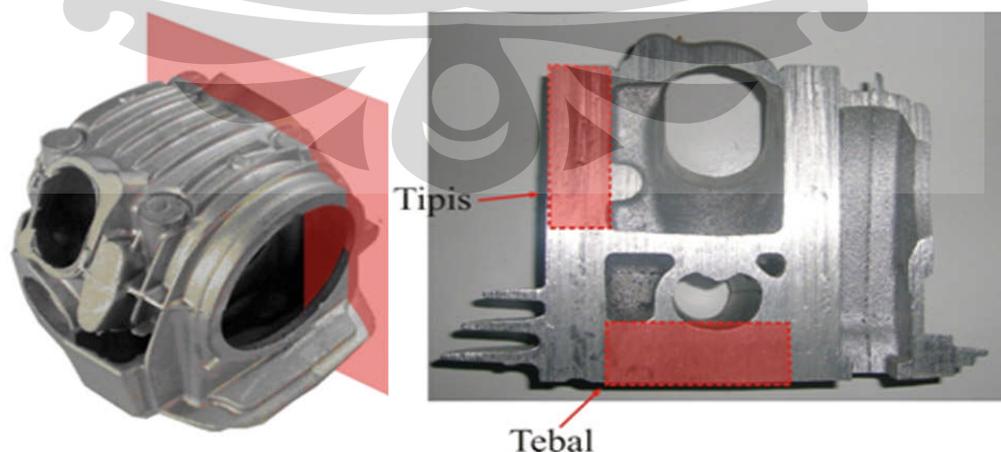
Proses LPDC diawali dengan *pre-heating* dari *dies* untuk menghindari terjadinya *thermal shock*. Proses LPDC dilakukan pada temperatur *molten* sekitar  $700 \pm 10$  °C. Dua *shoot* pertama merupakan *trial*. Pada komponen *cylinder head* ini diberikan *marking* untuk membedakan kadar Sr dan AlTiB yang diberikan. Pada

setiap proses injeksi dilakukan pencatatan terhadap tekanan, temperatur *dies*, temperatur molten serta temperatur dari atmosfer.

### 3.4.2 Proses Preparasi Sampel

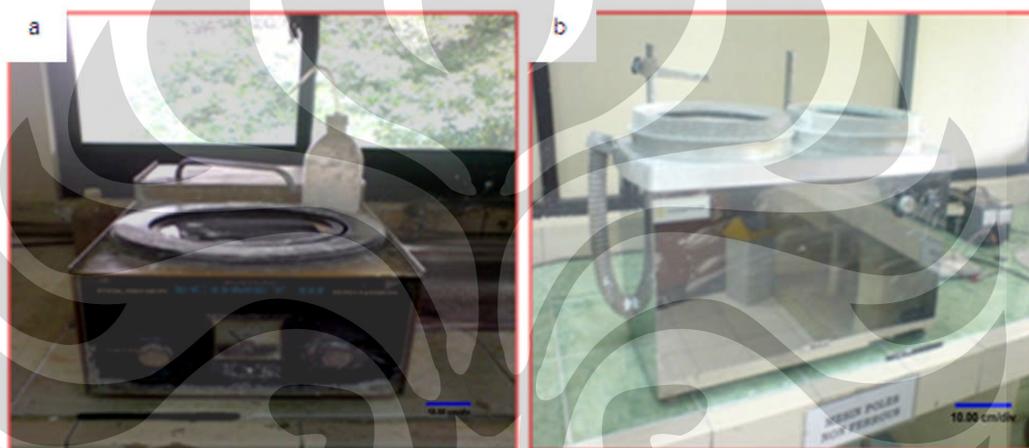
Setelah proses pengecoran maka dilanjutkan dengan preparasi dari sampel yang akan diujikan. Pada sampel pengujian tarik dan spektrometri perlu dilakukan lagi proses *machining* agar permukaannya menjadi lebih halus. Sedangkan untuk sampel pengujian porositas dilakukan pemotongan pada bagian tengah sampel agar didapatkan penampang yang simetris. Selanjutnya sampel ini diampelas agar permukaannya menjadi lebih halus dan dapat terlihat dengan jelas porositas yang ada.

Sampel pengujian kekerasan dan pengamatan mikrostruktur diambil dari komponen *cylinder head*. Lokasi pengambilan sampel untuk pengamatan mikrostruktur adalah pada bagian tebal dan bagian tipis dari komponen tersebut. Sampel untuk pengamatan mikrostruktur dibuat dengan memotong *cylinder head* pada bagian yang tipis dengan menggunakan mesin pemotong abrasif Heiwa dan dipotong pada bagian *stud bolt* bagian kanan. Daerah pemotongan *cylinder head* diperlihatkan pada Gambar 3.6. Pada bagian tebal dan tipis masing – masing diambil sampel dengan memotong menjadi balok berukuran dan juga diambil sampel untuk pengujian kekerasan. Untuk sampel pengujian kekerasan dilakukan lagi proses perataan dari alas sampel agar dapat di jejak nantinya.



**Gambar 3.6** Daerah pemotongan sampel pada *cylinder head*<sup>[15]</sup>

Sampel tersebut kemudian di *mounting* secara manual dan dilanjutkan dengan proses pengamplasan dengan menggunakan kertas amplas dari mesh yang terkecil (400 mesh) sampei yang terbesar (1000 mesh). Setelah itu sampel tadi dipoles dengan menggunakan mesin poles Ecomet dengan menggunakan zat Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan kain beludru hingga diperoleh permukaan mengkilap dan bebas dari goresan/*mirror finishing* (lihat Gambar 3.7). Sampel kemudian di etsa dengan menggunakan reagen Tucker (45 ml HCl + 15 ml  $\text{HNO}_3$  + 15 ml HF (48 %) + 25 ml  $\text{H}_2\text{O}$ ) selama 2 detik. Dengan menggunakan reagen Tucker maka akan terlihat struktur dendrit dari  $\alpha$ -Al yang terbentuk.



**Gambar 3.7** Alat yang digunakan dalam preparasi sampel metalografi (a) Alat ampelas ; (b) Alat poles<sup>[15]</sup>

### 3.4.3 Proses Pengujian

#### 3.4.3.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan alat spektrometer. Titik penembakan pada alat spektrometer dilakukan sebanyak tiga kali yang kemudian diambil nilai rata-ratanya. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi kimia paduan aluminium AC4B dengan menyesuaikannya dengan komposisi standar, serta untuk mengetahui persentase penambahan penghalus butir Ti dan *modifier* Sr yang diberikan. Gambar 3.8 (a) menjelaskan tentang alat uji komposisi dan (b) menjelaskan tentang sampel uji komposisi kimia. Gambar 3.9 merupakan gambar alat uji komposisi *optical emission spectrometer* merk Shimadzu.



**Gambar 3.8** (a) Alat uji komposisi dan (b) Sampel uji komposisi kimia<sup>[15]</sup>



**Gambar 3.9** *Optical emission spectrometer* merk Shimadzu<sup>[15]</sup>

#### 3.4.3.2 Pengujian Fluiditas

Pengujian fluiditas yang dilakukan menggunakan metode cetakan berbentuk spiral. Cetakan spiral (Gambar 3.10) ini memiliki alat pemanas (*burner*) yang digunakan untuk *preheating* cetakan, temperatur *preheating* yang digunakan adalah  $290^{\circ}$  C diukur dengan *thermocouple*. Proses penuangan dilakukan tepat pada temperatur tersebut. Agar lebih representatif, pada setiap kombinasi komposisi dilakukan lima kali pengujian fluiditas. Selain itu proses *coating* juga dilakukan sebelum pengambilan sampel uji fluiditas pada setiap kombinasi komposisi tersebut. Nilai fluiditas atau mampu alir dari paduan aluminium AC4B dapat diketahui dengan mengukur panjang aliran aluminium yang utuh mengalir pada rongga cetakan spiral.



Gambar 3.10 Alat uji fluiditas<sup>[15]</sup>

### 3.4.3.3 Pengujian Porositas

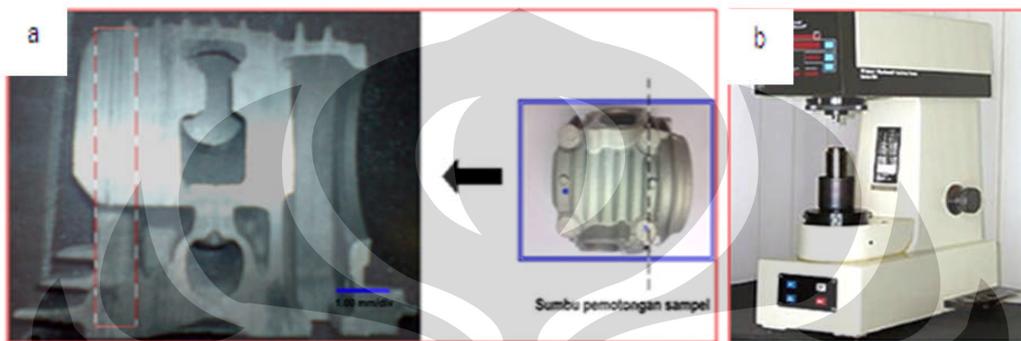
Pengujian porositas dilakukan dengan metode vakum (Gambar 3.11). Pembuatan sampel vakum dilakukan sebanyak dua buah pada setiap kombinasi komposisi. Pengujian vakum dilakukan selama 15 menit pada wadah yang sudah ditentukan. Sampel hasil pengujian ini kemudian dipotong menjadi dua bagian, lalu penampang potongannya diampelas agar diperoleh gambaran porositas yang lebih jelas. Kemudian penampang potongan tersebut difoto secara makro dengan menggunakan kamera digital. Dari hasil pengujian vakum ini ingin diketahui jumlah dan distribusi baik porositas maupun *microshrinkage* yang ada. Setelah sampel didapatkan, kemudian dilakukan perhitungan fraksi volume porositas sesuai dengan ASTM E-562.



Gambar 3.11 Alat pengujian porositas<sup>[15]</sup>

### 3.4.3.4 Pengujian Kekerasan

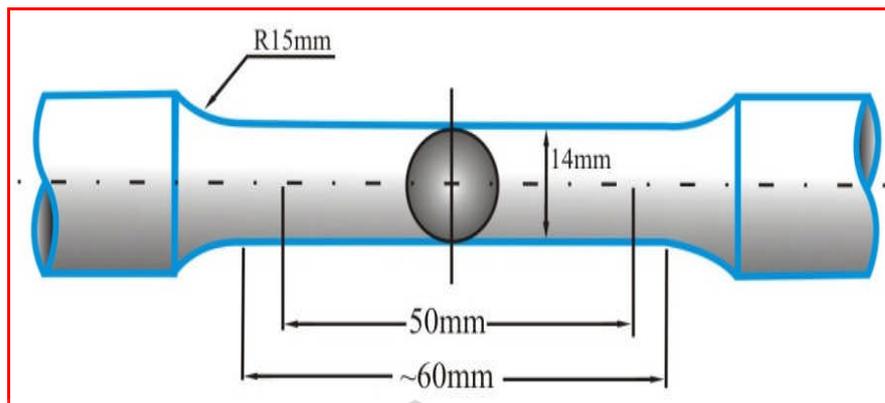
Pengujian kekerasan dilakukan setelah dilakukan proses *machining* bagian bawah dari sampel *cylinder head* dengan alat uji kekerasan Rockwell B (Gambar 3.12 (b)). Titik yang diambil untuk pengujian ini adalah pada bagian *stud bolt* kiri dan kanan (Gambar 3.12 (a)) dengan menggunakan indentor bola baja berdiameter 1/16 inchi dan beban 100 Kg sebanyak 5 titik. Pengujian dilakukan pada sampel sebelum dan sesudah penambahan titanium dan stronsium dengan komposisi akhir 0.063, 0.083, 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr



**Gambar 3.12** (a) Titik pengujian kekerasan pada sampel *cylinder head* ; (b) Alat uji kekerasan Rockwell<sup>[15]</sup>

#### 3.4.3.5 Pengujian Tarik

Untuk membuat sampel uji tarik dilakukan pengecoran pada cetakan uji tarik pada masing-masing variabel Sr sebanyak dua buah batang. Temperatur *preheating* cetakan uji tarik yang digunakan adalah pada  $\pm 290^{\circ}$  C. Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan alat uji tarik Shimadzu pada Laboratorium Uji Merusak Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Pengujian tarik ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik dan elongasi dari paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah penambahan penghalus butir Ti dan *modifier* Sr. Pengujian ini dilakukan berdasarkan standar ASTM E-8, dengan menggunakan mesin uji tarik Shimadzu. Pada Gambar 3.13 dapat dilihat dimensi sampel uji tarik dan Gambar 3.14 memperlihatkan cetakan uji tarik.



Gambar 3.13 Standar pengujian tarik standar ASTM E-8<sup>[15]</sup>



Gambar 3.14 Cetakan uji tarik<sup>[15]</sup>

#### 3.4.3.6 Pengamatan Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik digital dan SEM (*Scanning Electron Microscope*) yang dilengkapi EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) pada PT AHM dan Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia (Gambar 3.15). Pengujian dengan mikroskop optik ini dimaksudkan untuk melihat karakteristik silikon dan fasa-fasa yang terbentuk serta untuk mengukur nilai DAS yang ada. Pengukuran nilai DAS dilakukan untuk mengukur perubahan nilai DAS dengan kaitannya dengan penambahan penghalus butir titanium. Pengukuran nilai DAS dilakukan dengan mengukur panjang jarak antar dendrit pada bagian yang representatif secara manual dengan menggunakan penggaris baik pada sampel tebal maupun pada sampel tipis sebanyak 36 kali dalam 1 foto mikrostruktur. Sedangkan pengujian SEM/EDS dilakukan untuk mengetahui bentuk dan komposisi fasa yang ada. Sebelum pengamatan foto mikro, sampel di etsa dengan menggunakan etsa Tucker selama

15 detik. Sedangkan untuk sampel SEM, sampel di etsa dengan menggunakan HF 0.5% selama 8 detik. Selain itu, pada penelitian ini dilakukan analisa komposisi terhadap *grain refiner coveral* GR-2815 dan *modifier* Al-10Sr di LIPI.



Gambar 3.15 (a) Alat SEM dan (b) Alat foto mikro<sup>[15]</sup>



Gambar 3.16 Alat XRD<sup>[15]</sup>

#### 3.4.3.7 Pengujian Kebocoran

Pengujian kebocoran dilakukan setelah *cylinder head* dilakukan proses *chipping*, *cutting*, *blasting* dan *machining*. Mesin pengujian kebocoran yang digunakan terlihat pada Gambar 3.17. Pengujian yang bertujuan untuk melihat adanya kebocoran fluida karena keropos ini dilakukan dengan menutup semua

lubang yang ada pada *cylinder head* lalu dimasukan udara dengan tekanan tertentu. Tekanan yang *drop* mengindikasikan bahwa *cylinder head* memiliki tingkat keropos yang buruk.



Gambar 3.17 Mesin uji bocor<sup>[15]</sup>



## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 ANALISIS KOMPOSISI KIMIA HASIL PENGECORAN PADUAN ALUMINIUM AC4B

Tabel 4.1 menjelaskan tentang hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti dibandingkan dengan standar QA AHM dan *Aluminium Association* (AA). Selama proses penambahan titanium dan stronsium ke dalam paduan aluminium AC4B di ambil beberapa kali hasil pengujian komposisi. Hal ini dilakukan agar komposisi titanium dan stronsium yang ditambahkan sesuai dengan target penelitian, yaitu 0.02 wt. % Sr dan 0.03, 0.05 dan 0.07 wt. % Ti.

**Tabel 4.1** Hasil pengujian komposisi paduan aluminium AC4B sebelum dan sesudah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti dibandingkan dengan standar QA AHM dan *Aluminium Association* (AA)<sup>[15]</sup>

Unsur paduan	Komposisi AC4B (wt. %)				
	+ 0.03 Ti + 0.02 Sr	+ 0.05 Ti + 0.02 Sr	+ 0.07 Ti + 0.02 Sr	Standar QA AHM	Standar AA 333
Si	8.804	8.883	8.849	7.00 - 10.00	8.0-10.0
Cu	2.239	2.462	2.800	2.00 - 4.00	3.0-4.0
Mg	0.242	0.276	0.264	0.50 Maks	0.05-0.50
Fe	0.739	0.851	0.812	1.00 Maks	1.0 maks
Mn	0.252	0.257	0.323	0.50 Maks	0.5 maks
Ni	0.068	0.072	0.062	0.35 Maks	0.5 maks
<b>Ti</b>	<b>0.063</b>	<b>0.083</b>	<b>0.108</b>	<b>0.20 Maks</b>	<b>0.25 maks</b>
Pb	0.063	0.076	0.079	0.20 Maks	-
Sn	0.023	0.045	0.049	0.10 Maks	-
Cr	0.031	0.036	0.032	0.20 Maks	0.20 Maks
Ca	0.000	0.676	0.543	1.00 Maks	-
<b>Sr</b>	<b>0.020</b>	<b>0.021</b>	<b>0.018</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
Al	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa

Hasil pengujian komposisi ini kemudian dibandingkan dengan standar internal PT AHM (sesuai standar AC4B JIS) serta dengan standar AA 333. Data hasil pengujian komposisi dapat dilihat pada lampiran 1, 2 dan 3. Komposisi silikon, tembaga, dan unsur-unsur lainnya sesudah kombinasi penambahan 0.02 wt. % Sr dan 0.03, 0.05 dan 0.07 wt. % Ti mengalami sedikit perubahan. Akan tetapi, perbedaan ini tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada penelitian ini karena jumlah tersebut masih masuk dalam standar yang ditentukan oleh PT AHM.

Silikon mengalami peningkatan pada setiap komposisi akhir setelah dilakukan penambahan sehingga membuat sifat *castability* paduan AC4B tersebut semakin baik, tetapi porositas akan mengalami peningkatan. Kenaikan unsur silikon ini dapat disebabkan oleh semakin besarnya tekanan di dalam *holding furnace* akibat semakin berkurangnya kadar *molten*, sehingga kadar silikon di dasar *furnace* ikut terbawa. Unsur besi sedikit mengalami peningkatan sehingga fasa intermetalik yang terbentuk mengalami peningkatan dan keuletan akan menurun. Kenaikan unsur besi ini dapat disebabkan oleh terlarutnya karat pada *furnace* tempat *molten* dipindahkan sebelum ke *holding furnace*. Selain itu, dapat disebabkan oleh pada saat pengambilan data komposisi, terjadi kesalahan dalam pembubutan sehingga unsur besi terbawa pada bagian bawah dari sampel uji komposisi (alas *chamber* terbuat dari *stainless steel*). Unsur besi yang meningkat dapat meningkatkan ketahanan terhadap retak panas dan mengurangi kecenderungan cetakan menempel pada proses pengecoran. Meningkatnya kadar besi akan mengurangi keuletan. Besi dapat bereaksi membentuk fasa intermetalik, diantaranya adalah  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{FeAlMn}_6$ , dan  $\alpha\text{-AlFeSi}$ . Fasa intermetalik ini berperan dalam peningkatan kekuatan, terutama dalam temperatur tinggi tapi juga berperan dalam penggetasan struktur. Besi dapat membentuk fasa lumpur dengan unsur mangan, kromium, dan unsur lainnya. Magnesium juga mengalami peningkatan sehingga kekuatan dan kekerasan akan mengalami sedikit peningkatan. Unsur magnesium yang mengalami peningkatan merupakan unsur yang berperan dalam peningkatan kekuatan dan kekerasan dalam paduan aluminium silikon yang dilakukan perlakuan panas dan umum digunakan dalam paduan aluminium silikon yang mengandung tembaga, nikel, dan unsur lainnya. Fasa  $\text{Mg}_2\text{Si}$  meningkatkan

kekuatan hingga batas kelarutan 0.7 wt. % Mg, dimana dengan kadar lebih dari itu, tidak ada penambahan kekuatan yang signifikan. Paduan aluminium silikon kekuatan tinggi mempunyai kadar magnesium antara 0.4-0.07 wt. %.

Untuk pengambilan sampel pertama, komposisi titanium sebelum ditambahkan penghalus butir adalah 0.033 wt. %, dengan penambahan penghalus butir sebesar menjadi 0.063 wt. %. Hasil akhir yang didapat mengindikasikan bahwa penambahan titanium sebagai penghalus butir sesuai dengan target penambahan, yakni sebesar 0.03 wt. % Ti. Sedangkan untuk komposisi stronsium sebelum ditambahkan *modifier* adalah 0.000 wt. % dan setelah penambahan *modifier* menjadi 0.02 wt. % Sr. Hasil akhir dari penambahan *modifier* ini juga sesuai dengan target penelitian, yakni sebesar 0.02 wt. % Sr.

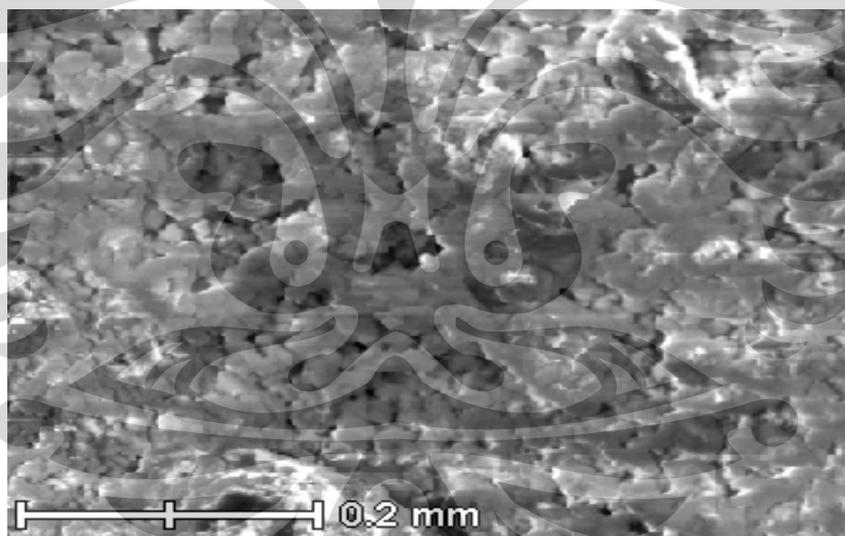
Untuk pengambilan sampel kedua, komposisi titanium sebelum ditambahkan penghalus butir adalah 0.033 wt. %, setelah penambahan menjadi 0.083 wt. %. Meskipun hasil akhir yang didapat sesuai dengan target penelitian, yakni 0.05 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr. Akan tetapi, penambahan berlangsung selama 2 kali penambahan. Pada penambahan pertama, komposisi akhir yang dicapai adalah 0.072 wt. % Ti dan 0.013 wt. % Sr. Komposisi tersebut belum memenuhi target komposisi akhir penambahan, yakni 0.083 wt. % Ti dan 0.021 wt. % Sr. Oleh karena itu, kemudian dilakukan lagi penambahan kedua. Hal ini kemungkinan diakibatkan oleh penambahan penghalus butir titanium yang kurang dari perhitungan pada *material balance*. Sehingga dilakukan penambahan kembali untuk meningkatkan kadar titanium agar mendekati komposisi yang diinginkan. Jumlah aluminium cair yang akan dicor baru diketahui setelah penimbangan sesaat sebelum proses *degassing* dimulai, sehingga jumlah penghalus butir dan *modifier* yang dibutuhkan tidak bisa diperkirakan dengan akurat.

Untuk pengambilan sampel ketiga, komposisi titanium sebelum ditambahkan penghalus butir adalah 0.038 wt. %, setelah penambahan menjadi 0.108 wt. %. Hasil akhir yang didapat mengindikasikan bahwa penambahan titanium sebagai penghalus butir sesuai dengan target penambahan, yakni sebesar 0.07 wt. % Ti. Sedangkan untuk komposisi stronsium sebelum ditambahkan *modifier* adalah 0.00 wt. % dengan penambahan *modifier* menjadi 0.02 wt. %. Hasil akhir dari

penambahan *modifier* ini juga sesuai dengan target penelitian, yakni sebesar 0.02 wt.% Sr.

#### 4.2 KARAKTERISASI PENGHALUS BUTIR *COVERAL* GR-2815 DAN *MODIFIER* Al-10Sr

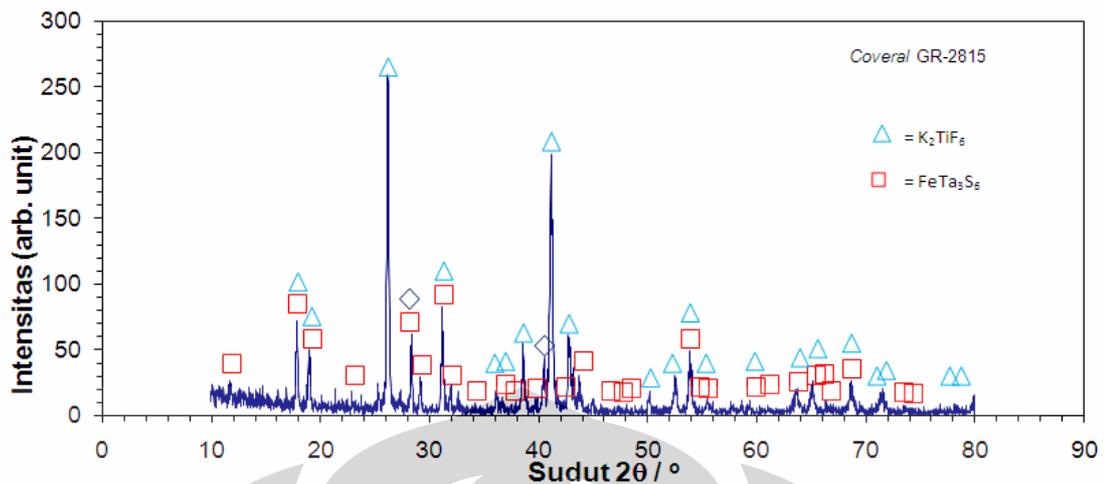
Untuk mengkonfirmasi kandungan titanium dalam penghalus butir, maka dilakukan analisa mikrostruktur terhadap penghalus butir *coveral* GR-2815 yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Tabel 4.2. Gambar 4.1 menjelaskan tentang mikrostruktur dari penghalus butir *coveral* GR-2815 yang berbentuk fluks. Dari Gambar 4.1 dapat dilihat struktur mikro dari *grain refiner* yang ditambahkan menunjukkan struktur yang mirip dengan struktur garam. Hal ini diperkuat oleh analisa SEM *X-ray mapping* pada Tabel 4.2 yang menunjukkan bahwa terdapat kandungan unsur penyusun garam, yaitu K, Na, F, dan Cl. Kandungan dari boron tidak terdeteksi.



Gambar 4.1 Mikrostruktur dari penghalus butir dengan perbesaran 800x<sup>[38]</sup>

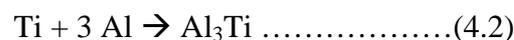
Tabel 4.2 Komposisi kimia penghalus butir berdasarkan analisa SEM X – Ray mapping

Unsur	Komposisi Kimia (wt. %)
F	34.15
Na	0.55
Cl	1.34
K	32.84
Ti	14.95



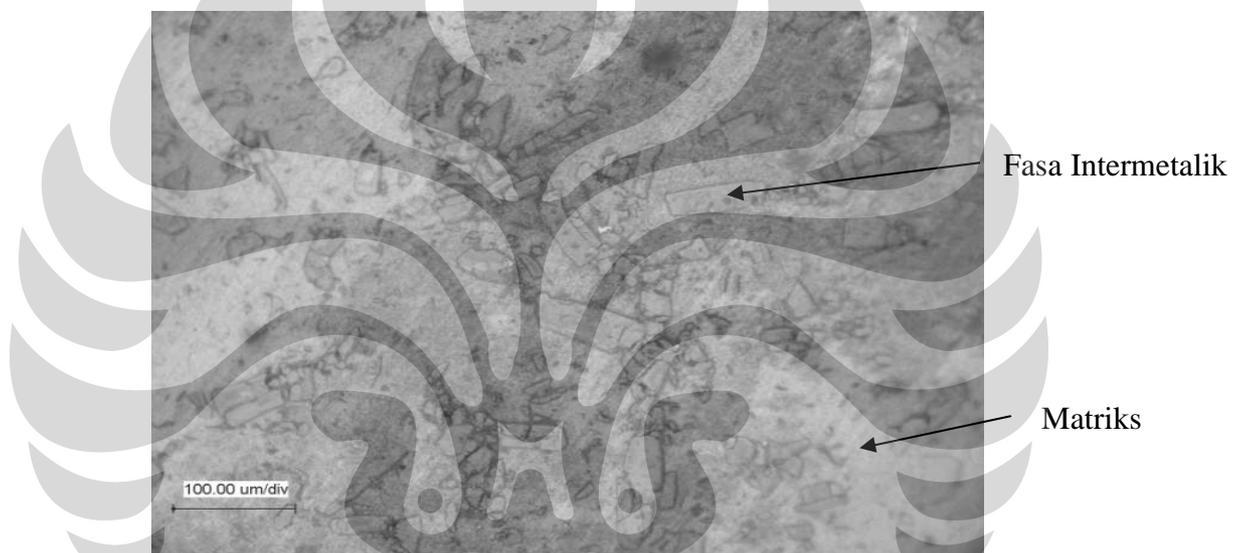
**Gambar 4.2** Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) penghalus butir *coveral* GR-2815

Dari Gambar 4.2 didapatkan grafik hasil karakterisasi sampel penghalus butir. Dari gambar tersebut, dapat diindikasikan bahwa senyawa yang terkandung dalam penghalus butir tersebut adalah  $K_2TiF_6$  dan  $FeTa_3S_6$ . Keberadaan  $K_2TiF_6$  mengindikasikan bahwa penghalus butir titanium tersebut terbuat dari garam  $K_2TiF_6$  (lihat persamaan 4.1).  $3K_2TiF_6$  akan berkurang dalam *molten* aluminium dan akan melepaskan Ti yang kemudian dapat bereaksi dengan aluminium membentuk  $Al_3Ti$  sebagai fasa pembentuk inti (lihat persamaan 4.2)<sup>[38]</sup>. Sedangkan keberadaan  $FeTa_3S_6$  mengindikasikan bahwa penambahan penghalus butir *coveral* GR-2815 dapat meningkatkan kadar besi dalam paduan. Unsur besi meningkatkan ketahanan terhadap retak panas dan mengurangi kecenderungan cetakan menempel pada proses pengecoran. Meningkatnya kadar besi akan mengurangi keuletan. Besi dapat bereaksi membentuk fasa intermetalik, diantaranya adalah  $FeAl_3$ ,  $FeAlMn_6$ , dan  $\alpha AlFeSi$ . Fasa intermetalik ini berperan dalam peningkatan kekuatan, terutama dalam temperatur tinggi, tapi juga berperan dalam penggetasan struktur. Besi juga dapat membentuk fasa lumpur dengan unsur mangan, kromium, dan unsur lainnya.

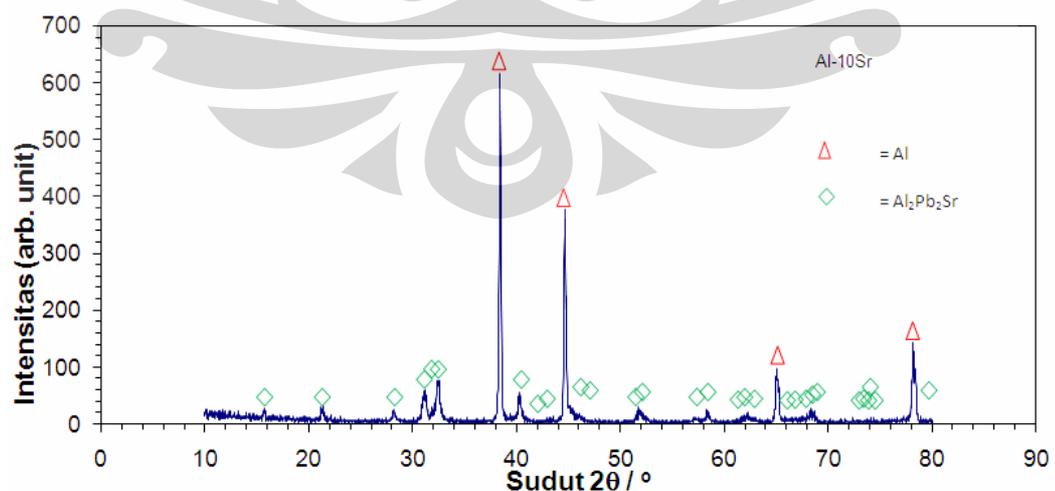


Gambar 4.3 menjelaskan tentang mikrostruktur dari *modifier* Al-10Sr yang berbentuk batangan (*rod*) dengan perbesaran 450x. Dari Gambar 4.3 dapat dilihat

bahwa terdapat fasa yang berbentuk balok (*blocky*) yang mengindikasikan bahwa fasa tersebut adalah fasa intermetalik  $\text{Al}_4\text{SrSi}_2$ . Selain itu, terdapat juga matriksnya dengan komposisi yang lebih banyak. Dapat disimpulkan bahwa penambahan modifier Al-10Sr akan meningkatkan kadar unsur silikon dalam paduan. Unsur silikon mempunyai peran yang sangat penting dalam peningkatan kekuatan dari aluminium hasil pengecoran. Penambahan unsur silikon meningkatkan fluiditas, ketahanan terhadap retak panas dan karakteristik *feeding*. Selain itu, penambahan silikon dapat membuat sifat *castability* paduan AC4B tersebut semakin baik, tetapi porositas akan mengalami peningkatan.



**Gambar 4.3** Mikrostruktur dari *modifier* Al-10Sr dengan perbesaran 450x, etsa HF 0.5 %



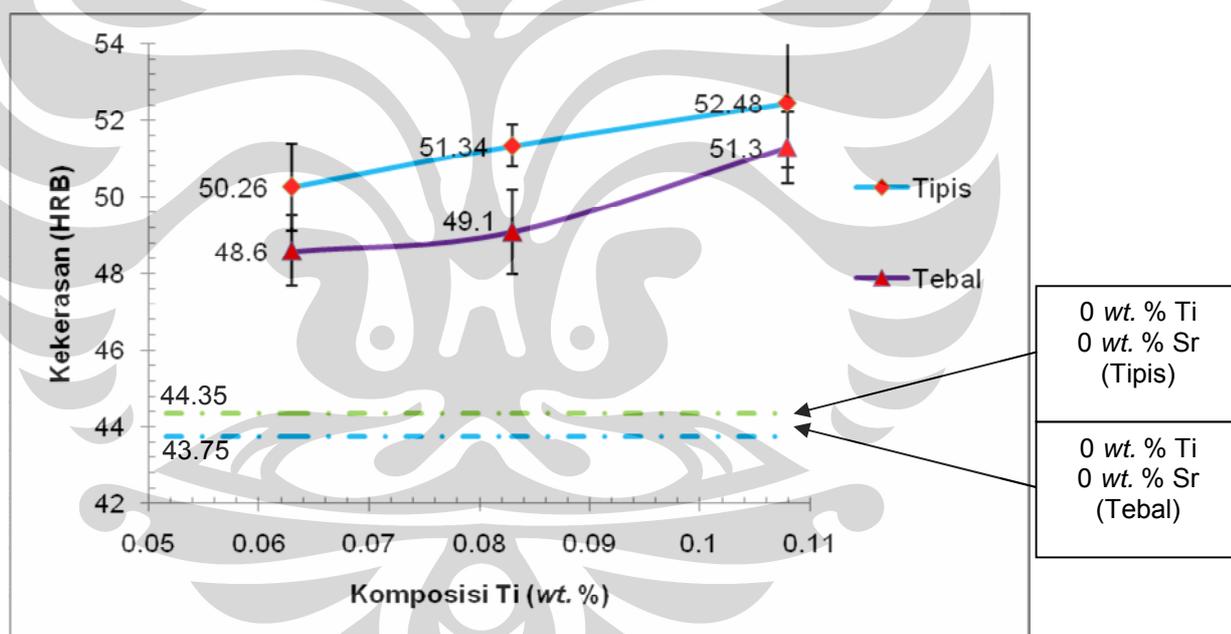
**Gambar 4.4** Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD) Al-10Sr

Dari Gambar 4.4 dapat diketahui bahwa senyawa yang kemungkinan ada dalam paduan Al-10Sr tersebut adalah Al dan  $Al_2Pb_2Sr$ . Adanya Pb dalam Al-10Sr berfungsi sebagai pemercepat reaksi atau katalis reaksi.

### 4.3 PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI TITANIUM DAN STRONSIUM TERHADAP KARAKTERISTIK PADUAN ALUMINIUM AC4B

#### 4.3.1 Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Kekerasan Makro Paduan AC4B

Gambar 4.5 memperlihatkan tentang perubahan kekerasan paduan AC4B dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083, dan 0.108 wt. % Ti pada sampel tipis dan tebal.



**Gambar 4.5** Perbandingan nilai kekerasan pada daerah tipis dan tebal untuk komposisi normal (0.00 wt. % Ti dan 0.00 wt. % Sr) dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti

Pada kombinasi Sr yang sama yaitu 0.02 wt. %, pada komposisi 0.063 wt. % Ti kekerasan meningkat sebesar 13.33 % dari 44.35 HRB menjadi 50.26 HRB pada bagian tipis dan 11.09 % dari 43.75 HRB menjadi 48.6 HRB pada bagian tebal dibandingkan dengan komposisi normal. Pada komposisi 0.083 wt. % Ti kekerasan meningkat sebesar 2.15 % dari 50.26 HRB menjadi 51.34 HRB pada

bagian tipis dan 1.02 % dari 48.63 HRB menjadi 49.1 HRB pada bagian tebal dibandingkan dengan komposisi 0.063 wt. % Ti. Selanjutnya, pada komposisi 0.108 wt. % Ti kekerasan meningkat sebesar 2.22 % dari 51.34 HRB menjadi 52.48 HRB pada bagian tipis dan 4.48 % dari 49.1 HRB menjadi 51.3 HRB pada bagian tebal dibandingkan dengan komposisi 0.083 wt. % Ti. Dari hal tersebut, dapat dilihat bahwa pada komposisi Sr yang konstan dengan meningkatnya kandungan Ti akan didapat kekerasan optimum pada komposisi 0.108 wt. % Ti. Komposisi ini masuk dalam kisaran efektif (0.02-0.15 wt. % Ti) penambahan Ti<sup>[6]</sup>.

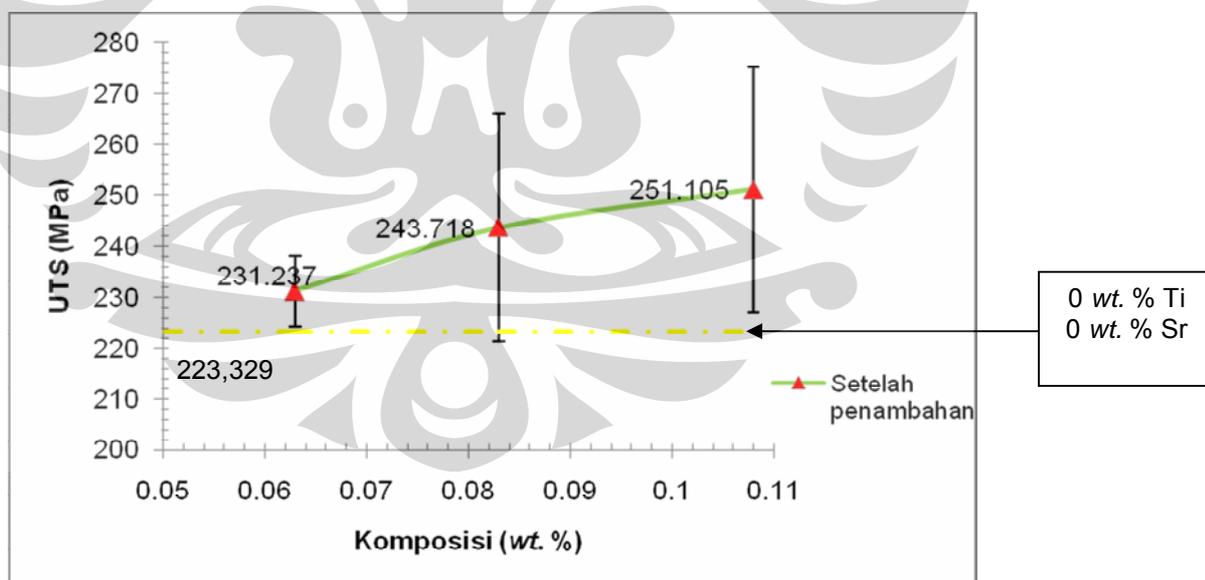
Kekerasan yang semakin meningkat merupakan efek dari penambahan penghalus butir titanium dan *modifier* stronsium. Hal ini dapat dilihat dari foto mikrostruktur sebelum dan setelah dilakukan penambahan. Setelah dilakukan penambahan, terjadi perubahan pada mikrostruktur butir yang menjadi lebih halus dan kristal silikon menjadi termodifikasi dari *acicular* menjadi *fibrous*. Butir yang lebih halus menyebabkan batas butir yang terbentuk menjadi lebih banyak. Batas butir dapat menghalangi arah pergerakan dislokasi sehingga dislokasi dapat berkumpul pada batas butir yang dapat menyebabkan meningkatnya kekerasan. Semakin banyak batas butir, maka dislokasi yang bertumpuk akan semakin banyak, maka nilai kekerasan akan semakin meningkat<sup>[24]</sup>. Perubahan kristal silikon dari *acicular* menjadi *fibrous* yang halus juga dapat menyebabkan peningkatan kekerasan<sup>[35]</sup>. Semakin halus butir menyebabkan kerapatan dislokasi semakin meningkat yang pada akhirnya meningkatkan nilai kekerasan dan kekuatan. Struktur butir yang halus diperoleh dari laju pembekuan yang cepat, dimana penambahan penghalus butir dapat menghasilkan laju pembekuan yang lebih cepat. Laju pembekuan yang cepat ini juga berdampak pada semakin kecilnya DAS sehingga nilai kekuatannya semakin meningkat<sup>[6]</sup>.

Selain itu, kekerasan di daerah tipis lebih besar bila dibandingkan dengan kekerasan pada daerah tebal. Adanya perbedaan nilai kekerasan pada daerah tipis dan tebal dikarenakan perbedaan kecepatan pembekuan pada masing-masing bagian sehingga besar butir yang dihasilkan juga berbeda. Menurut literatur, dalam proses pengecoran sifat mekanis suatu material ditentukan salah satunya oleh kecepatan pembekuan, makin cepat proses pembekuan maka butir yang

terbentuk semakin kecil sehingga kekerasan material tersebut juga semakin meningkat<sup>[6]</sup>. Karena pada bagian tebal poses pembekuannya lebih lambat maka butir yang terbentuk juga lebih besar sehingga kekerasannya lebih kecil. Sebaliknya pada bagian tipis terjadi poses pembekuan yang lebih cepat sehingga butir yang terbentuk lebih halus dan kekerasan lebih tinggi. Daerah pada dinding cetakan merupakan daerah pendinginan cepat (*chill zone*) sehingga sering diperoleh struktur yang berbutir halus yang tergantung pada gradien temperatur antara cetakan dan logam cair. Bagian yang tipis berarti memiliki daerah yang dekat dengan dinding cetakan, sehingga setelah proses pembekuan logam cair pada daerah ini, tidak jarang diperoleh butir yang lebih halus.

#### 4.3.2 Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Kekuatan Tarik Paduan AC4B

Gambar 4.6 memperlihatkan nilai UTS (*Ultimate Tensile Strength*) dari paduan aluminium AC4B tanpa penambahan dan setelah penambahan dengan kandungan Sr konstan pada 0.02 wt. % dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti.



**Gambar 4.6** Perbandingan nilai UTS (*Ultimate Tensile Strength*) sebelum dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti

Pada kombinasi komposisi Sr konstan 0.02 wt. % dengan 0.063 wt. % Ti nilai UTS meningkat sebesar 3.540 % dari 223.329 MPa menjadi 231.237 MPa. Pada komposisi 0.083 wt. % Ti nilai UTS meningkat 9.129 % dari 231.237 MPa

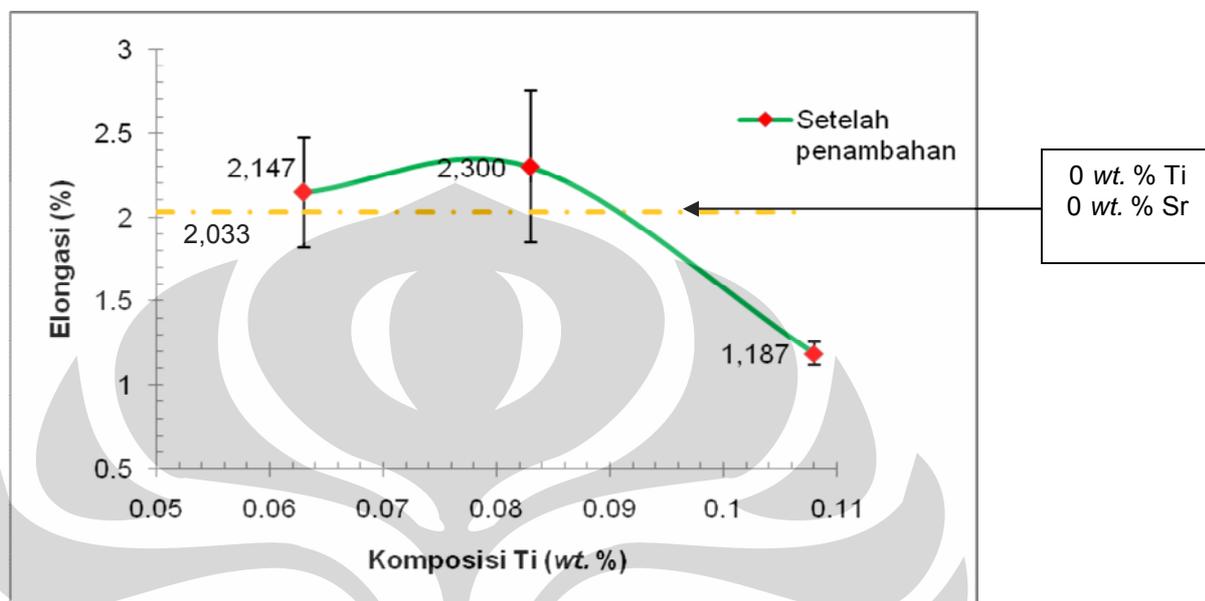
menjadi 243.718 MPa dibandingkan dengan penambahan 0.063 wt. % Ti. Sedangkan pada penambahan 0.108 wt. % Ti akan nilai UTS meningkat sebesar 12.437 % dari 243.718 MPa menjadi 251.105 MPa.

Dari hasil penelitian ini terlihat bahwa pada komposisi 0.02 wt. % Sr, kombinasi penambahan Ti hingga komposisi 0.108 wt. % Ti memberikan efek yang optimum pada kekuatan tarik. Peningkatan sifat mekanik yang terjadi berhubungan dengan struktur mikro yang terbentuk. Dengan kombinasi antara penghalusan butir dan modifikasi kristal silikon menyebabkan terbentuknya dendrit dan silikon eutektik yang halus. Pada penambahan Sr yang sama, ternyata penambahan Ti dengan komposisi yang berbeda akan menghasilkan kehalusan dendrit dan silikon eutektik yang berbeda dengan komposisi tanpa penambahan. Dapat ditarik kesimpulan bahwa adanya penambahan titanium dengan komposisi yang semakin meningkat dan stronsium yang dijaga tetap dapat diketahui bahwa akan meningkatkan nilai UTS dari paduan.

Kekuatan tarik memiliki nilai yang sebanding dengan nilai kekerasan pada suatu material. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa penghalusan butir akan meningkatkan kekuatan tarik<sup>[31][30]</sup>. Kemungkinan dikarenakan penghalus butir titanium akan mereduksi ukuran butir dari  $\alpha$ -Al primer sehingga membentuk struktur butir yang *equiaxed*. Struktur *equiaxed* ini mempunyai beberapa keunggulan, diantaranya menghasilkan kekuatan tarik yang tinggi<sup>[30]</sup>. Adanya penambahan stronsium dapat meningkatkan nilai UTS pada paduan aluminium. Proses penghalusan fasa primer atau penghalusan ukuran butir primer aluminium selama pembekuan merupakan salah satu faktor penting yang dapat memberikan pengaruh cukup besar terhadap efek peningkatan sifat fisik dan mekanik dari logam hasil pengecoran.

Gambar 4.7 memperlihatkan perbandingan nilai elongasi dari sampel tanpa penambahan dan setelah penambahan. Elongasi merupakan sebuah indikator tingkat keuletan suatu logam. Semakin besar nilai % elongasi maka material tersebut akan bersifat semakin ulet. Dari Gambar 4.7 terlihat perubahan nilai elongasi pada paduan AC4B setelah penambahan Ti dan Sr. Untuk Sr kontan pada komposisi 0.02 wt. % dan dikombinasikan dengan 0.063 wt. % Ti meningkatkan nilai elongasi sebesar 7.083 % dari 2.033 % menjadi 2.147 %. Pada komposisi

0.083 wt. % Ti terjadi kenaikan sebesar 7.136 % dari 2.147 % menjadi 2.300 %. Sedangkan pada komposisi 0.108 wt. % Ti terjadi penurunan sebesar 48.391 % dari 2.300 % menjadi 1.187 %.



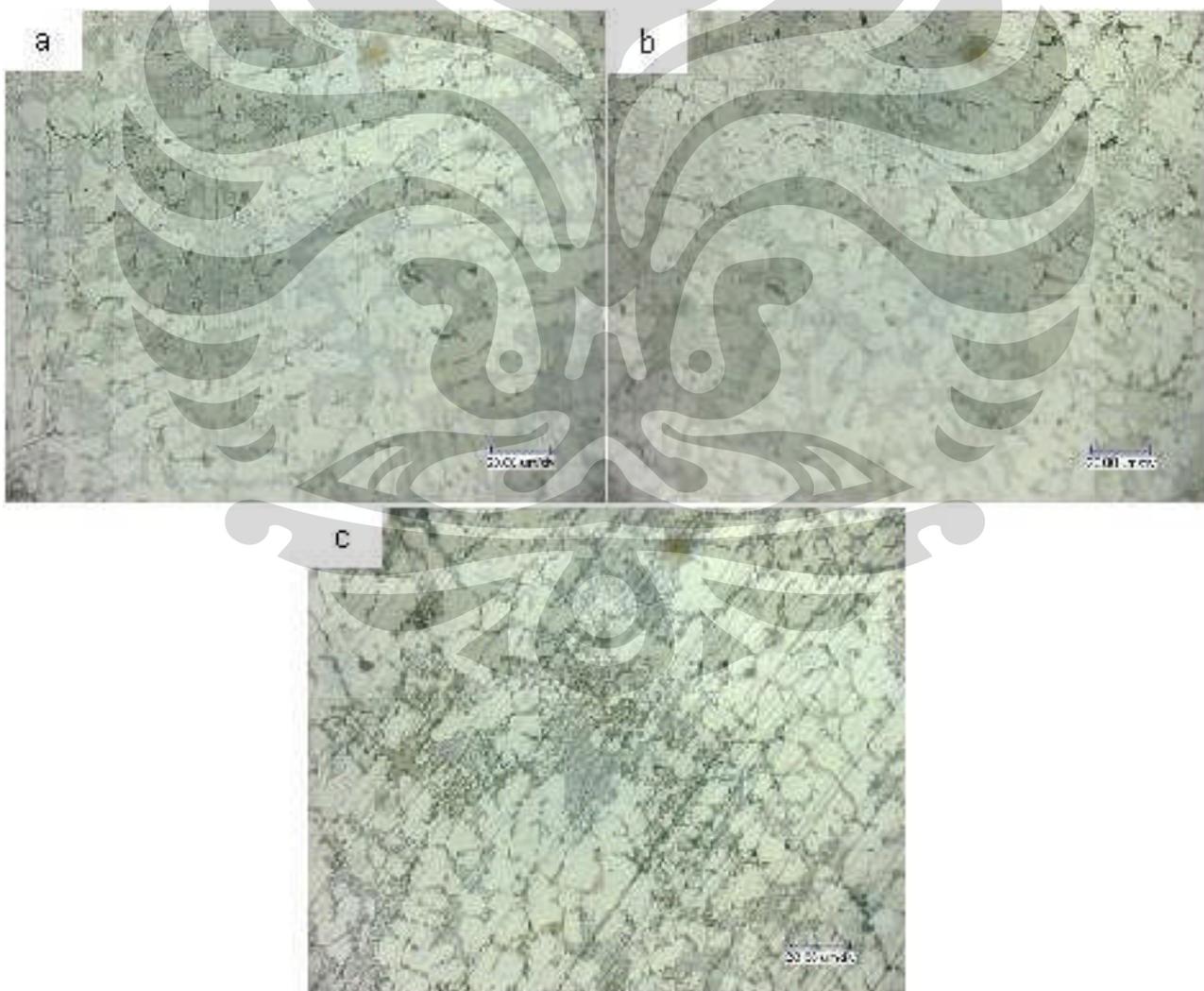
**Gambar 4.7** Perbandingan nilai elongasi sebelum dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti

Keuletan material akan meningkat seiring dengan bertambahnya *modifier* stronsium karena kristal silikon yang berbentuk pelat kasar dan tajam akan berubah menjadi struktur *fibrous* yang lebih halus. Silikon yang berbentuk pelat kasar dapat menyebabkan munculnya konsentrasi tegangan yang menyebabkan material menjadi getas. Penambahan *modifier* stronsium menyebabkan keuletan material akan meningkat yang ditandai dengan meningkatnya nilai elongasi setelah dilakukan penambahan. Penambahan penghalus butir juga dapat meningkatkan nilai elongasi dari material<sup>[3]</sup>.

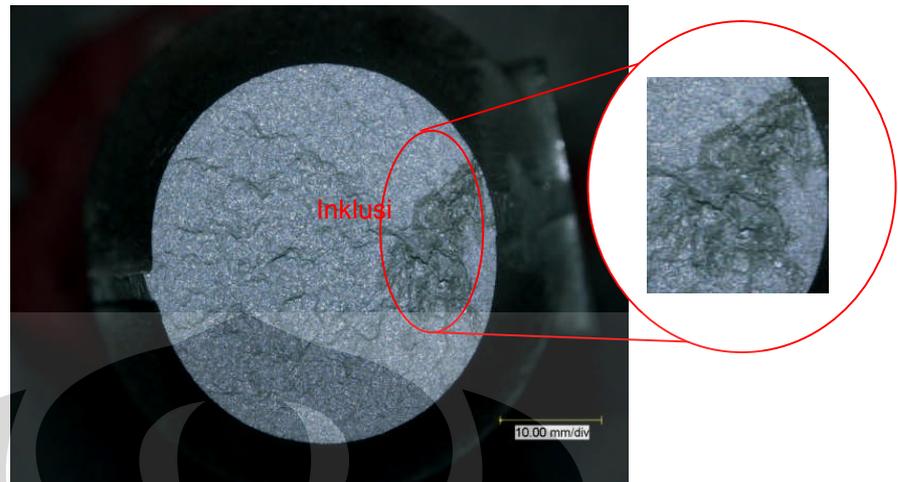
Dari Gambar 4.8 terlihat bahwa mikrostruktur pada tiap komposisi hampir sama dengan struktur mikro yang dihasilkan dari sampel uji foto mikrostruktur. Namun, pada kombinasi komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr terdapat suatu segregasi fasa yang lebih gelap yang diperkirakan sebagai fasa intermetalik yang berperan dalam penurunan sifat mekanis.

Untuk Sr konstan pada komposisi 0.02 wt. % yang dikombinasikan dengan komposisi 0.063 dan 0.083 wt. % Ti akan meningkatkan nilai elongasi. Akan

tetapi, setelah dikombinasikan komposisi 0.108 wt. % Ti terjadi penurunan nilai elongasi. Hal ini dapat disebabkan oleh kurang terkendalinya proses pengecoran pada pembuatan sampel uji tarik, dikarenakan cetakan *ingot* yang digunakan tidak dilakukan *preheating* terlebih dahulu, dan kecepatan penuangan yang tidak sama antara sampel yang satu dengan sampel yang lain. Tidak sempurnanya pemakaian *baby green* sebagai salah satu alat penghalus permukaan sampel uji tarik menyebabkan adanya konsentrasi tegangan pada bagian tertentu di *gauge length* yang mengakibatkan sampel uji tarik tidak homogen sehingga mengalami perpatahan tidak tepat pada *gauge length*, perpatahan terjadi di daerah konsentrasi tegangan tersebut<sup>[31]</sup>. Adanya inklusi juga dapat menjadi salah satu penyebab inisiasi *crack* sehingga perpatahan tidak tepat di *gauge length* (lihat Gambar 4.9).



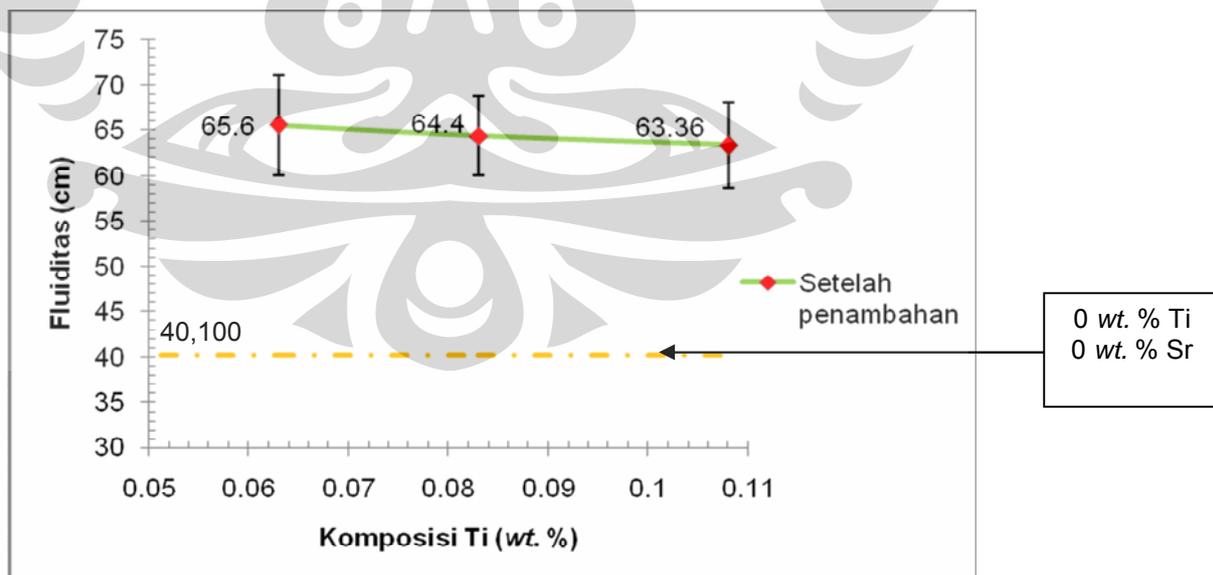
**Gambar 4.8** Mikrostruktur hasil uji tarik dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan (a) 0.063, (b) 0.083 dan (c) 0.108 wt. % Ti



**Gambar 4.9** Penampang hasil patahan sampel uji tarik komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr. Hasil foto menunjukkan bahwa adanya daerah gelap yang merupakan salah satu inisiasi terjadinya perpatahan prematur pada komponen hasil uji tarik

#### 4.3.3 Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Fluiditas Paduan AC4B

Gambar 4.10 memperlihatkan perubahan nilai fluiditas sebelum penambahan dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti.



**Gambar 4.10** Perbandingan panjang fluiditas sebelum penambahan dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti

Pada komposisi 0.063 wt. % Ti terjadi peningkatan nilai fluiditas sebesar 63.59 % dari 40.10 cm menjadi 65.60 cm. Untuk komposisi 0.083 wt. % Ti terjadi penurunan nilai fluiditas sebesar 1.829 % dari 65.60 cm menjadi 64.40 cm. Sedangkan pada komposisi penambahan hingga 0.108 wt. % Ti terjadi penurunan nilai fluiditas sebesar 1.615 % dari 64.40 cm menjadi 63.36 cm.

Fluiditas merupakan faktor penting dalam pengecoran, khususnya untuk menghindari cacat-cacat yang sering terjadi pada produk cor seperti misrun<sup>[2]</sup>. Ada dua hal yang menjadi penyebab terjadinya peningkatan nilai fluiditas ini. Yang pertama adalah *modifier* stronsium berperan dalam proses solidifikasi yaitu menurunkan temperatur eutektik nukleasi dan pertumbuhan. Pada kondisi ini, *range* pembekuan akan menjadi lebih pendek sehingga diperoleh peningkatan fluiditas<sup>[2]</sup>. Penyebab yang kedua adalah karena stronsium menurunkan tegangan permukaan dari aluminium cair, dengan turunnya tegangan permukaan menghasilkan karakteristik mampu alir yang lebih baik<sup>[3]</sup>. Suatu logam cair dapat dituang pada temperatur yang lebih tinggi untuk meningkatkan fluiditas dan untuk menghindari terjadinya cacat misrun pada benda cor yang tipis.

Secara umum, penambahan titanium akan menaikkan temperatur nukleasi dan menjadi pembentuk inti pada pembekuan sehingga akan menurunkan karakteristik fluiditasnya. Dengan penambahan titanium, proses pembekuan akan semakin cepat dan panjang fluiditas tidak dapat mencapai panjang maksimum. Nukleasi awal yang diakibatkan oleh penambahan penghalus butir menimbulkan nuklean  $TiAl_3$  sehingga menyebabkan terjadinya aliran lumpur (padatan dengan cairan) dari saat penuangan, dan karena lumpur dapat menyebabkan aliran logam cair menjadi lebih lambat dari cairan biasa, maka fluiditas dapat berkurang<sup>[3]</sup>.

Hasil penelitian tentang nilai fluiditas setelah kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa semakin meningkatnya kadar titanium maka nilai fluiditas yang terbentuk tidak akan sempurna karena adanya proses pembekuan cepat yang dihasilkan oleh titanium<sup>[14]</sup>. Akan tetapi, dalam hal ini kehadiran stronsium yang ditambahkan tidak dapat diabaikan. Stronsium yang ditambahkan cukup besar., yakni 0.02 wt. % Sr. Adanya stronsium dapat meningkatkan panjang fluiditas. Penambahan stronsium meningkatkan panjang fluiditas setelah penambahan pada

komposisi pertama meningkat sebesar 63.59 %. Namun, setelah ditambahkan titanium terjadi penurunan panjang fluiditas. Hal ini mengindikasikan bahwa pengintian yang dilakukan oleh titanium cukup efektif untuk menekan laju pertumbuhan butir.

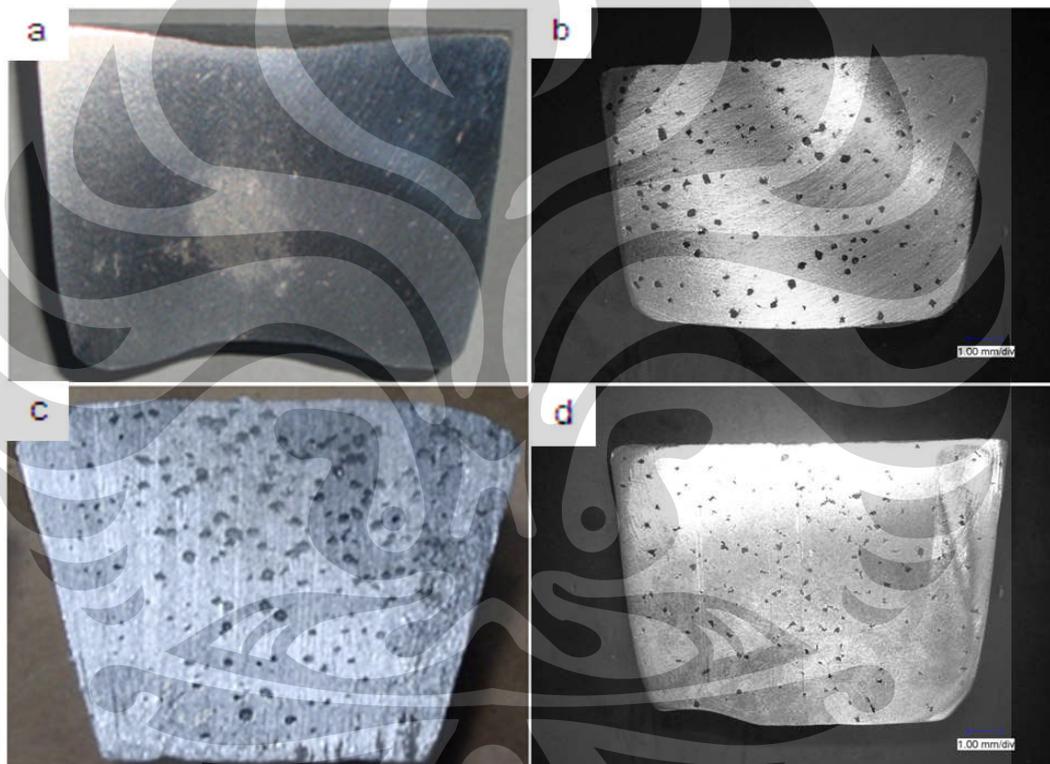
Gambar 4.11 menjelaskan tentang perbandingan panjang sampel uji fluiditas pada komposisi normal dan pada kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti. Terlihat pada Gambar 4.11, bahwa seiring dengan bertambahnya titanium akan menghasilkan panjang fluiditas yang semakin menurun. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa semakin meningkatnya kadar titanium maka nilai fluiditas yang terbentuk tidak akan sempurna karena adanya proses pembekuan cepat yang dihasilkan oleh titanium<sup>[14]</sup>.



**Gambar 4.11** Perbandingan panjang sampel uji fluiditas pada komposisi normal dan setelah penambahan pada kombinasi komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti

#### 4.3.4 Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti terhadap Distribusi Porositas Paduan AC4B

Gambar 4.12 memperlihatkan penampang foto makro hasil pengujian porositas pada paduan AC4B sebelum dan setelah penambahan pada kombinasi komposisi 0.02 wt.% Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti. Dari gambar tersebut dapat dilihat perbedaan distribusi porositas melalui pengamatan visual dari porositas pada paduan aluminium AC4B sebelum dan setelah dilakukan penambahan Sr dan Ti.



**Gambar 4.12** Perbandingan penampang sampel uji vakum untuk komposisi (a) tanpa penambahan dan setelah penambahan Sr konstan pada komposisi 0.02 wt. % dikombinasikan dengan (b) 0.063 wt. % Ti, (c) 0.083 wt. % Ti dan (d) 0.108 wt. % Ti

Seperti terlihat pada Gambar 4.12 terjadi perubahan pada kuantitas porositasnya. Pada komposisi normal porositas terpusat pada satu daerah dan berbentuk halus. Pada kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063 wt. % Ti terlihat bahwa kuantitas porositas bertambah dan terdistribusi pada daerah di dekat permukaan. Untuk kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.083 wt. % Ti

terlihat bahwa porositas yang terbentuk memiliki ukuran yang lebih halus bila dibandingkan dengan kombinasi komposisi 0.063 wt. % Ti. Sedangkan pada komposisi 0.108 wt. % secara kuantitatif terlihat bahwa porositas yang terbentuk tetap tersebar dan memiliki bentuk yang lebih kecil bila dibandingkan dengan komposisi 0.063 dan 0.083 wt. % Ti. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada penambahan Sr konstan dengan komposisi 0.02 wt. % Sr dan variasi Ti dengan komposisi 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti.

Setelah penambahan Ti dan Sr terlihat bahwa telah terjadi penyebaran porositas, namun jika dianalisa secara visual pada sampel uji vakum ini juga terlihat bahwa terjadi juga peningkatan jumlah porositas, hal ini diakibatkan karena kondisi pengecoran yang tidak terkontrol dimana banyak terjadi kontak langsung antara aluminium cair dengan udara luar baik pada saat penambahan stronsium maupun saat pembuatan sampel uji lainnya. Selain itu penambahan tingkat porositas disini juga diakibatkan oleh turunnya tegangan permukaan aluminium cair sehingga membuat permukaan luar dari aluminium cair lebih lebih encer dan terbentuknya lapisan oksida  $SrO \cdot Al_2O_3$  pada aluminium cair yang tidak bersifat protektif akibat penambahan stronsium yang mengakibatkan gas hidrogen lebih mudah masuk ke dalam aluminium cair.

Jika dilihat pada Gambar 2.44 sebagai pembanding tingkat porositas, pada kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr konstan dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti nilai porositas masing-masing meningkat menjadi tingkat 5, 6 dan 4 dibandingkan dengan komposisi normal yang memiliki nilai porositas pada tingkat 3. Peningkatan dalam hal kuantitas porositas pada suatu produk hasil pengecoran mengindikasikan penurunan sifat-sifat mekanis terhadap produk tersebut. Akan tetapi, hal ini tidak dapat dijadikan acuan karena kecepatan penuangan aluminium cair tidak sama untuk setiap kombinasi komposisi dan jarak antara *furnace* dengan alat uji yang terlalu jauh sehingga hasil yang didapatkan tidak presisi.

Porositas umumnya terjadi dikarenakan adanya gas hidrogen yang berlebih dan mengendap pada aluminium cair. Selain itu, diketahui juga bahwa semakin tinggi temperatur pada paduan Al, maka kelarutan hidrogen didalam paduan juga semakin meningkat dan menyebabkan hidrogen yang tidak larut terakumulasi dan membentuk porositas pada produk cor paduan aluminium tersebut. Selain

disebabkan oleh gas, porositas juga dapat disebabkan oleh *microshrinkage* yang terjadi pada daerah *interdendritic*. Perbedaan antara keduanya dapat kita lihat dan amati dari morfologi bentuknya. Umumnya, *microporosity* yang disebabkan oleh gas berbentuk bulat (*round*) sedangkan yang disebabkan oleh *shrinkage* berbentuk tak beraturan.

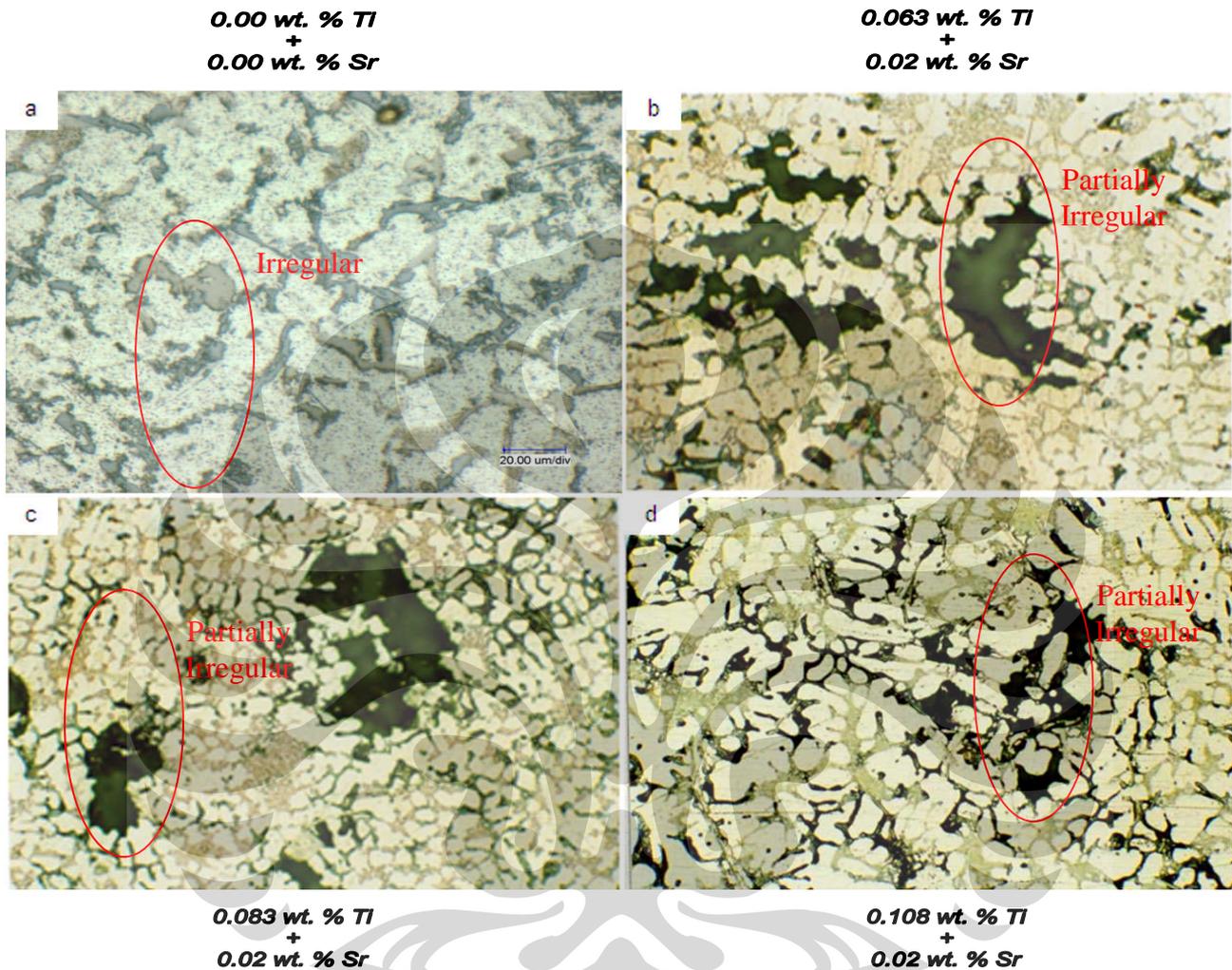
Untuk mengetahui kuantitas dari porositas yang terjadi maka dilakukan analisa secara kuantitatif terhadap sampel uji porositas tersebut dengan menghitung fraksi volume porositas. Tabel 4.3 menjelaskan tentang fraksi volume porositas pada komposisi ; (a) normal, (b) 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, (c) 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, dan (d) 0.108 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr. Semakin besar fraksi volume porositasnya, maka volume porositas akan mengalami peningkatan. Setelah penambahan Sr konstan pada komposisi 0.02 wt. % dan 0.063 wt. % Ti fraksi volume porositas meningkat sebesar 157.143 % dari 3.5 % menjadi 9 %. Pada komposisi 0.083 wt. % Ti, fraksi volume porositas mengalami peningkatan sebesar 22.22 % dari 9 % menjadi 11 %. Sedangkan fraksi volume porositas dengan komposisi 0.108 wt. % Ti mengalami penurunan sebesar 40.909 % dari 11 % menjadi 6.5 %.

**Tabel 4.3** Fraksi volume porositas pada komposisi (a) normal, (b) 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, (c) 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, dan (d) 0.108 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr

wt. % Ti	wt. % Sr	Fraksi volume porositas (%) <sup>[28]</sup>
0	0	3.5
0.063	0.02	9
0.083	0.02	11
0.108	0.02	6.5

Gambar 4.13 memperlihatkan mikrostruktur dari sampel uji fluiditas pada kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa terjadi perubahan morfologi porositas pada kombinasi komposisi setelah penambahan dari yang bentuknya *irregular* menjadi *partially irregular* dan *round*. Pada paduan AlSi tanpa *modifier*, porositas muncul pada bagian interdendritik sehingga pertumbuhan porositas dipengaruhi oleh bentuk dendrit dan fasa eutektik. Pada kondisi ini pertumbuhan sel eutektik

memiliki antarmuka *solid-liquid* yang tidak beraturan sehingga poros tumbuh mengikuti permukaan sel eutektik ini menjadi *irregular* dan bercabang<sup>[19]</sup>.



**Gambar 4.13** Mikrostruktur porositas pada sampel uji fluiditas untuk komposisi (a) normal, (b) 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, (c) 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr dan (d) 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

Pada paduan aluminium tanpa penambahan Sr dan Ti porositas muncul pada bagian interdendritik sehingga pertumbuhan porositas dipengaruhi bentuk dendrit dan fasa eutektik yang ada. Pada komposisi normal, pertumbuhan sel eutektik memiliki daerah antarmuka *solid-liquid* yang tidak beraturan sehingga porositas yang terbentuk mengikuti permukaan sel eutektik ini menjadi *irregular* dan bercabang. Sedangkan dengan penambahan Sr dan Ti, pertumbuhan porositas yang berbentuk bulat dimulai sebelum solidifikasi eutektik. Selanjutnya fasa eutektik akan tumbuh bukan pada bagian interdendritik dengan antarmuka *solid-*

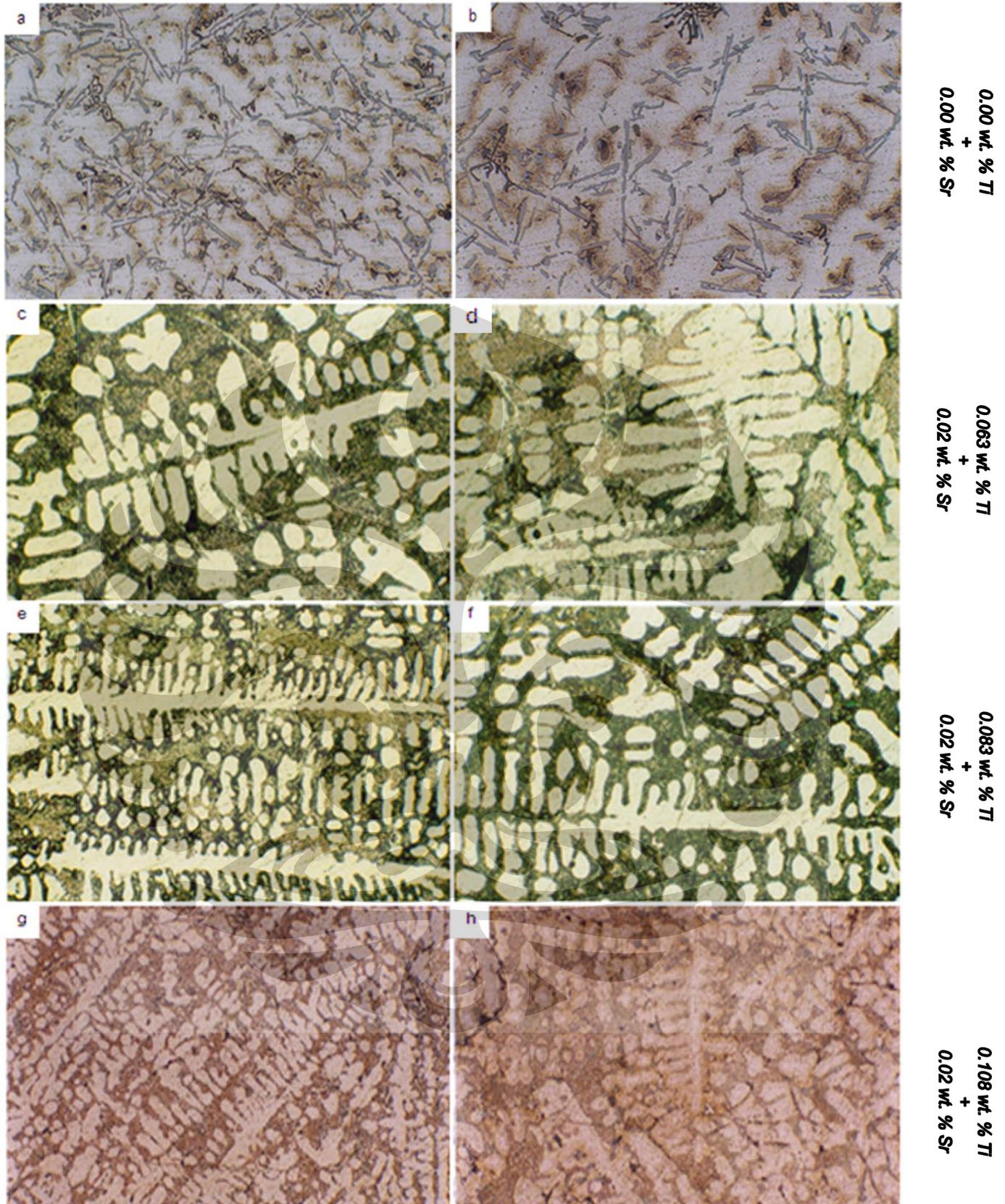
*liquid* yang halus. Dengan begitu porositas tumbuh dengan mengikuti permukaan yang halus tersebut. Porositas bulat terus bernukleasi pada bagian *intercellular* menghasilkan porositas yang bulat dan irregular sebagian<sup>[19]</sup>.

Pada paduan Al-Si dengan *modifier*, porositas berbentuk bulat mulai tumbuh pada saat sebelum solidifikasi eutektik. Pada kondisi ini, fasa eutektik bertumbuh bukan pada bagian interdendritik dengan antarmuka *solid-liquid* yang halus, sehingga porositas tumbuh dengan mengikuti permukaan yang halus tersebut. Porositas bulat terus bernukleasi pada bagian *intercellular* menghasilkan porositas yang bulat (*rounded*) dan *irregular* sebagian. Pada dasarnya penambahan *modifier* terhadap paduan Al-Si tidak menghasilkan suatu peningkatan kelarutan hidrogen, namun dengan dilakukannya modifikasi menghasilkan perubahan mekanisme segregasi dari gas hidrogen terlarut itu sendiri<sup>[16]</sup>. Seiring dengan semakin bertambahnya komposisi titanium dalam paduan, maka distribusi porositas akan merata dan fraksi volumenya akan mengalami penurunan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pada paduan Al-Si hipoeutektik, penambahan *modifier* dan penghalus butir mengubah distribusi dan morfologi porositas. Pada kondisi termodifikasi, porositas mengalami distribusi merata (terdispersi) pada seluruh bagian benda cor dan memiliki bentuk bulat atau bulat sebagian.

#### 4.4 PENGAMATAN MIKROSTRUKTUR

##### 4.4.1 Pengamatan Dengan Menggunakan Mikroskop Optik

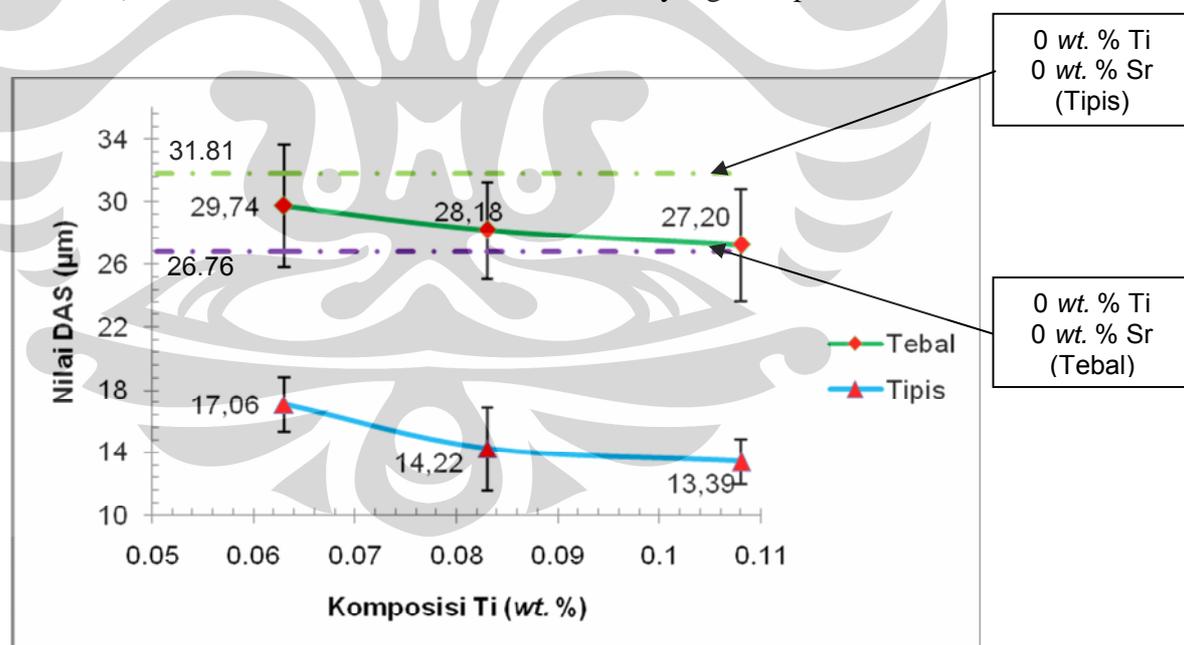
Pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dilakukan untuk mengetahui karakteristik fasa, struktur dendrit dengan kaitannya dengan sifat mekanis. Gambar 4.14 memperlihatkan tentang foto mikrostruktur paduan AC4B pada sampel tipis dan tebal tanpa penambahan (a-b), dan pada kombinasi komposisi 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr (c-d), 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr (e-f) dan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr (g-h), dengan menggunakan etsa Tucker dan perbesaran 200x. Dari Gambar 4.14 terlihat bahwa mikrostruktur tanpa dan dengan penambahan penghalus butir dan *modifier* mempunyai struktur yang sama yaitu dendritik. Dari gambar tersebut dapat dilihat secara visual bahwa terjadi pengurangan ukuran butir DAS (*Dendrite Arm Spacing*) pada setiap penambahan titanium.



**Gambar 4.14** Foto mikrostruktur paduan AC4B pada sampel tipis dan tebal paduan AC4B tanpa penambahan (a-b), dan pada kombinasi komposisi 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr (c-d), 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr (e-f), dan 0.108 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr (g-h), dengan menggunakan etsa Tucker dan perbesaran 200x

Dari Gambar 4.14 didapatkan bahwa kelas modifikasi untuk sampel tipis tanpa penambahan adalah kelas A, sampel tebal tanpa penambahan adalah kelas A. Untuk komposisi 0.063 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, sampel tipis masuk ke kelas B dan sampel tebal masuk ke kelas B. Untuk komposisi 0.083 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, sampel tipis masuk ke kelas D dan sampel tebal masuk ke kelas D. Untuk komposisi 0.108 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr, sampel tipis masuk ke kelas E dan sampel tebal masuk ke kelas E.

Pada paduan Al-Si kristal silikon eutektik yang berbentuk *acicular* akan menyebabkan adanya konsentrasi tegangan sehingga nilai keuletan material menurun. Dengan penambahan unsur modifikasi seperti stronsium akan mengubah morfologi kristal silikon eutektik menjadi *fine fibrous* sehingga konsentrasi tegangan berkurang dan sifat mekanik meningkat. Beberapa penelitian mengenai efek penambahan *modifier* telah dilakukan sebelumnya. Pada penghalusan butir dengan penambahan Al-TiB akan didapatkan butir yang lebih halus akibat adanya mekanisme penghalangan pertumbuhan butir oleh unsur-unsur terlarut (dalam hal ini Ti dan B dilihat dari nilai  $k$  yang cukup besar<sup>[25]</sup>).



**Gambar 4.15** Perbandingan nilai DAS pada daerah tipis dan tebal tanpa penambahan dan setelah penambahan dengan kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti

Gambar 4.15 menjelaskan tentang besarnya nilai DAS pada daerah tebal dan tipis pada komposisi normal dan pada kombinasi komposisi 0.02 wt. % Sr dan

0.063, 0.083 dan 0.108 wt. %. Untuk Sr konstan pada komposisi 0.02 wt. % dan 0.063 wt. % Ti nilai DAS menurun sebesar 36.25 % dari 26.76  $\mu\text{m}$  menjadi 17.06  $\mu\text{m}$  untuk daerah tipis dan menurun sebesar 6.51 % dari 31.81  $\mu\text{m}$  menjadi 29.74  $\mu\text{m}$  untuk daerah tebal. Untuk komposisi 0.083 wt. % Ti nilai DAS menurun sebesar 16.65 % dari 17.06  $\mu\text{m}$  menjadi 14.22  $\mu\text{m}$  untuk daerah tipis dan menurun sebesar 5.25 % dari 29.74  $\mu\text{m}$  menjadi 28.18  $\mu\text{m}$  untuk daerah tebal. Sedangkan pada komposisi 0.108 wt. % Ti nilai DAS menurun sebesar 5.83 % dari 14.22  $\mu\text{m}$  menjadi 13.39  $\mu\text{m}$  untuk daerah tipis dan menurun sebesar 3.48 % dari 28.18  $\mu\text{m}$  menjadi 27.20  $\mu\text{m}$  untuk daerah tebal.

Dari Gambar 4.15 ini dapat kita lihat bahwa terjadi penurunan nilai DAS seiring dengan peningkatan kadar titanium yang ditambahkan, baik pada daerah tipis, maupun tebal. Pada daerah tipis, *range* pembekuan pendek dan adanya titanium berfungsi untuk membatasi pertumbuhan butir (*growth limitation factor*). Sedangkan stronsium berperan dalam membuat porositas yang tadinya *irregular* menjadi *round* dan regular. Sehingga distribusi porositas menjadi lebih merata. Semakin menurunnya nilai DAS setiap kenaikan penambahan jumlah titanium menunjukkan bahwa *grain refiner* titanium pada paduan bekerja cukup efektif. Akan tetapi, pada daerah tebal untuk komposisi ketiga, nilai DAS mengalami kenaikan yang cukup besar. Hal ini tidak sesuai dengan literatur dan kemungkinan dapat disebabkan oleh kurang terkontrolnya variabel seperti suhu *molten*, dan kadar *impurities* dalam paduan.

Juan Asensio-Lozano *dkk*<sup>[28]</sup> melakukan penelitian mengenai efek penambahan *grain refiner* dan *modifier* pada paduan Al-12Si. Pada penelitian ini dikatakan bahwa dengan penambahan *master alloy* Al-3Ti-1B memiliki pengaruh yang cukup baik pada penghalusan dendrit dari fasa  $\alpha$ -Al. Penambahan Ti meningkatkan fraksi volume dari fasa  $\alpha$ -Al dan *primary silicon cuboids* serta menghaluskan ukuran butir. Penambahan *master alloy* Al-10Sr akan meningkatkan fraksi volume dari dendrit  $\alpha$ -Al primer. Ketika penambahan Al-TiB serta Al-10Sr digabungkan maka keefektifan dari masing-masing zat tadi secara signifikan tereduksi. Juan Asensio-Lozano juga menambahkan bahwa tidak ditemukan bukti bahwa terjadi efek *poisoning* dari titanium dan stronsium terhadap kehalusan dari kristal silikon eutektik<sup>[28]</sup>.

Terjadi efek *poisoning* pada penambahan *master alloy* Al-5Ti-1B serta *master alloy* Al-4Sr sehingga mengurangi efek modifikasi pada silikon eutektik<sup>[21]</sup>. Hal ini diduga akibat adanya interaksi antara stronsium dan titanium sehingga stronsium seakan termakan dan efektifitas stronsium menjadi berkurang. Pengamatan terhadap persenyawaan yang mengandung Al, Ti dan Si menjadi bukti tambahan yang menguatkan hipotesis dari Mohanty dan Gruzleski (1996). Hipotesis ini mengenai adanya Si yang ikut terlarur dalam  $TiAl_3$  membentuk *pointed*  $(Ti_{1-x}, Si_x)Al_3$  dengan kandungan Si yang cukup besar (>7%) menghasilkan perubahan temperatur reaksi peritektik ( $liquid + (Ti_{1-x}, Si_x)Al_3 \rightarrow \alpha-Al$ ) sehingga Al-5Ti-B kehilangan kemampuannya untuk menghaluskan dendrit  $\alpha-Al$ .

Behnam Golbahar (2008) mempelajari mengenai efek interaksi antara Sr dan Ti terhadap sifat mekanik paduan A356.2. Dalam penelitian ini tidak ditemukan sesuatu yang menandakan terjadinya interaksi antara Sr-Ti pada jangkauan kandungan Ti tertentu. Interaksi antara Sr-B tidak signifikan pada penambahan Al-Ti-B dengan kandungan yang rendah. Peningkatan kandungan B akan menyebabkan perubahan bentuk dan ukuran dari partikel silikon eutektik.

**Tabel 4.4** Perbandingan nilai karakterisasi uji mekanis sebelum dan setelah penambahan<sup>[25]</sup>

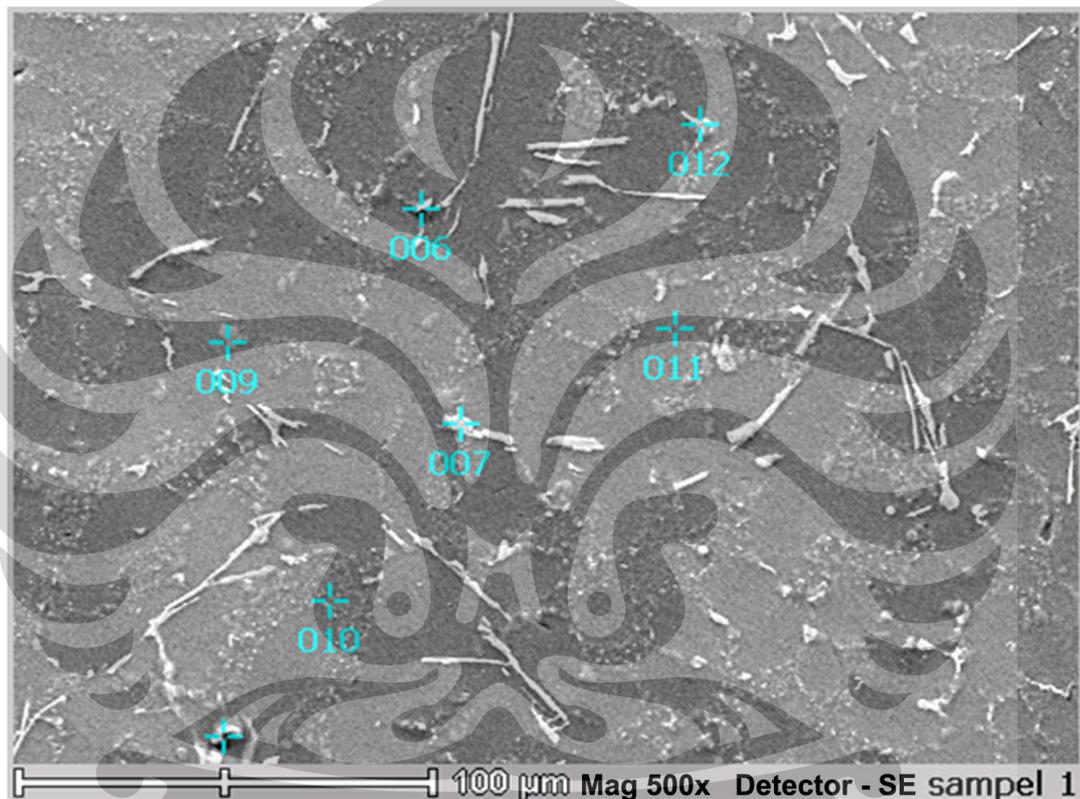
Komposisi		$\Delta$ kekerasan (%)		$\Delta$ DAS (%)		UTS (%)	Fluiditas (%)	GRF <sup>[25]</sup>
wt. % Ti	wt. % Sr	Tipis	Tebal	Tipis	Tebal			
0.063	0.02	+13.33	+11.09	-36.25	-6.51	+3.54	+63.59	76.914
0.083	0.02	+2.15	+1.02	-16.65	-5.25	+9.129	-1.829	83.373
0.108	0.02	+2.22	+4.48	-5.83	-3.48	+12.437	-1.615	90.069

Dari tabel 4.4 didapatkan bahwa seiring dengan bertambahnya kadar titanium dalam paduan, maka nilai GRF (*growth restriction factor*) akan meningkat. Nilai GRF yang semakin tinggi menandakan bahwa butir yang terbentuk akan berukuran semakin kecil. Dimana nilai GRF berbanding terbalik dengan ukuran butir. Akan tetapi, meningkatnya nilai GRF ini semata-mata bukan hanya karena efek dari penambahan titanium saja melainkan juga dipengaruhi oleh penambahan unsur-unsur lainnya. Dalam penelitian ini, beberapa unsur yang diambil untuk

dijadikan acuan perhitungan nilai GRF adalah Ti, Si, Cu, Mg, Mn, Cr, Fe, dan Ni<sup>[25]</sup>.

#### 4.4.2 Pengamatan Dengan Menggunakan SEM / EDAX

Gambar 4.16 menjelaskan tentang hasil SEM untuk komposisi 0.063 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr. Pada Gambar 4.16, hasil pengamatan dengan SEM dapat dibedakan dari bentuk (morfologi), warna, serta komposisi kimia fasa-fasa yang ada.



**Gambar 4.16** Hasil pengujian SEM untuk komposisi 0.063 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX

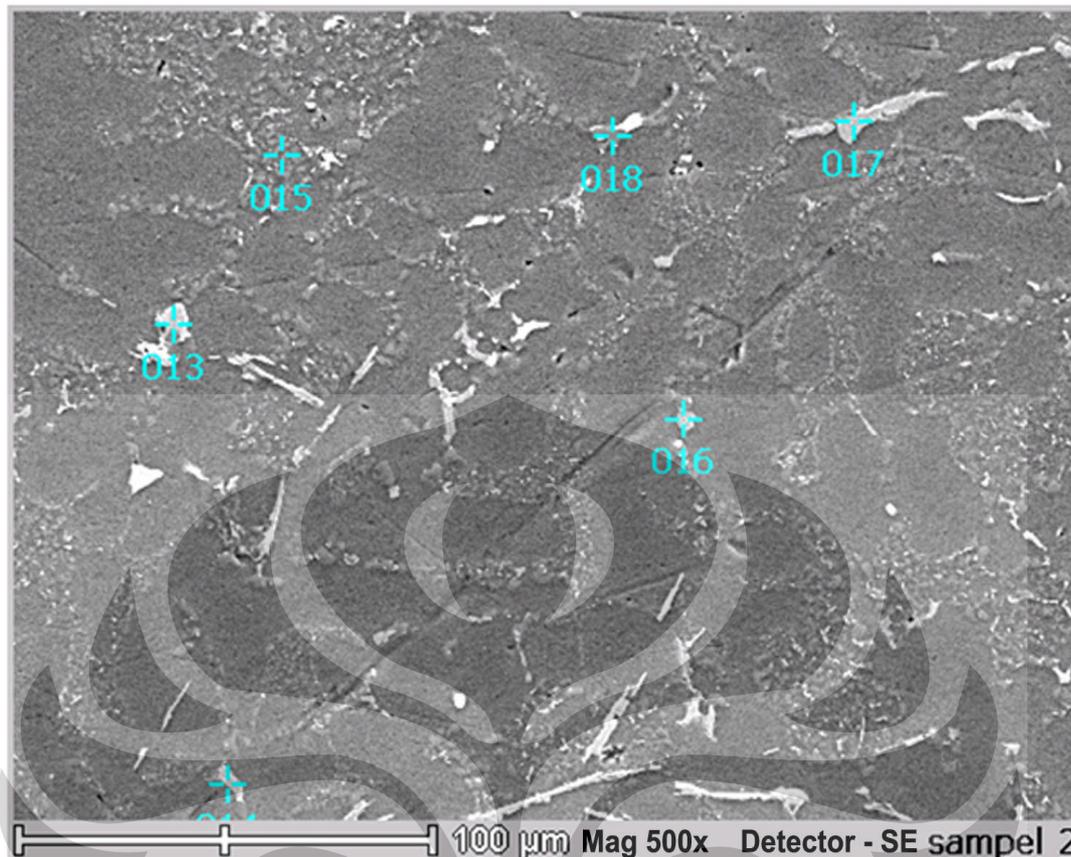
Berdasarkan literatur, diketahui fasa nomor 6 diindikasikan sebagai inklusi yang berupa fasa intermetalik Fe dan Mn. Akan tetapi, kadar Fe dan Mn pada titik ini tidak begitu besar, hanya 0.25 wt. % Fe dan 0.23 wt. % Mn. Diambil kesimpulan bahwa fasa yang terbentuk merupakan kristal Al-Si. Fasa nomor 7 diindikasikan sebagai fasa Al<sub>2</sub>Cu. Namun, berdasarkan komposisi persen berat Cu (2.51 wt. %) ternyata terlalu kecil untuk diindikasikan sebagai fasa Al<sub>2</sub>Cu. Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan bahwa fasa yang mendekati perbandingan massa atom untuk senyawa-senyawa yang ada adalah fasa Al<sub>5</sub>FeSi.

Terbentuknya fasa ini karena adanya unsur Mn dan Fe yang berlebih, unsur Mn dan Fe pada aluminium memiliki kelarutan yang rendah yaitu 0.052 wt. % untuk Fe dan 1.82 wt. % untuk Mn, sehingga Fe dan Mn tidak larut pada aluminium. Unsur yang tidak terlarut ini akan membentuk fasa intermetalik. Struktur jarum AlFeSi memberikan sifat yang merusak sifat mekanis karena sangat dan mengurangi ketahanan korosi serta menyebabkan *shrinkage cavities*. Penambahan Ti memicu pembentukan fasa intermetalik karena Ti tersebut menjadi inti dari intermetalik tersebut<sup>[28]</sup>.

**Tabel 4.5** Komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.16 dengan komposisi 0.063 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

No	Komposisi								Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Al	Si	Ti	Sr	Cu	Fe	Mn	Mg		
6	47.46	2.16	0.44	0.97	0.99	0.25	0.23	0.44	Putih, abu-abu tua	Al-Si, Al <sub>3</sub> Ti, $\alpha$ -Al
7	32.30	7.70	-	2.14	2.51	9.95	1.83	0.53	Putih	Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>5</sub> FeSi
8	49.24	0.87	0.49	0.54	1.42	0.50	-	0.39	Abu-abu tua	Mg <sub>2</sub> Si, Ti <sub>2</sub> Si <sub>5</sub> , Al-Si
9	39.58	8.46	0.41	2.67	0.83	0.23	0.27	0.43	Abu-abu	Al-Si, Al <sub>15</sub> (Fe,Mn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>
10	33.82	8.15	-	2.52	11.65	0.3	-	-	Abu-abu	Al-Si
11	50.41	0.89	-	0.45	0.53	0.23	0.22	0.45	Abu-abu	$\alpha$ -Al, Mg <sub>2</sub> Si
12	6.8	33.40	-	8.48	3.27	0.4	0.23	0.47	Abu-abu tua	Silikon eutektik

Fasa nomor 8, diindikasikan sebagai fasa Al-Si. Akan tetapi, berdasarkan perhitungan perbandingan masa atom dan berat didapatkan bahwa fasa tersebut merupakan fasa Mg<sub>2</sub>Si. Fasa nomor 9, diindikasikan sebagai fasa intermetalik Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>. Akan tetapi, kadar Fe dan Mn pada titik ini tidak begitu besar, hanya 0.23 wt. % Fe dan 0.27 wt. % Mn. Diambil kesimpulan bahwa fasa yang terbentuk merupakan kristal Al-Si. Fasa nomor 10, merupakan fasa Al-Si kristal yang dominan bila dibandingkan dengan fasa lainnya. Akan tetapi, komposisi Cu yang didapatkan cukup besar, yakni sebesar 11.65 wt. %. Sehingga dapat diindikasikan fasa tersebut merupakan fasa Al<sub>2</sub>Cu yang lebih halus. Fasa nomor 11, diindikasikan sebagai sebagai fasa  $\alpha$ -Al (matriks) yang merupakan fasa dominan pada aluminium AC4B, fasa ini terlihat pada komposisi yang dihasilkan yaitu hingga 99 %. Fasa nomor 12, diindikasikan sebagai fasa silikon eutektik yang bersegregasi dengan Sr.



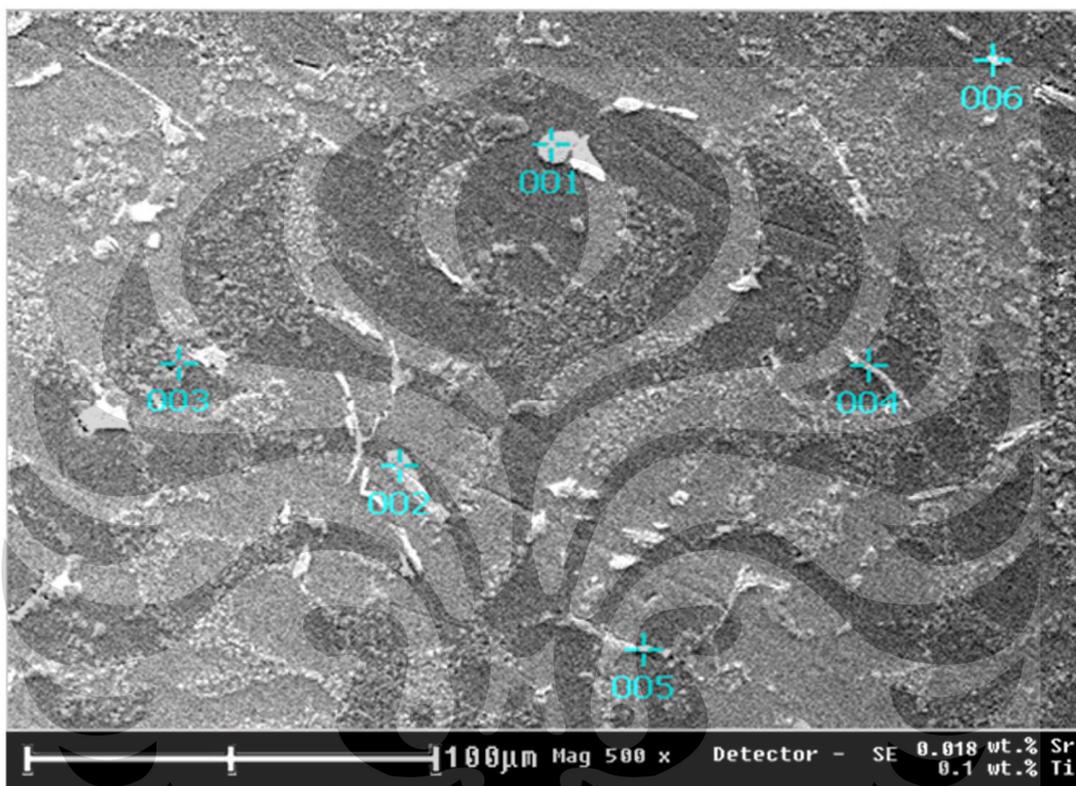
**Gambar 4.17** Hasil pengujian SEM untuk komposisi 0.083 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX

**Tabel 4.6** Komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.17 dengan komposisi penambahan 0.05 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

No	Komposisi								Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Al	Si	Ti	Sr	Cu	Fe	Mn	Mg		
13	31.76	4.17	0.41	1.38	5.02	12.36	5.11	-	Putih, abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>5</sub> FeSi
14	33.71	4.19	-	1.33	3.35	9.21	6.69	0.38	Abu-abu	Al-Si, FeMnAl <sub>6</sub>
15	38.57	9.69	0.51	2.46	0.91	0.22	0.22	0.41	Abu-abu tua	Al <sub>3</sub> Ti, Al-Si
16	34.42	3.93	0.4	0.86	3.77	10.33	5.14	-	Abu-abu, putih	Al(Fe,Mn)Si, FeMnAl <sub>6</sub>
17	30.26	4.26	0.47	2.28	5.23	13.37	4.65	-	Abu-abu muda	Al(Fe,Mn)Si
18	2.04	39.83	-	7.58	0.56	-	0.3	0.39	Putih	Al <sub>2</sub> Cu, Silikon eutektik

Berdasarkan literatur, fasa nomor 13 diindikasikan sebagai fasa Al<sub>2</sub>Cu sesuai dengan perbandingan kadar antara Al dan Cu. Akan tetapi, terdapat kemungkinan lainnya bahwa fasa ini dapat juga diindikasikan sebagai fasa Al<sub>5</sub>FeSi. Fasa nomor 14 berdasarkan perbandingan antara masa atom diindikasikan sebagai fasa Al-Si dan dapat diindikasikan juga sebagai fasa FeMnAl<sub>6</sub>. Fasa nomor 15 diindikasikan sebagai fasa Al-Si kristal. Fasa nomor 16

diindikasikan sebagai fasa intermetalik Al(Fe,Mn)Si. Efek yang ditimbulkan oleh fasa ini sama dengan fasa  $Al_5FeSi$ . Fasa nomor 17 diindikasikan sebagai fasa Al(Fe,Mn)Si. Sedangkan untuk fasa nomor 18 diindikasikan sebagai fasa  $Al_2Cu$ . Namun, kadar Cu yang terlalu kecil, 0.56 wt. % tidak dapat dijaikan acuan. Sehingga diambil kesimpulan bahwa fasa ini diindikasikan sebagai fasa silikon eutektik yang bersegregasi dengan Sr.



**Gambar 4.18** Hasil pengujian SEM untuk komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr, nomor menunjukkan titik pengujian EDAX

**Tabel 4.7** Komposisi hasil analisa titik SEM / EDAX pada Gambar 4.18 dengan komposisi penambahan 0.07 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

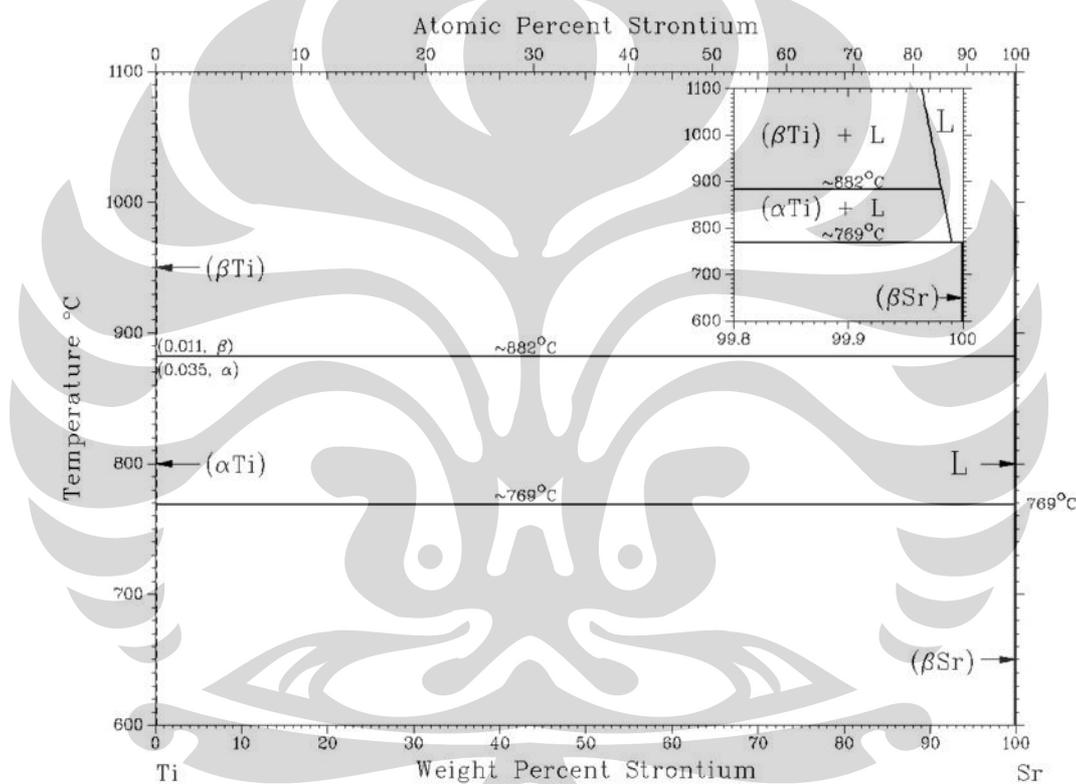
No	Komposisi								Warna	Fasa yang mungkin terbentuk
	Al	Si	Ti	Sr	Cu	Fe	Mn	Mg		
1	25.73	0.75	-	0.16	38.41	0.44	-	-	Putih	$Al_2Cu$
2	23.32	12.34	-	0.68	1.98	17.07	3.14	-	Abu-abu muda	Al(Fe,Mn)Si, $FeAl_3$
3	28.26	17.51	0.46	3.73	0.64	0.23	-	0.49	Abu-abu	Al-Si
4	29.32	9.27	0.63	1.95	1.48	9.26	4.83	0.52	Abu-abu muda	$Al_3Ti$ , Al(Fe,Mn)Si
5	49.51	0.81	-	-	3.49	-	0.27	-	Abu-abu tua	$\alpha$ -Al
6	38.76	3.79	-	3.04	4.19	3.92	-	2.71	Abu-abu tua	$Mg_2Si$ , AlSi Kristal

Berdasarkan literatur, fasa nomor 1 mengindikasikan fasa  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Fasa nomor 2 mengindikasikan fasa intermetalik  $\text{Al}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}$ . Selain itu, pada titik ini juga didapatkan fasa  $\text{FeAl}_3$ . Fasa nomor 3 mengindikasikan fasa  $\text{Al-Si}$ . Fasa nomor 4 mengindikasikan fasa  $\text{Al}(\text{Fe},\text{Mn})\text{Si}$  yang bersegregasi dengan Sr. Fasa nomor 5 mengindikasikan  $\alpha\text{-Al}$ . Sedangkan untuk fasa nomor 6 mengindikasikan fasa  $\text{Al-Si}$  dan  $\text{Mg}_2\text{Si}$  yang bersegregasi dengan Sr.

Struktur mikro dari paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi, kecepatan pembekuan, serta perlakuan panas. Pada saat paduan aluminium silikon hipoeutektik (kandungan silikon dibawah 12 wt. %) mulai membeku, terdapat beberapa macam fasa yang mengendap, diawali dengan pembentukan jaringan dendritik  $\alpha$ -aluminium, diikuti reaksi eutektik  $\text{Al-Si}$ , kemudian diikuti dengan fasa yang mengandung Mn dan Fe, dan diakhiri dengan pengendapan fasa kedua eutektik seperti  $\text{Mg}_2\text{Si}$  dan  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Umumnya fasa yang mengandung Mn dan Fe adalah fasa  $\text{Al}_3\text{FeSi}$  yang terbentuk oleh pembekuan lambat, dan  $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$  yang terbentuk oleh pembekuan cepat<sup>[11]</sup>. Unsur Mn dan Fe mempunyai kecenderungan untuk saling berikatan dan saling bersubstitusi satu sama lain. Mn dan Fe memiliki nomor atom yang tidak jauh berbeda ( $\text{Mn} = 25$ ;  $\text{Fe} = 26$ ) dan nilai keelektronegatifan yang tidak berbeda jauh sehingga dapat membentuk ikatan yang kuat. Fasa  $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$  dan fasa  $\text{Al}_2\text{Cu}$  merupakan fasa intermetalik, yaitu fasa kedua yang mengendap pada paduan aluminium, yang terbentuk akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Fasa intermetalik ini akan terbentuk mengelilingi fasa aluminium primer. Fasa aluminium primer (dendrit) dikelilingi oleh jaringan fasa intermetalik dan partikel kristal silikon.

Fasa pembentuk inti dapat terbentuk pada fasa eutektik<sup>[27]</sup>. Namun, hasil ini tidak menunjukkan bahwa fasa pembentuk inti sulit terbentuk pada aluminium primer yang hakikatnya merupakan fasa awal pembekuan paduan aluminium AC4B. Secara keseluruhan dari hasil pengamatan SEM dan EDAX, tidak terdeteksi adanya pembentuk inti  $\text{TiAl}_3$  yang bertindak sebagai nuklean dalam paduan aluminium AC4B. Luasnya area yang diuji cukup besar dan sulitnya mencari inti dendrit aluminium primer menjadi faktor penyebabnya.

Partikel  $\text{TiB}_2$  tidak larut ketika dimasukkan ke *molten* dan akan tetap berwujud partikel padat dengan ukuran 0.5 sampai 5  $\mu\text{m}$  ketika berada dalam *molten*<sup>[20][34]</sup>. Berat jenis dari  $\text{TiB}_2$  ( $4.5 \text{ g/cm}^3$ ) yang lebih besar daripada aluminium cair ( $2.3 \text{ g/cm}^3$ ) dapat menimbulkan pengendapan<sup>[34]</sup>. Menurut teori, partikel  $\text{TiAl}_3$  pada penghalus butir akan langsung larut jika dimasukkan ke dalam *molten*. Selanjutnya, partikel  $\text{TiAl}_3$  baru akan terbentuk ketika aluminium mengalami proses pembekuan, dimana pembentukan inti  $\text{TiAl}_3$  akan terjadi lebih dahulu sebelum inti aluminium terbentuk<sup>[20][34]</sup>. Sehingga dalam siklus LPDC yang memakan waktu 4 jam, partikel  $\text{TiAl}_3$  lebih efektif daripada partikel  $\text{TiB}_2$ .



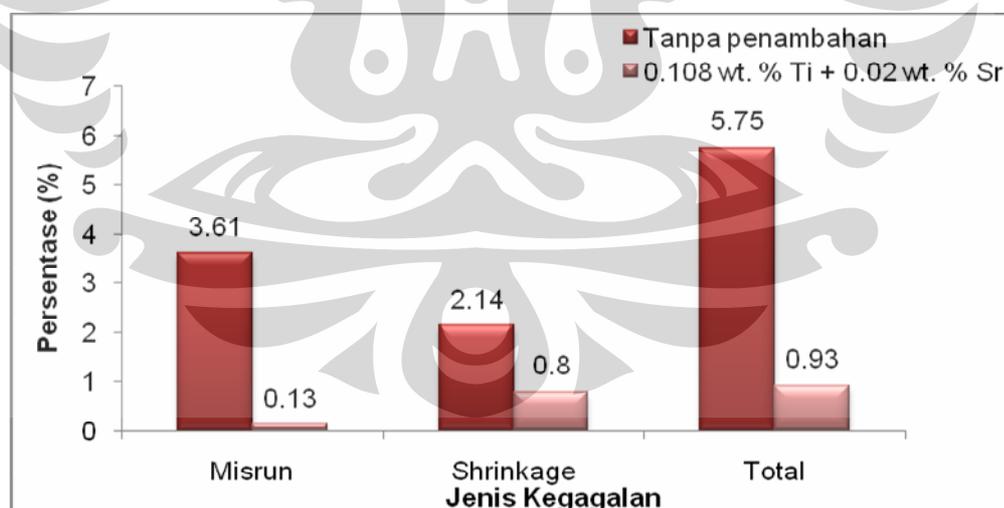
Gambar 4.19 Diagram fasa Ti-Sr<sup>[25]</sup>

Pada setiap komposisi ditemukan adanya kanudngan Ti dan Sr. Diindikasikan terjadinya interaksi antara Ti dan Sr dengan salah satu bukti adanya interaksi ini adalah terbentuknya persenyawaan diantara unsur tersebut. Namun, apabila merujuk pada diagram fasa Sr-Ti seperti ditunjukkan Gambar 4.19 maka tidak mungkin terjadi persenyawaan antara Ti dan Sr pada rentang temperatur penelitian ini. Pada penelitian ini rentang temperatur *molten* aluminium dijaga pada  $710 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  dimana pada temperatur inilah penambahan Ti dan Sr

dilakukan. Dalam diagram fasa Ti-Sr kemungkinan terjadinya persenyawaan Ti-Sr pada temperatur diatas 769 °C. Sehingga kemungkinan terbesar adalah Ti dan Sr yang ada membentuk fasa tersendiri misalnya Ti kemungkinan dalam bentuk  $Al_3Ti$  dan Sr dalam bentuk  $Al_4SrSi$  atau  $Al_2Si_2Sr$ . Oleh karena itu disimpulkan bahwa pada penelitian ini tidak terjadi interaksi antara Ti dan Sr.

#### 4.5 ANALISIS TINGKAT KEGAGALAN PADA KOMPONEN *CYLINDER HEAD* DENGAN VARIASI PENAMBAHAN TITANIUM

Komponen yang digunakan pada penelitian ini adalah *part cylinder head* yang telah diproduksi melalui proses LPDC oleh PT AHM. Telah diketahui sebelumnya bahwa tingkat kegagalan atau *reject part* yang cukup tinggi sering terjadi terutama yang disebabkan oleh kebocoran (porositas) yang disebabkan oleh gas dan porositas akibat terciptanya *shrinkage* pada daerah interdendritik dari aluminium tersebut. Pada Gambar 4.20 diperlihatkan perbandingan persentasi kegagalan akibat cacat pada kondisi *as-cast* komponen *cylinder head* tanpa penambahan dan setelah dilakukan kombinasi penambahan 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr dengan jumlah total komponen 764 buah.



**Gambar 4.20** Perbandingan presentasi kegagalan akibat misrun dan *shrinkage* pada paduan aluminium AC4B tanpa penambahan dan pada komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

Seperti terlihat pada Gambar 4.20 dengan penambahan 0.1 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr terjadi penurunan kegagalan akibat misrun sebesar 96.39 % dari 3.61 % menjadi 0.13 %. Selain itu juga, terjadi penurunan kegagalan akibat

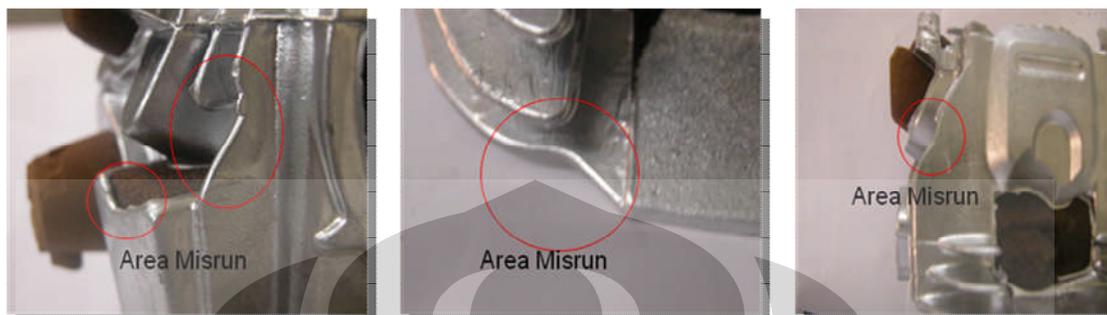
*shrinkage* sebesar 62.62 % dari 2.14 % menjadi 0.8 %. Secara keseluruhan total kegagalan pada komponen *cylinder head as-cast* mengalami penurunan sebesar 83.83 % dari 5.75 % menjadi 0.93 %.

Pada umumnya, kegagalan bocor disebabkan oleh banyak faktor, yaitu akibat adanya *shrinkage* dan *porosity* pada bagian dalam yang menembus hingga ke bagian luar *cylinder head*. *Shrinkage* dan *porosity* pada paduan aluminium AC4B hasil LPDC dapat disebabkan oleh<sup>[41]</sup>:

1. tingginya kandungan hidrogen pada *molten*;
2. kebocoran tekanan injeksi;
3. tersumbatnya *gate*;
4. pembekuan yang tidak terarah ke *gate*;
5. *core* yang terlepas/gugur;
6. *coating* terlepas;
7. lapisan oksida ikut masuk ke cetakan; dan
8. *molten* yang kotor.

Penyebab kegagalan bocor biasanya akibat *gate* yang tersumbat, pembekuan yang tidak terarah ke *gate*, *core* yang terlepas/gugur, *coating* yang terlepas, lapisan oksida ikut masuk ke cetakan dan *molten* yang kotor. Untuk tingginya kandungan hidrogen pada *molten* memiliki kemungkinan yang kecil karena telah dilakukan proses *degassing* terlebih dahulu dan temperatur *molten* pun masih sesuai standar. Kandungan hidrogen pada aluminium akan meningkat dengan semakin tingginya temperatur<sup>[20]</sup>. Sedangkan untuk kebocoran tekanan injeksi tidak terjadi sebab selama proses pengecoran diketahui bahwa tekanan yang terjadi konstan dan masih sesuai standar yaitu 250-268 KPa. Pada penelitian ini, diketahui bahwa bagian *gate* produk *cylinder head* yang dihasilkan terisi penuh oleh aluminium cair yang mengindikasikan pembekuan yang tidak terarah ke *gate*, dan pada *gate* seringkali terdapat oksida aluminium walaupun dalam jumlah yang sedikit. Oksida aluminium dapat tertumpuk pada filter *ferro* dan menghambat aliran aluminium cair ke cetakan. Pada suatu penelitian diketahui bahwa telah ditemukan adanya partikel TiB<sub>2</sub> dan oksida yang tersangkut pada filter keramik yang digunakan pada pengecoran aluminium yang ditambahkan Al-5Ti-1B<sup>[34]</sup>. Selain itu pada penelitian ini juga sempat terlihat adanya inklusi pasir

pada *cylinder head* dan juga beberapa kali *dies* mengalami kemacetan dan sulit digerakan. Gambar 4.21 menjelaskan tentang contoh cacat misrun dan Gambar 4.22 menjelaskan tentang cacat *shrinkage* pada komponen *cylinder head*.

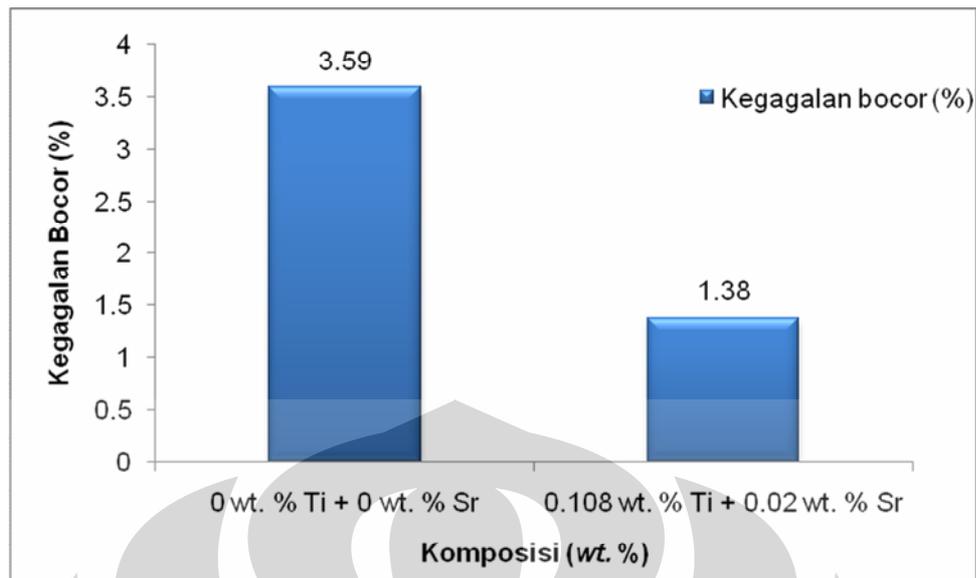


Gambar 4.21 Contoh cacat misrun<sup>[15]</sup>



Gambar 4.22 Cacat *shrinkage* pada *cylinder head* (a); *shrinkage* pada bagian dalam *cylinder head* setelah dipotong (b)<sup>[15]</sup>

Uji bocor dilakukan untuk mengetahui kelayakan dari komponen *cylinder head* yang telah diproduksi sehingga tidak terjadi kebocoran saat digunakan. Kebocoran ini tidak dapat terlihat dengan mata karena kebocoran ini dapat terjadi pada bagian dalam *cylinder head*. Kebocoran dapat terjadi karena adanya porositas ataupun *microshrinkage* yang terjadi di bagian dalam *cylinder head*. Pengujian kebocoran dilakukan diseksi *machining* pada 100 komponen *cylinder head* yang telah lulus inspeksi pada seksi LPDC. Gambar 4.23 menampilkan perbandingan persentase kegagalan akibat kebocoran komponen *cylinder head* tanpa penambahan dan pada komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr terjadi penurunan kegagalan akibat bocor sebesar 61.5 % dari 3.59 % menjadi 1.38 %.

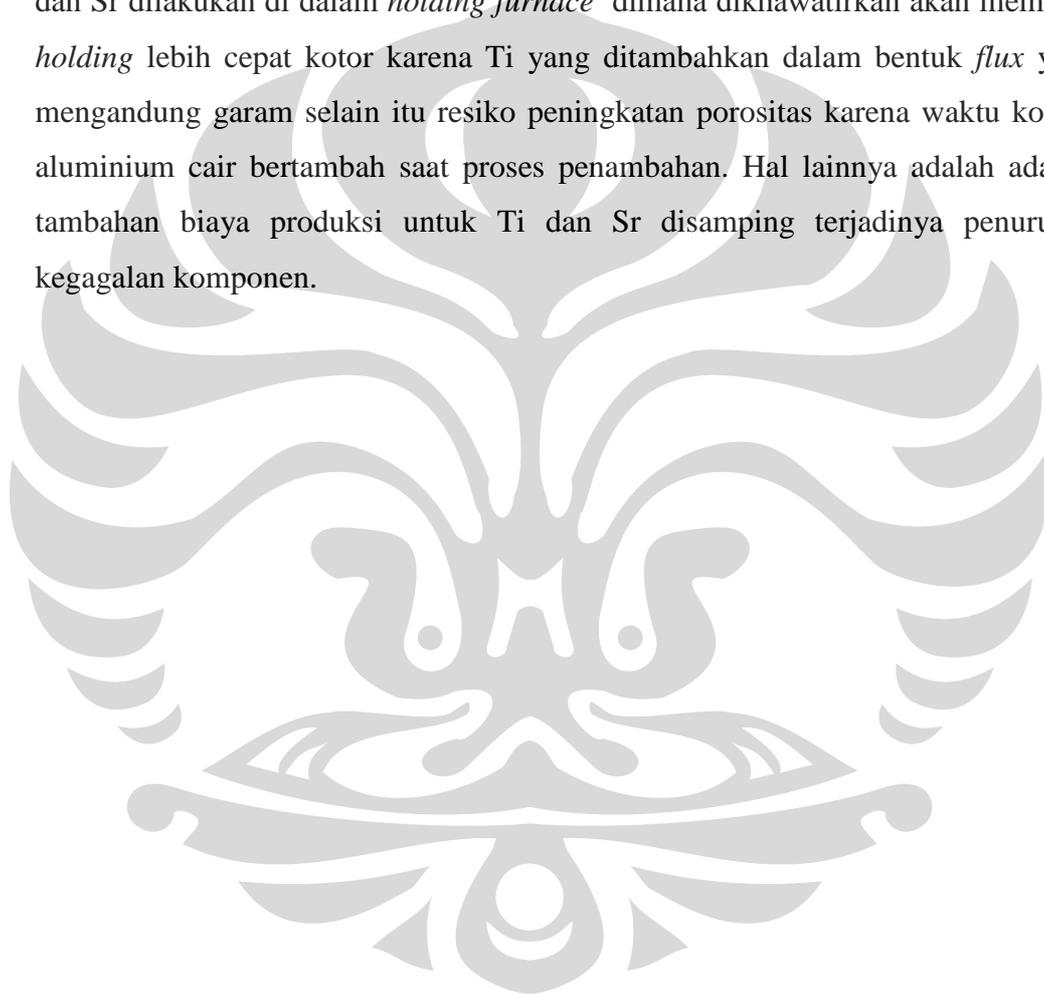


**Gambar 4.23** Perbandingan persentase kegagalan akibat bocor pada komponen *cylinder head* tanpa penambahan dan pada komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr

Penurunan persentase kegagalan pada komponen *cylinder head* setelah penambahan Ti dan Sr berhubungan dengan mekanisme penghalusan butir dan modifikasi dari kedua unsur tersebut. Penurunan kegagalan akibat misrun kemungkinan berhubungan dengan peningkatan karakteristik fluiditas dari paduan aluminium AC4B. Dengan meningkatnya fluiditas maka cairan aluminium mampu mengalir memenuhi cetakan sehingga resiko misrun berkurang<sup>[2]</sup>. Penurunan shrinkage pada komponen dengan penambahan Ti dan Sr berhubungan dengan meningkatnya kemampuan *feeding* paduan aluminium. *Feeding* merupakan suatu proses penyeimbangan volume dari aluminium yang menyusut dengan cara memasok aluminium yang masih cair. Dengan ukuran dendrit yang besar pada aluminium, tahanan terhadap mekanisme *feeding* akan terjadi lebih awal. Apabila mekanisme *feeding* terhalang maka penyusutan akan terjadi. Dengan penambahan Ti dan Sr, ukuran dendrit menjadi lebih halus sehingga *feeding* dapat berlangsung lebih lama<sup>[24]</sup>.

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan Ti dan Sr akan meningkatkan sifat mekanis dan menurunkan nilai DAS dari paduan AC4B, dapat menjadi salah satu alternatif dalam mengurangi kegagalan produk AC4B hasil LPDC. Dalam aplikasi untuk produksi pada paduan aluminium AC4B perlu diperhatikan beberapa hal. Hal tersebut adalah dalam penambahan Ti

dan Sr diperlukan perhitungan *material balance* yang tepat sehingga komposisi Ti dan Sr target dapat tercapai. Komposisi yang disarankan dari hasil penelitian ini adalah 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr karena pada komposisi ini terjadi peningkatan sifat mekanis yang optimum. Selain itu dalam proses penambahan Ti dan Sr harus hati-hati agar tidak menyebabkan Ti dan Sr terbakar dipermukaan sebelum tercampur dalam *molten*, untuk itu perlu dipikirkan alternatif cara penambahan yang paling tepat dan efektif. Dalam penelitian ini penambahan Ti dan Sr dilakukan di dalam *holding furnace* dimana dikhawatirkan akan membuat *holding* lebih cepat kotor karena Ti yang ditambahkan dalam bentuk *flux* yang mengandung garam selain itu resiko peningkatan porositas karena waktu kontak aluminium cair bertambah saat proses penambahan. Hal lainnya adalah adanya tambahan biaya produksi untuk Ti dan Sr disamping terjadinya penurunan kegagalan komponen.



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 KESIMPULAN

1. Pengaruh komposisi 0.02 wt. % Sr dan 0.063, 0.083 dan 0.108 wt. % Ti akan meningkatkan sifat mekanik, porositas panjang fluiditas, dan tingkat modifikasi silikon eutektik. Akan tetapi, nilai DAS akan mengalami penurunan.

Karakteristik optimum dicapai pada komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr.

- a. Kekerasan : daerah tipis (52.48 HRB) dan tebal ( 51.3 HRB)
  - b. UTS : 251.105 MPa
  - c. DAS : Tipis (13.39  $\mu\text{m}$ ) dan tebal (27.20  $\mu\text{m}$ )
  - d. Fluiditas : 63.36 cm
2. Nilai elongasi optimum didapatkan pada komposisi 0.083 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr sebesar 2.3 %. Namun, nilai elongasi ini tidak dapat diacukan sebagai nilai elongasi paduan aluminium AC4B.
  3. Kombinasi penambahan Ti dan Sr meningkatkan kuantitas porositas. Selain itu dengan kombinasi penambahan Ti dan Sr, porositas lebih terdistribusi merata pada seluruh bagian benda cor dan memiliki bentuk yang bulat dan *irregular* sebagian.
  4. Pada komposisi 0.063 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr memiliki derajat modifikasi kelas B. Pada komposisi 0.083 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr memiliki derajat modifikasi kelas D. Pada komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr memiliki derajat modifikasi kelas E.

5. Penggabungan proses modifikasi dan penghalusan butir akan menghasilkan struktur kristal yang termodifikasi menjadi struktur *fibrous* dan dendrit yang halus dengan hasil optimum pada 0.108 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.
6. Pada percobaan ini tidak ditemukan adanya interaksi antara Ti dan Sr dalam paduan. Hal ini dapat dilihat dari diagram Ti-Sr yang menunjukkan interaksi pada temperatur 769 °C, namun pada percobaan ini temperatur *molten* aluminium dijaga pada  $710 \pm 10$  °C. Sehingga kemungkinan terbesar adalah Ti dan Sr yang ada membentuk fasa tersendiri misalnya Ti kemungkinan dalam bentuk  $Al_3Ti$  dan Sr dalam bentuk  $Al_4SrSi$  atau  $Al_2Si_2Sr$ .

## 5.2 SARAN

Adapun saran yang dapat diberikan adalah:

1. Untuk proses penuangan aluminium cair harus diusahakan untuk dijaga kecepatannya.
2. Cetakan uji tarik dan fluiditas harus dijaga temperaturnya sebesar 270 °C.
3. Jarak antara cetakan dan *furnace* harus dijaga sedekat mungkin agar pembekuan tidak terjadi ditudukan.
4. Penuangan *molten* ke cetakan sampel uji tarik dan fluiditas sebaiknya dilakukan oleh orang yang ahli agar tidak banyak *molten* yang terbuang.
5. Untuk penelitian selanjutnya, harap diperhatikan komposisi penghalus butir dan *modifier* dengan teliti. Sebelum dilakukan penambahan, lakukanlah pengujian spektometri terlebih dahulu agar hasil yang didapatkan lebih akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Kaufman, Gilbert J, Elwin L. Rooy. *Aluminum Alloy Casting : Properties, Processes, and Applications*. Ohio : ASM Internasional (The Materials Information Society). 2005.
2. Jorstad, John L., Rasmussen, Wayne M. *Aluminium Casting Technology – 2<sup>nd</sup> edition*, Illinois : The American Foundry Society, 1993.
3. Gruzleski, John E; Closset, Bernard M. *The Treatment of Liquid Aluminium - Silicon Alloys*. Illinois : American Foundrymen Society, 1999.
4. Mondolfo, L.F. *Aluminium Alloys : Structure and Properties*. London : Butterworth. 1979.
5. William D. Callister, jr, *Material Science and Engineering* (Utah: John Wiley & son,inc, 1997)
6. Hatch, John E. *Aluminium Properties and Physical Metallurgy*. American Society for Metals : Metal Parks, Ohio. 1995
7. Data internal PT AHM Indonesia
8. Mondolfo, L.F. *Aluminum Alloys : Structure and Properties*. London : Butterworth.1979.
9. Backeurd, Lennart; Chai, Goucai; Tamminen, Jarmo. *Solidification Characteristics of Aluminium Alloys : Volume 2 Foundry Alloys*. Stockholm : Skan Aluminium.1990.
10. Bäckerud, Lennart; Chai; Guocai; Tamminen, Jarmo. *Solidification Characteristics of Aluminium Alloys : Volume 2 Foundry Alloys*. Stockholm: Skan aluminium, 1990
11. ASM Handbook, *Casting*, Volume 15. Ohio : ASM International Metals Park. 1992
12. Arnbeg, Lars., Becherud, Lennart., Chai, Goucai. *Solidification Characteristics of Aluminium Alloys-Volume3: Dendrite Coherency*. American Foundrymen's Society, Inc.1996
13. Bambang Suharno, Dr.-Ing. dan Bustanul Arifin Ir., M.Phil, Diktat Kuliah: *Grain Refinement dalam Aluminium Tuang*,.Eng, Departemen Metalurgi dan Material FTUI, 2006.
14. JIS Handbook. *Non Ferrous Metals & Metallurgy*. Japanese Standard Assosiation. Tokyo. 1977.
15. Buku Panduan PT AHM

16. Surdia, T. Chijiwa K. (1991). *Teknik Pengecoran Logam*, Jakarta: Pradnya Paramita.
17. Easton, Mark & StJohn, David. (2004). *An Analysis of the Relationship between Grain Size, Solute Content, and the Potency and Number Density of Nucleant Particles*. Australia. University of Queensland
18. A.K. Dahle, L. Arnberg, P.A. Tondel, C.J. Paradies, *Met. Trans. A* 8 (1996) 2305.
19. Polmear, I.J. (2006). *Light Alloys : Metallurgy of the Light Metals. Fourth Edition*. Oxford : Butterworth-Heinemann.
20. Moldovan, P. & Popescu, Gabriela. (2004). *Grain Refinement of 6063 Aluminum Using Al-5Ti-1B and Al-3Ti-0,15C Grain Refiners*. Rumania. University Politehnica of Bucharest
21. Liao, H., Y.Sun. (2002). *Correlation between mechanical properties and amount of dendritic alpha-Al phase in as-cast near-eutectic Al-1.6% Si alloys modified with strontium*. *Journal of Material Science*, Vol. 37, pp. 3489-3495.
22. Shivkumar, S., L. Wang, D. Apelian. (1991). *Molten metal processing of advanced cast aluminum alloys*. *Journal of Metal*, p. 26-32.
23. Lu, L., A.K. Dahle. *Effects of combined additions of Sr and AlTiB grain refiners in hypoeutectic Al-Si foundry alloys*.
24. Rao, A. K. Prasada *et al.* (2005). *Improvement in tensile strength and load bearing capacity during dry wear of Al-7Si alloy by combined grain refiner and modification*. *Journal of Material Science and Engineering A* 395.
25. Fuoco, R., Fuoco, E.R Correa, M. de Andrade Bastos. (2001). *Microporosity Morphology in A 356 Aluminium Alloy in unmodified and in Sr-modified conditions*, *AFS Transactions* 01-168 (p 1-20) IPT =Technological research Institute-Metallurgy Division Sao Pauli-Brazil.
26. Cook, Dr Ray. "Grain Refinement of Aluminium-Silicon Foundry Alloys". South Yorkshire: London & Scandinavian Metallurgical Co. Limited. 1998.
27. Limmaneevichitr, C., Eidhed, W. "Fading mechanism of Grain Refinement of Aluminum-Silicon Alloy with Al-Ti-B Grain Refiners". *Material Science and Engineering A* 349, 197-206. 2003.

28. Asenio, Juan. Lozano. Beatriz, Suarez.Pena. (2006). *Effect of Addition of Refiners and/or Modifiers on the Microstructure of Die Cast Al-12Si Alloys*. Scripta Materialia, 54, 943-947
29. Torres, Ruben, dkk. "Characterisation of an Aluminium Engine Block" *Inderscience Enterprises*. 2006
30. Lim Ying Pio, Shamsuddin Sulaiman, Abdel Majid Hamouda, "Grain Refinement of LM6 Al-Si Alloy Sand Castings to Enhance Mechanical Properties" *Journal of Materials Processing Technology*.162-163 (2005) hal. 435-441
31. M Parapat, Thomas; skripsi " Studi Pengaruh Penambahan 0015 wt. % Sr Terhadap Karakteristik Paduan AC4B Hasil *Low Pressure Die Casting*". Universitas Indonesia. 2006.
32. Shahrooz Nafisi , Reza Ghomashchi; "Grain Refining of Conventional and Semi-Solid A356 Al-Si Alloy" *Journal of Materials Processing Technology* 174 (2006) hal. 371-383
33. Manash Dash, Makhlof Makhlof, "Effect of Key Alloying Elements on the Feeding Characteristics of Aluminum-Silicon Casting Alloys", *Journals of Light Metals*, 2001, hal. 251-265
34. Metallurg Aluminium. (n.d). *Aluminium Alloys – Trends in TiBAl Grain Refiner Rod Addition Points by Metallurg Aluminium*. Juli 15, 2008. <http://www.azom.com>
35. (n.d). (n.d). *Titanium-Boron (Ti-B) Phase Diagram*. Desember 18, 2009. <http://www.calphad.com/titanium-boron.html>
36. (n.d). 2004. *Aluminum-Boron Phase Equilibria Diagram*. USA. Stephenson & Associates
37. Braun, J & Ellner, M. 2001. *Phase Equilibria Investigations on the Aluminum-Rich Part of the Binary System Ti-Al*. Jerman. Max-Planck-Institute fur Metalloforschung
38. Birol, Y. *In situ synthesis of Al-TiCp composites by reacting K2TiF6 and particulate graphite in molten aluminium*. Turkey. Elsevier

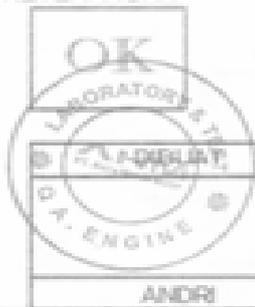
## LAMPIRAN

## Lampiran 1

 PT Astra Honda Motor Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Department	
LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA	
NAMA PART : SAMPLE MELTING	TGL PENGUJIAN : 27-Feb-09 10:03:47
NO PART / TYPE : SAMPLE AJI (LPDC 27/02/09)	STANDARD UJI : JIS H 5202
MATERIAL : AC4B (2008)	MESIN UJI : SPECTRO SHIMADZHU
SEKSI / SUB CON : LPDC	PETERANGAN : SHIFT 1
TEST KE : 1	
<b>MELTING AC4B</b>	
<u>ACTUAL</u>	<u>STANDARD QA AHM</u>
SI : 8.883	SI : 7.00 - 10.00
CU : 2.482	CU : 2.00 - 4.00
MG : 0.278	MG : 0.50 MAX
FE : 0.851	FE : 0.80 MAX
MN : 0.257	MN : 0.50 MAX
NI : 0.072	NI : 0.35 MAX
TI : 0.083	TI : 0.30 MAX
PB : 0.078	PB : 0.20 MAX
SN : 0.048	SN : 0.10 MAX
CR : 0.034	CR : 0.20 MAX
ZN : 0.876	ZN : 1.00 MAX
SR : 0.021	SR : -
NOTE	KETERANGAN
- HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG	<input type="checkbox"/> OK
- LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG	DIBUAT
	DIDISI

Universitas Indonesia

## Lampiran 2

 PT Astra Honda Motor Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Department			
LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA			
NAMA PART	: SAMPLE MELTING	TGL PENGUJIAN	: 27-Feb-09 16:49:52
NO PART / TYPE	: SAMPLE (LPDC AZI 27/02/09 3)	STANDARD UJI	: HES C-101-99
MATERIAL	: AC4B (2008)	MESIN UJI	: SPECTRO SHIMADZHU
SEKSI / SUB CON	: LPDC	KETERANGAN	: SHIFT 3
TEST KE	: 1		
METODE UJI Etc.			
ACTUAL		STANDARD DA AHM	
SI	: 8.904	SI	: 7.00 - 10.20
CU	: 2.239	CU	: 2.00 - 4.00
MG	: 0.244	MG	: 0.50 MAX
FE	: 0.739	FE	: 1.00 MAX
MN	: 0.252	MN	: 1.00 MAX
NI	: 0.059	NI	: 0.50 MAX
TI	: 0.063	TI	: 0.35 MAX
PB	: 0.059	PB	: 0.20 MAX
SN	: 0.029	SN	: 0.20 MAX
CR	: 0.031	CR	: 0.19 MAX
CA	: 0.000	CA	: 0.20 MAX
SR	: 0.020		
NOTE - HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG - LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG		KETERANGAN 	

## Lampiran 3

Universitas Indonesia

 PT Astra Honda Motor Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Department																													
LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA																													
NAMA PART	: SAMPLE MELTING	TGL.PENGUJIAN	: 18-Feb-09 8:07:06																										
NO PART / TYPE	: SAMPLЕНИKE CTK 2:( LPDC 17-02-2009	STANDARD UJI	: JIS H 5202																										
MATERIAL	: AC4B (2008)	MESIN UJI	: SPECTRO SHIMADZHU																										
SEKSI / SUB CON	: LPDC	KETERANGAN	: SHIFT 1																										
TEST KE	: 1																												
Nike kompor <div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">MELTING AC4B</div> <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">ACTUAL</th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">STANDARD QA AHM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SI : 8.849</td> <td>SI : 7.00 ~ 10.00</td> </tr> <tr> <td>CU : 2.800</td> <td>CU : 2.00 ~ 4.00</td> </tr> <tr> <td>MG : 0.264</td> <td>MG : 0.50 MAX</td> </tr> <tr> <td>FE : 0.812</td> <td>FE : 0.80 MAX</td> </tr> <tr> <td>MN : 0.323</td> <td>MN : 0.50 MAX</td> </tr> <tr> <td>NI : 0.062</td> <td>NI : 0.35 MAX</td> </tr> <tr> <td>TI : 0.108</td> <td>TI : 0.20 MAX</td> </tr> <tr> <td>PB : 0.079</td> <td>PB : 0.20 MAX</td> </tr> <tr> <td>SN : 0.049</td> <td>SN : 0.10 MAX</td> </tr> <tr> <td>CR : 0.032</td> <td>CR : 0.20 MAX</td> </tr> <tr> <td>ZN : 0.543</td> <td>ZN : 1.00 MAX</td> </tr> <tr> <td>SR : 0.018</td> <td>SR : -</td> </tr> </tbody> </table>				ACTUAL	STANDARD QA AHM	SI : 8.849	SI : 7.00 ~ 10.00	CU : 2.800	CU : 2.00 ~ 4.00	MG : 0.264	MG : 0.50 MAX	FE : 0.812	FE : 0.80 MAX	MN : 0.323	MN : 0.50 MAX	NI : 0.062	NI : 0.35 MAX	TI : 0.108	TI : 0.20 MAX	PB : 0.079	PB : 0.20 MAX	SN : 0.049	SN : 0.10 MAX	CR : 0.032	CR : 0.20 MAX	ZN : 0.543	ZN : 1.00 MAX	SR : 0.018	SR : -
ACTUAL	STANDARD QA AHM																												
SI : 8.849	SI : 7.00 ~ 10.00																												
CU : 2.800	CU : 2.00 ~ 4.00																												
MG : 0.264	MG : 0.50 MAX																												
FE : 0.812	FE : 0.80 MAX																												
MN : 0.323	MN : 0.50 MAX																												
NI : 0.062	NI : 0.35 MAX																												
TI : 0.108	TI : 0.20 MAX																												
PB : 0.079	PB : 0.20 MAX																												
SN : 0.049	SN : 0.10 MAX																												
CR : 0.032	CR : 0.20 MAX																												
ZN : 0.543	ZN : 1.00 MAX																												
SR : 0.018	SR : -																												
<b>NOTE</b> - HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG - LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG		<b>KETERANGAN</b> <div style="text-align: center;">               DIDI S         </div>																											

Lampiran 4

Universitas Indonesia

 PT Astra Honda Motor Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Departement	
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	
<b>MELTING AC4B</b>	
<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 : 010 MAX
CR : 0.029	CR : 0.20 MAX
ZN : 0.579	ZN : 1.00 MAX
SR : 0.000	SR : -
<u>NOTE</u>	<u>KETERANGAN</u>
- HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">OK</div>
- LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG	
	DIBUAT
	DIDISI

## Lampiran 5

Universitas Indonesia

### Data Uji Fluiditas

Komposisi	Kekerasan di titik ke -					Ave	Std	%Std
	1	2	3	4	5			
Normal	38,5	34,5	36	48	43	40	5,511351921	13,7783798
0,03 Ti + 0,02 Sr	65	65	73	62	63	65,6	4,335896678	6,609598594
0,05 Ti + 0,02 Sr	70	67	62,5	65	58	64,4	4,735504197	7,353267387
0,07 Ti + 0,02 Sr	68	54,3	61	63,5	70	63,36	6,190557325	9,770450324

### Data Uji Kekerasan

#### Tipis

Komposisi	Kekerasan di titik ke -					Average	Std	% Std
	1	2	3	4	5			
Normal	46	44,9	42,6	44	44,3	44,36	1,246194	2,809275
0,03 Ti + 0,02 Sr	49,6	50,4	49,8	50,9	50,6	50,26	0,545894	1,08614
0,05 Ti + 0,02 Sr	51,2	50,3	49,4	51,9	53,9	51,34	1,7126	3,335801
0,07 Ti + 0,02 Sr	52	50,1	52,9	52,4	52,6	52	1,111306	2,137126

#### Tebal

Komposisi	Kekerasan di titik ke -					Average	Std	% Std
	1	2	3	4	5			
Normal	42,8	44,1	44,9	43	44	43,76	0,861974	1,969777
0,03 Ti + 0,02 Sr	48,4	48,7	48,8	47	50,1	48,6	1,106797	2,27736
0,05 Ti + 0,02 Sr	49,9	49,9	47,8	49,4	48,5	49,1	0,924662	1,883222
0,07 Ti + 0,02 Sr	53	51,4	49,3	51,2	49,6	50,9	1,5	2,946955

### Data Uji Tarik

#### UTS

Komposisi	Sample ke-			Ave	Std	%Std
	1	2	3			
Normal	227,791	226,765	215,431	223,329	6,85908	3,071289
0,03 wt% Ti + 0,02 wt% Sr	224,242	256,282	213,187	231,237	22,38286	9,679617
0,05 wt% Ti + 0,02 wt% Sr	270,403	237,309	223,442	243,718	24,12758	9,899796
0,07 wt% Ti + 0,02 wt% Sr	250,162	253,054	250,099	251,105	1,688177	0,672299

## Lampiran 6

Universitas Indonesia

## Elongasi

Komposisi	Sample ke-			Ave	Std	%Std
	1	2	3			
Normal	2,18	2,26	1,66	2,033333	0,325781	16,02202
0,03 wt% Ti + 0,02 wt% Sr	1,64	2,52	2,28	2,146667	0,454899	21,19096
0,05 wt% Ti + 0,02 wt% Sr	2,38	2,26	2,26	2,3	0,069282	3,012262
0,07 wt% Ti + 0,02 wt% Sr	0	3,16	0,4	1,186667	1,72062	144,9961

## DAS

Komposisi normal					
Sampel	Panjang DAS dari dendrit ke - (mm)				
	I	II	III	IV	V
A	4	3,5	3,5	3,5	4
	4,5	3,5	3	3,5	3
	3	3	4	4	2,5
	3	3,5	4,5	4	4
	3	3	4	3,5	3
	3	3	3,5	3	3
Rata-rata	3,4166667	3,25	3,75	3,5833333	3,25
B	4	4,5	4	4	4
	4	4	3,5	5	5
	3,5	4,5	3,5	4	5
	3	4	4,5	4	4,5
	3	4	3,5	3,5	4
	4	4	5	5	4,5
Rata-rata	3,5833333	4,1666667	4	4,25	4,5

Tipis Komposisi 1	DAS Ke-				
	1	2	3	4	5
1	2	2,5	2	2	2,5
2	2	2	4	2	3
3	3	2	1,5	2,5	2,5
4	2	3	2	3	2
5	2	2,5	4	2	1,5
6	1	1	2	1,5	1
Average	2	2,166667	2,583333	2,166667	2,083333
Nilai DAS	15,51724	16,81034	20,0431	16,81034	16,16379

## Lampiran 7

Tebal Komposisi 1	DAS Ke-				
	1	2	3	4	5
1	5	3,5	4	4	4
2	3	3	4	5	3,5
3	5	4	3,5	4	4
4	5	3	2,5	5	4
5	4	4	3	5	4,5
6	3	2,5	2,5	3	4,5
Average	4,166667	3,333333	3,25	4,333333	4,083333
Nilai DAS	32,32759	25,86207	25,21552	33,62069	31,68103

Tipis Komposisi 2	DAS Ke-				
	1	2	3	4	5
1	2	2	2	1,5	2
2	3	1,5	2	1,5	2
3	2	2	2	2	2
4	3,5	1,5	1,5	2	2
5	2	1,5	1,5	1	1
6	2	1	2	1,5	1,5
Average	2,416667	1,583333	1,833333	1,583333	1,75
Nilai DAS	18,75	12,28448	14,22414	12,28448	13,57759

Tebal Komposisi 2	DAS Ke-				
	1	2	3	4	5
1	4	3,5	3,5	3,5	4
2	3	4	3,5	4	3
3	3	3	3	3,5	4
4	3	4	3	4	5
5	4	4,5	3	3,5	5
6	3	4	3	3,5	4
Average	3,333333	3,833333	3,166667	3,666667	4,166667
Nilai DAS	25,86207	29,74138	24,56897	28,44828	32,32759

## Lampiran 8

Universitas Indonesia



Edition 01/05      Technical Data Sheet

## COVERAL\* GR 2815

**Sodium Free Granulated Flux for Grain Refining of Aluminium and Aluminium Alloys**

<b>General description</b>	COVERAL GR 2815 is a sodium free grain refining granulated flux suitable for Aluminium and Aluminium alloys including those containing alloying amounts of magnesium. It is a universal grain refiner based on titanium and boron. COVERAL GR 2815 when plunged into the melt reacts to form titanium dioxide and aluminium boride. These finely dispersed species are highly efficient nuclei that promote a fine equiaxed grain growth during solidification. This grain structure ensures excellent feeding characteristics leading to optimum mechanical properties in the casting. This improvement in feeding properties is beneficial in sand casting application but is of particular benefit in gravity die casting where solidification rates are usually quite high.
<b>Advantages</b>	COVERAL GR 2815 is sodium free. COVERAL GR 2815 is dust free in use and emits low fume during application. Granulated fluxes can be used at reduced application rates compared to powder fluxes.
<b>Application</b>	Any dross present on the melt surface should be carefully removed. The required amount of COVERAL GR 2815 is then placed on the melt surface and plunged to the bottom of the melt using a clean and preheated plunging tool and stirred vigorously into the melt. After the reaction is complete the melt surface should be drossed off using a suitable skimming tool.  Any subsequent degassing by tablets or by FDU impeller treatment can be done without any detrimental effects to the grain refining efficiency.
<b>Application temperature</b>	700 °C and higher.
<b>Addition rate</b>	0.05 - 0.15 % of the metal weight, depending on alloy type.
<b>Packing</b>	25 Kg polyethylene lined multi-ply paper sacks.
<b>Storage</b>	Like all fluxes, COVERAL GR 2815 should be stored in a dry place. Close opened packages or storage bins securely after use.
<b>Labelling</b>	Xn Harmful.
<b>Health and safety</b>	For safety reasons this product must be used only in accordance with the instructions for use contained in this Technical Data Sheet. The Material Safety Data Sheet for this product is available on request.
<b>Further remarks</b>	The data given in this leaflet are only guide values and do not represent a specification. All rights to make technical changes to improve the product are reserved.

---

FOSECO SAS, 12 Av. Marie Ampère, Champs-Sur-Mame, 77437 Mame la Vallée Cedex 02  
Tel. +33 0164735585 · Fax +33 0164735586 · www.foseco.fr

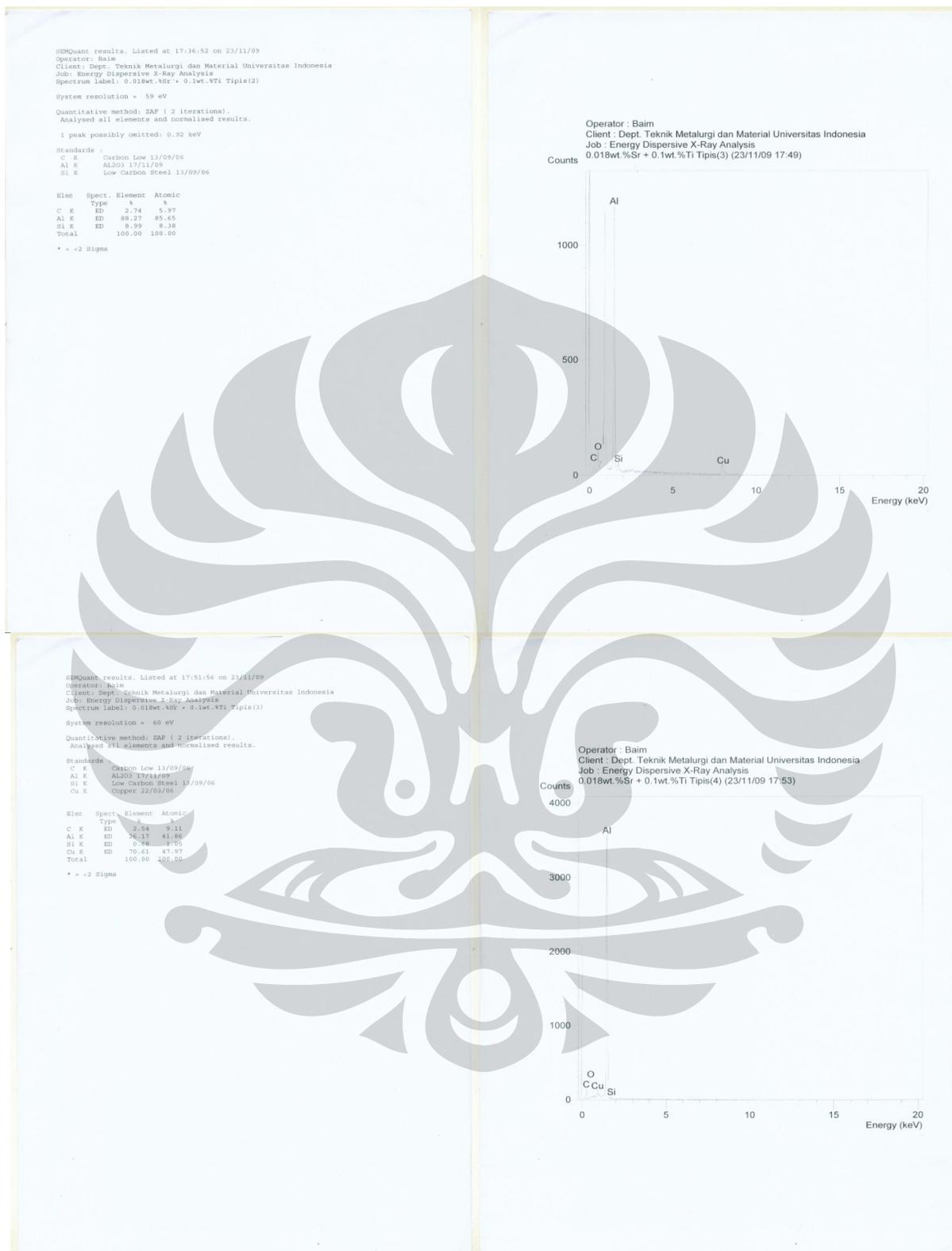
## Lampiran 9

Universitas Indonesia



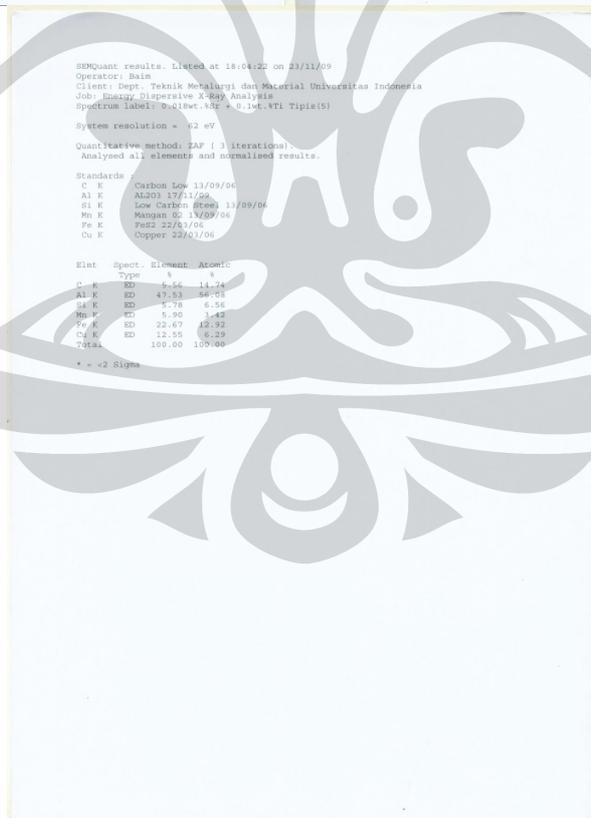
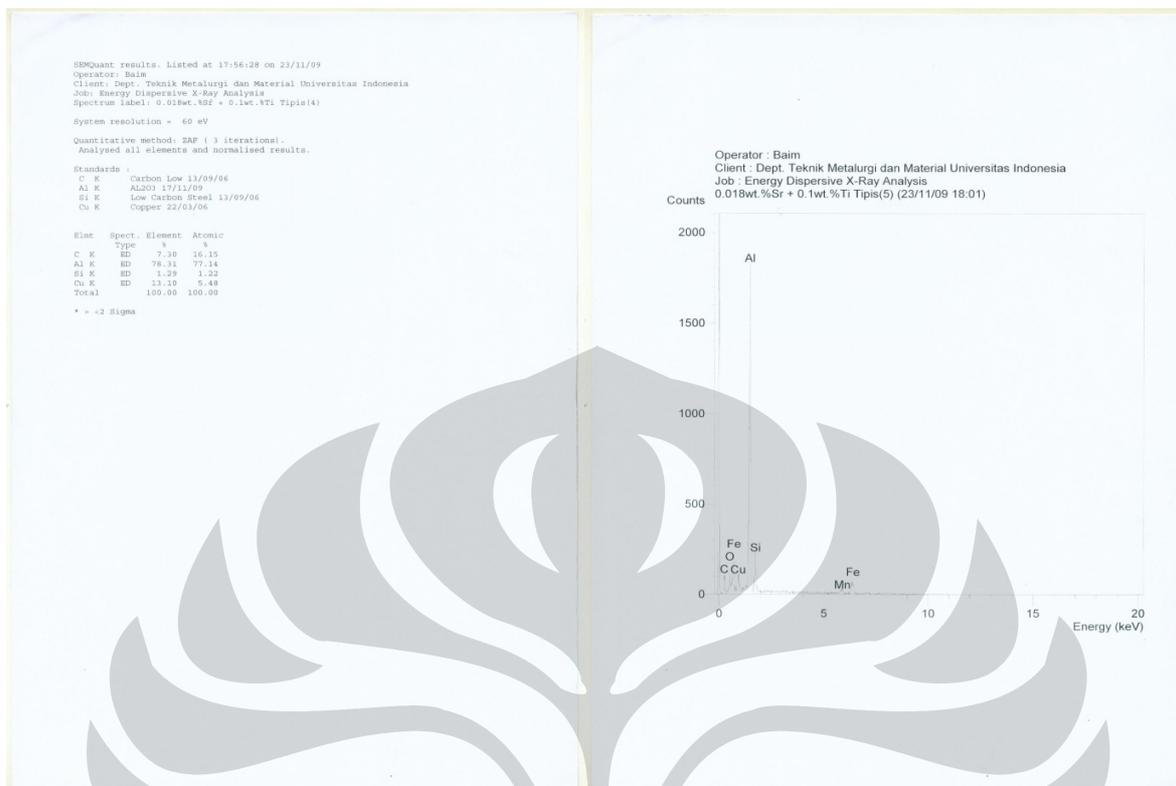
Lampiran 10

Universitas Indonesia



**Lampiran 11**

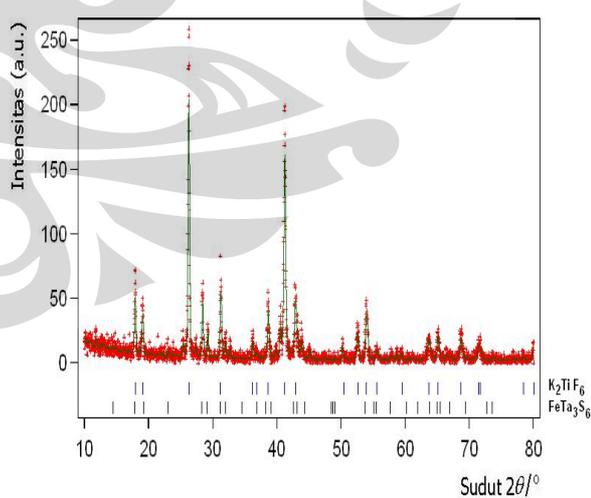
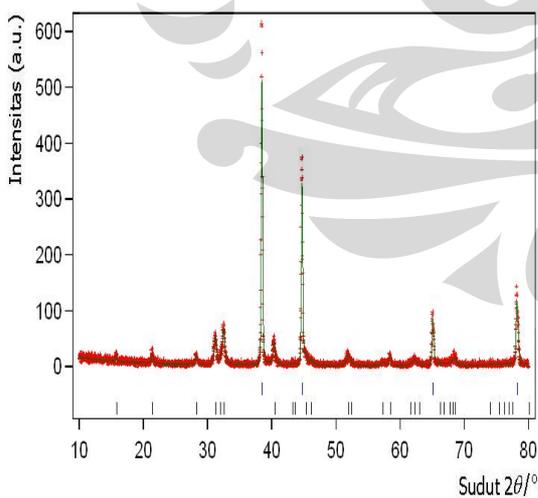
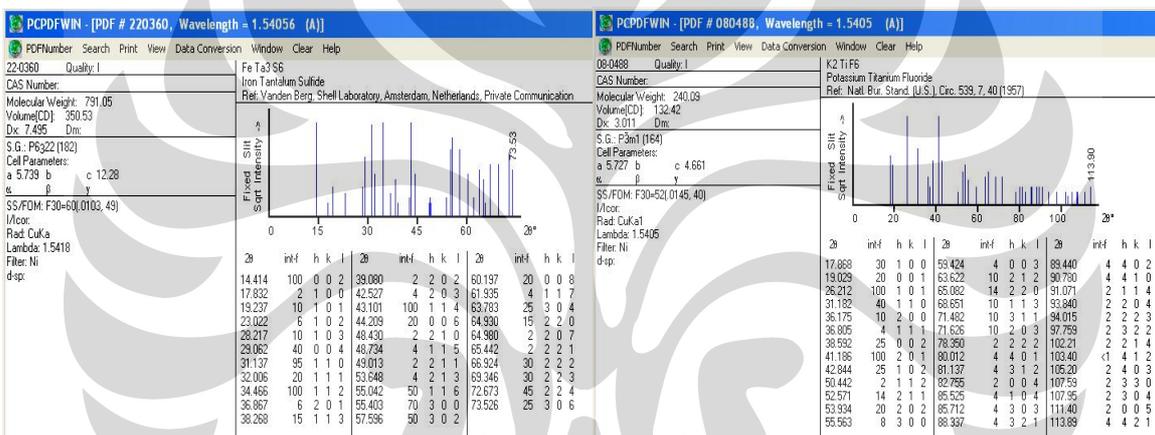
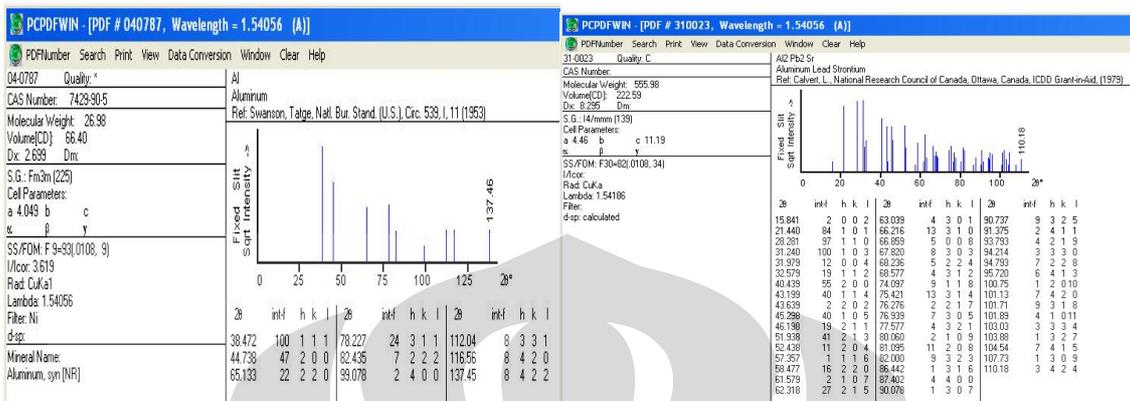
**Universitas Indonesia**



Lampiran 12

Universitas Indonesia

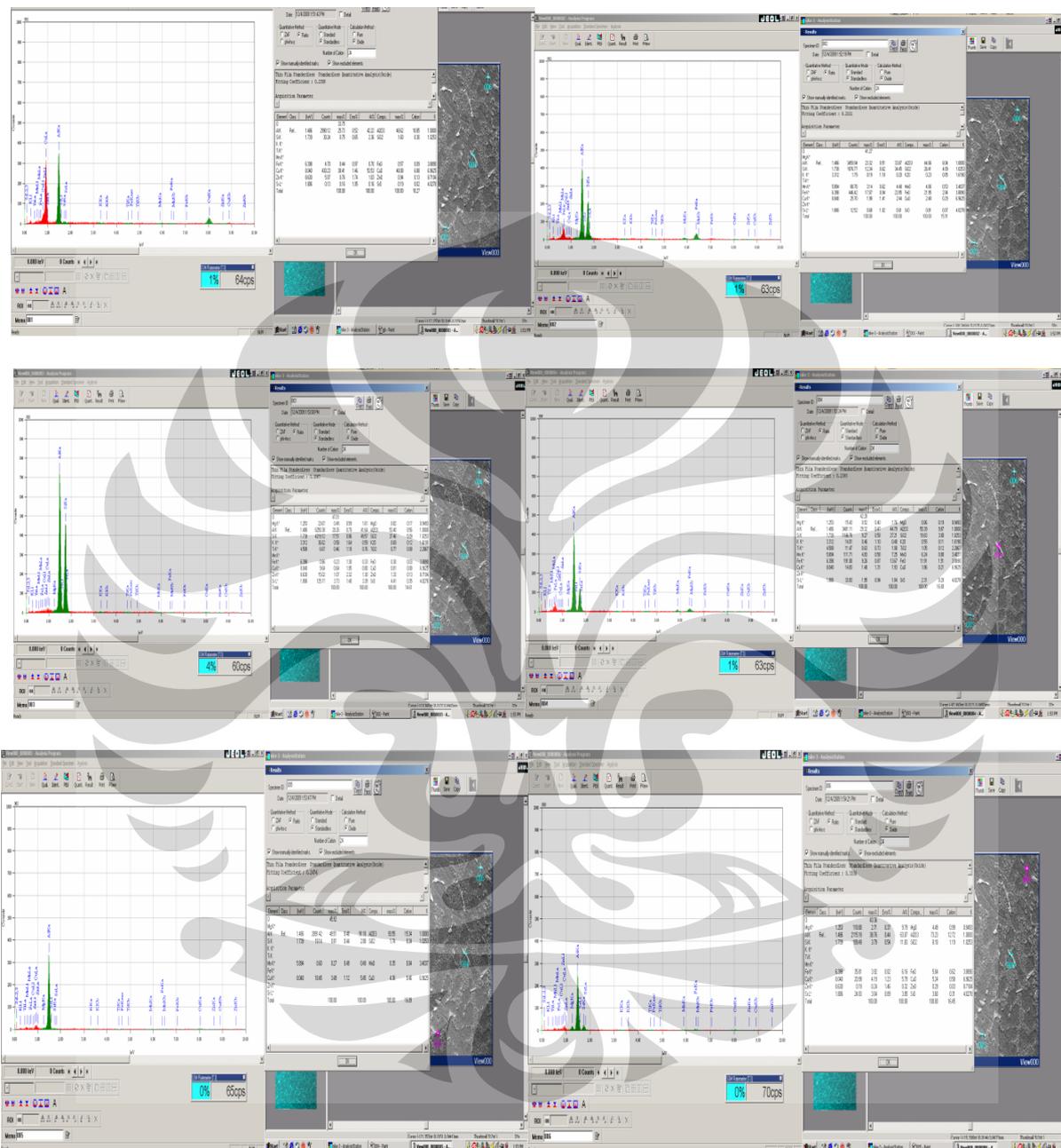
Hasil XRD coveral GR-2815 dan Al-10Sr



Lampiran 13

Universitas Indonesia

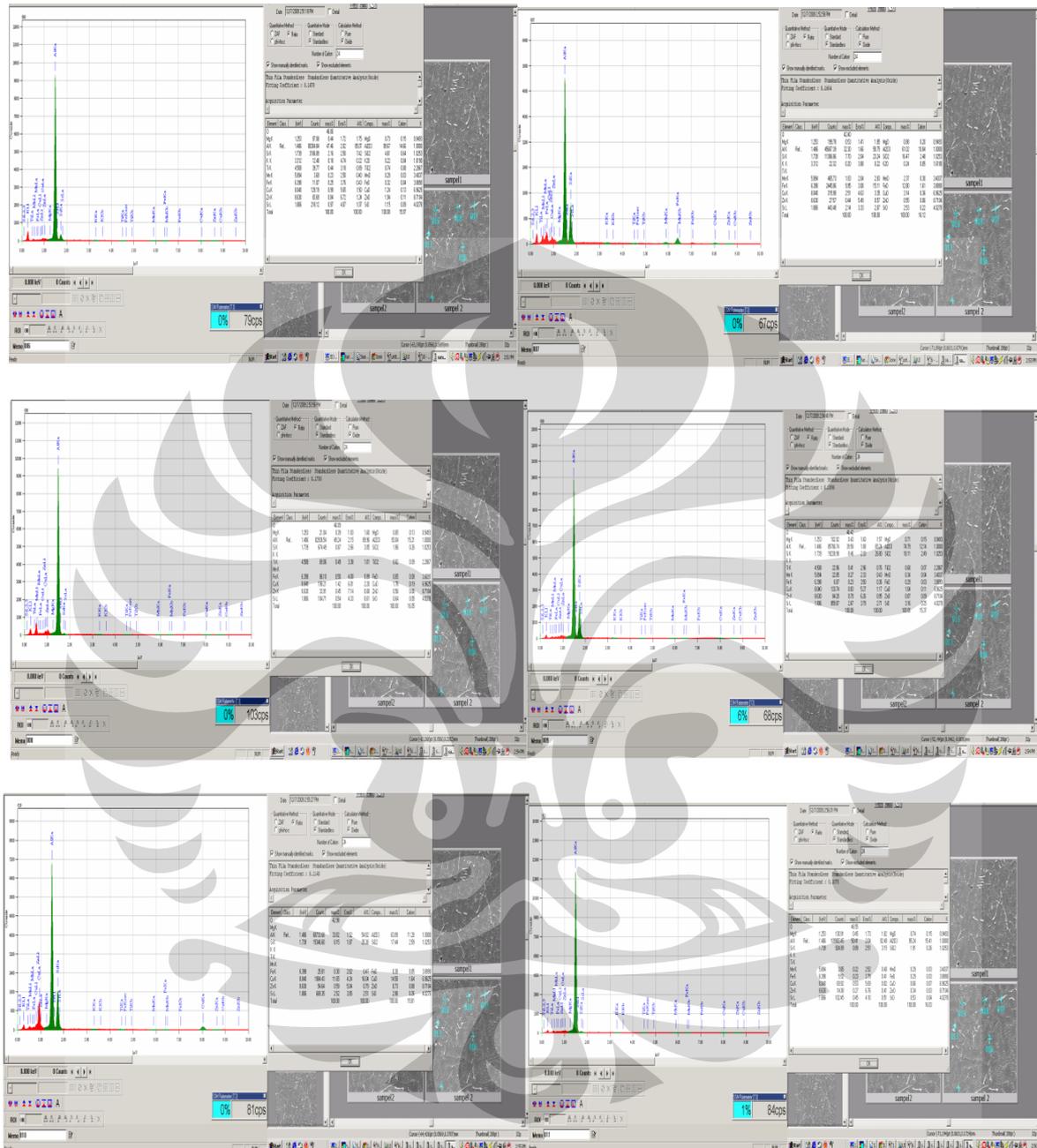
Data SEM komposisi 0.108 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr



Lampiran 14

Universitas Indonesia

Data SEM komposisi 0.63 wt. % Ti dan 0.02 wt. % Sr





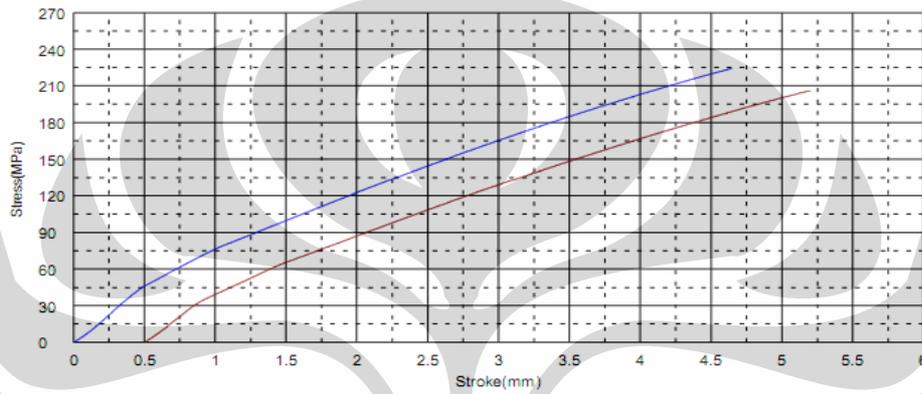
Lampiran 16

**TENSILE STRENGTH  
AZI 1**

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0100	50.0000
1 - 2	14.0500	50.0000

Name	Max_Force	Max_Stress	ELONGATION
Units	N	MPa	%
1 - 1	34568.8	224.242	0.00000
1 - 2	31942.2	206.026	1.64000



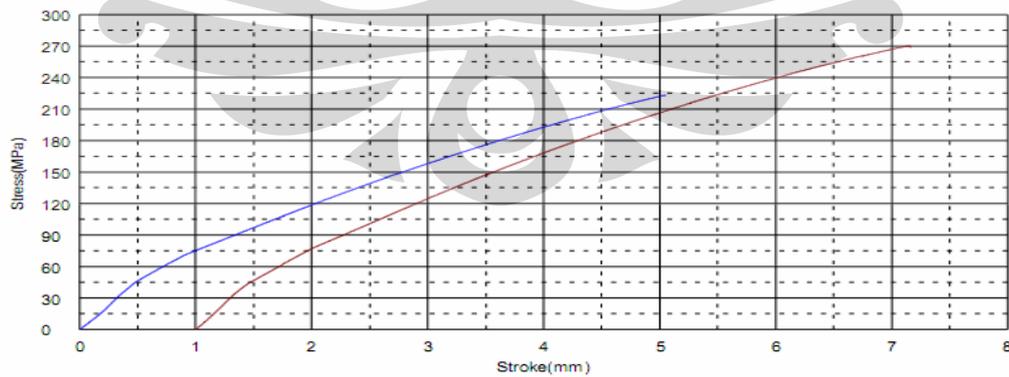
Comment  
10-11-2009  
AC 4B

**TENSILE STRENGTH  
AZI 2**

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0300	50.0000
1 - 2	13.9000	50.0000

Name	Max_Force	Max_Stress	ELONGATION
Units	N	MPa	%
1 - 1	34501.6	223.169	2.26000
1 - 2	41032.8	270.403	2.26000



Comment  
10-11-2009  
AC 4B

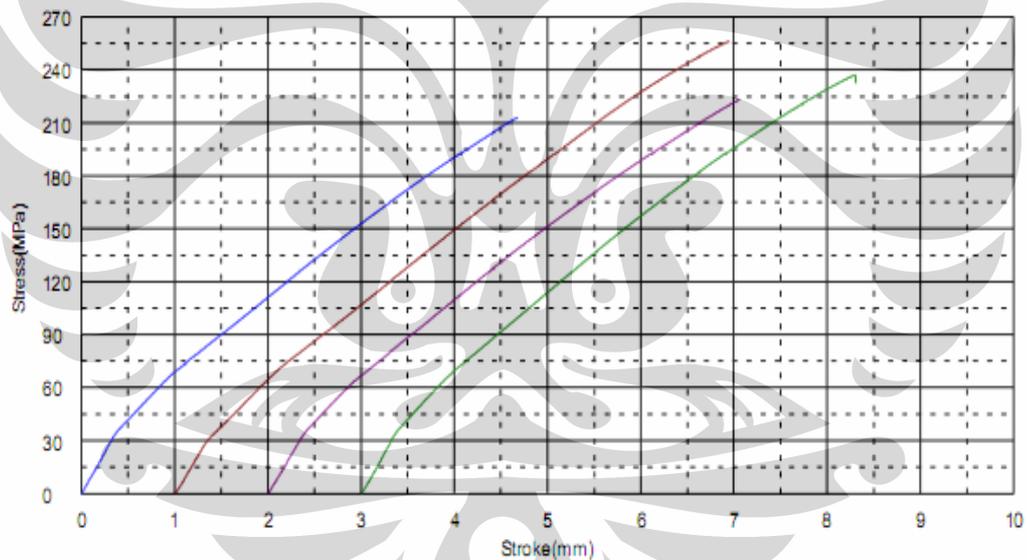
## Lampiran 17

## TENSILE STRENGTH AZI

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
AZI 1 - 1	13.8700	50.0000
AZI 1 - 2	14.1000	50.0000
AZI 2 - 1	14.0100	50.0000
AZI 2 - 2	14.1700	50.0000

Name	Max_Force	Max_Stress	ELONGATION
Units	N	MPa	%
AZI 1 - 1	32210.9	213.187	2.52000
AZI 1 - 2	40017.2	256.282	2.28000
AZI 2 - 1	34445.3	223.442	1.18000
AZI 2 - 2	37423.4	237.309	2.38000



Comment  
13-11-2009  
AC 4B

## Lampiran 18

Lampiran *sheets trial* komponen *cylinder head* hasil LPDC di PT AHM disertakan dalam bentuk *soft copy* dalam CD skripsi

