



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI 0.1 wt. % Ti  
DAN 0.003, 0.018, DAN 0.025 wt. % Sr TERHADAP  
KARAKTERISTIK PADUAN AC4B  
HASIL *LOW PRESSURE DIE CASTING***

**SKRIPSI**

**NIKE LESTARI  
0606075113**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH KOMBINASI KOMPOSISI 0.1 wt. % Ti  
DAN 0.003, 0.018, DAN 0.025 wt. % Sr TERHADAP  
KARAKTERISTIK PADUAN AC4B  
HASIL *LOW PRESSURE DIE CASTING***

**SKRIPSI**

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

**NIKE LESTARI  
0606075113**

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

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Nike Lestari**

**NPM : 0606075113**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 29 Desember 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Nike Lestari  
NPM : 0606075113  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi 0.1 wt. %  
Ti dan 0.003, 0.018, dan 0.025 wt. % Sr terhadap  
Karakteristik Paduan AC4B Hasil *Low Pressure  
Die Casting*

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

### DEWAN PENGUJI

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

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

Penguji 2 : Ir. Rusman Kosasih (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 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 dan pembimbing akademis yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- 2) pihak PT. AHM ; Bapak Andika P. Hutama, Bapak Hartono, Bapak Januar Ashari, Bapak Rizal, Bapak Asep dan Bapak Hendra yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data-data yang saya perlukan
- 3) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan baik moral maupun material;
- 4) Bangun Wijayanto (metalurgi 2006) atas segala bantuan dan dukungan yang diberikan kepada saya dalam menyelesaikan skripsi ini;
- 5) rekan TA, Alfarishi, Oktafinaldo dan M. Azi Fallah atas segala kerja sama, diskusi dan masukannya untuk saya
- 6) 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 metalurgi dan material ke depan.

Depok, 29 Desember 2009

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

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

Nama : Nike Lestari  
NPM : 0606075113  
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 0.1wt. % Ti dan 0.003, 0.018, dan 0.025 wt. % Sr terhadap Karakteristik Paduan AC4B Hasil *Low Pressure Die Casting*

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 : 29 Desember 2009  
Yang menyatakan

(Nike Lestari)

## ABSTRAK

Nama : Nike Lestari  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Studi Pengaruh Kombinasi Komposisi Ti 0.1 wt. % dan 0.003, 0.018, dan 0.025 wt. % Sr terhadap Karakteristik Paduan AC4B Hasil *Low Pressure Die Casting*

Paduan aluminium AC4B merupakan salah satu bahan baku pengecoran komponen *cylinder head* pada kendaraan bermotor. Komponen ini dihasilkan dengan metode pengecoran *Low Pressure Die Casting* (LPDC). Namun, masalah yang sering muncul dalam proses pengecoran ini adalah banyaknya kegagalan yang disebabkan oleh adanya cacat seperti bocor, penyusutan, dan *misrun*. Proses rekayasa material berupa modifikasi dan penghalusan butir sering diaplikasikan pada pengecoran aluminium karena mampu meningkatkan kualitas dan menurunkan tingkat kegagalan. Penelitian ini mempelajari pengaruh kombinasi penambahan Ti dan Sr terhadap karakteristik paduan aluminium AC4B.

Proses pengecoran dilakukan dengan menggunakan metode LPDC pada 0.1 wt. % Ti dengan variabel penambahan Sr yaitu 0.003, 0.018, dan 0.025 wt. % Sr untuk menghasilkan komponen *cylinder head* sebagai sampel uji kekerasan, pengamatan struktur mikro dan SEM. Sampel diambil pada bagian tebal dan tipis untuk mengetahui pengaruh dari kecepatan pembekuan. Pengujian tarik dilakukan dengan metode JIS 2201, pengujian kekerasan dengan Rockwell B, pengujian fluiditas dengan metode spiral dan pengujian porositas dengan metode vakum. Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscopy*(SEM)/*Energy Dispersive X-Ray Analysis* (EDAX) untuk identifikasi fasa.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan Ti dan Sr meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik, nilai fluiditas, menurunkan nilai DAS serta meningkatkan derajat modifikasi. Secara keseluruhan nilai tersebut optimum pada 0.1 wt. % Ti dan 0.0018 wt. % Sr yaitu dengan nilai kekerasan 52.48 HRB pada bagian tipis dan 51.30 HRB pada bagian tebal. Nilai kekuatan tarik optimum pada 251.11 MPa, nilai fluiditas pada 63.4 cm dan DAS pada 13.4  $\mu\text{m}$  di bagian tipis dan 27.2 di bagian tebal. Tingkat modifikasi optimum pada kelas E dengan struktur *fibrous*. Jumlah porositas meningkat linier seiring peningkatan komposisi Sr. Selanjutnya terjadi penurunan sifat mekanis pada 0.025 wt. % Sr karena over modifikasi. Tidak ditemukannya interaksi antara Ti dan Sr dalam penelitian ini.

Kata kunci:

Penghalusan butir, modifikasi, titanium, stronsium, AC4B, LPDC

## ABSTARCT

Name : Nike Lestari  
Major : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : Study on combination effect 0.1 wt. % Ti and 0.003, 0.018 and 0.025 wt. % Sr on characteristic of AC4B alloy produced by Low Pressure Die Casting

AC4B aluminum alloy is a commonly used material for cylinder head of motorcycle. This component is produced by low pressure die casting (LPDC) method. However, problems that arise in this casting process are defects such as leaking, shrinkage, and misrun. Modification process and grain refining are often applied in aluminum casting because they can improve its quality and reduce the failure rate. This research studied the combination effects of Ti and Sr additions on the characteristics of AC4B aluminum alloy.

Low pressure die casting method was conducted to produced cylinder head with 0.1 wt. % Ti and the variables of Sr of 0.003, 0.018, and 0.025 wt. %. Samples were taken for hardness test, microstructure observation and SEM, from the thick and thin sections of the cylinder head to determine the effect of solidification rate. Tensile test was carried out in accordance with JIS 2201 method, while hardness test was performed by Rockwell B method. Fluidity test was conducted by spiral method and vacuum test was used to measure porosity content. Microstructure was observed by optical microscope and *Scanning Electron Microscopy (SEM)/Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDAX)* for phase identification.

The results show that the addition of Ti and Sr increased hardness, tensile strength and fluidity, while reduced DAS (dendrite of spacing). Degree of modification was found increased by addition of Ti and Sr. The optimum properties was obtained at 0.1 wt. % Ti and 0.0018 wt. % Sr, of which hardness at thin and thick sections are 52.48 and 51.30 HRB, respectively. Optimum properties were tensile strength of 251.11 MPa, fluidity of 63.4 cm, DAS of 13.4  $\mu\text{m}$  of thick section and 27.2  $\mu\text{m}$  of thin section, with the level of modification fell in class E with fibrous structure. Number of porosity linearly raised with increasing Sr composition. However, the mechanical properties decrease at the content of 0.025 wt. % Sr because of over modification. There is no interaction between Ti and Sr was found.

Key words:

Grain refining, modification, titanium, strontium, LPDC, AC4B



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
DAFTAR SINGKATAN .....	xvi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Penelitian .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian .....	3
1.3.1 Material .....	3
1.3.2 Parameter Penelitian .....	3
1.3.3 Tempat Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Cylinder Head</i> .....	5
2.2 Paduan Aluminium .....	6
2.2.1 Paduan Aluminium-Silikon .....	6
2.2.2 Paduan Aluminium AC4B .....	8
2.2.3 Pengaruh Unsur dalam Paduan Aluminium Tuang .....	10
1.2.3 Proses pembekuan .....	14
2.3 Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Sifat Mekanis .....	15
2.3.1 Fasa Intermetalik .....	16
2.3.2 <i>Dendrite Arm Spacing (DAS)</i> .....	17
2.4 Penghalusan Butir .....	19

2.4.1 Mekanisme Penghalusan Butir dengan Ti .....	20
2.4.2 Pengaruh Penambahan <i>Grain Refiner</i> pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B .....	23
2.5 Modifikasi Eutektik .....	26
2.5.1 Modifikasi pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B .....	26
2.5.2 Pengaruh Modifikasi pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B .....	30
2.5.3 <i>Modifier</i> Stronsium .....	38
2.6 Penggabungan Penghalus Butir AlTiB Dan <i>Modifier</i> Sr .....	40
2.6.1 Interaksi antara penghalus butir dan <i>modifier</i> .....	40
2.6.2 Pengaruh Penggabungan Penghalus Butir dan <i>Modifier</i> .....	42
2.7 <i>Low Pressure Die Casting</i> .....	46
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	50
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	50
3.2 Bahan Dan Peralatan .....	51
3.2.1 Bahan .....	51
3.2.2 Peralatan .....	51
3.3 Prosedur Penelitian .....	53
3.3.1 Proses pengecoran .....	53
3.3.2 Proses preparasi sampel .....	62
3.3.2 Proses Pengujian .....	64
3.3.2.1 Pengujian XRD .....	64
3.3.2.2 Pengujian Komposisi Kimia .....	65
3.3.2.3 Pengujian Porositas .....	66
3.3.2.4 Pengujian Fluiditas .....	67
3.3.2.5 Pengujian Kebocoran .....	68
3.3.2.6 Pengujian Tarik .....	69
3.3.2.7 Pengujian Kekerasan .....	70
3.3.2.8 Pengamatan Struktur Mikro .....	71
3.3.2.9 Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive X-Ray Analysis</i> (EDAX) .....	73
<b>BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN</b> .....	74
4.1 Analisis Komposisi Paduan Aluminium AC4B <i>As-Cast</i> .....	74
4.2 Karakterisasi Penghalus Butir <i>Coveral GR – 2815® Flux</i> Dan <i>Master Alloy Al-10 Sr</i> .....	76

4.3 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Karakteristik Paduan Aluminium AC4B .....	81
4.3.1 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Kekerasan Paduan Aluminium AC4B .....	81
4.3.2 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Kekuatan Tarik Paduan Aluminium AC4B .....	83
4.3.3 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Kandungan Porositas Paduan Aluminium AC4B .....	86
4.3.4 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Karakteristik Fluiditas Paduan Aluminium AC4B .....	90
4.3.6 Perubahan Struktur Mikro Paduan Aluminium AC4B Setelah Penambahan 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr .....	92
4.4 Pengamatan Struktur Mikro dengan SEM Dan EDAX.....	98
4.5 Pengaruh Penambahan Ti Dan Sr Terhadap Kegagalan Komponen <i>Cylinder Head</i> Hasil LPDC .....	103
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	107
5.1 Kesimpulan.....	107
5.2 Saran.....	108
<b>DAFTAR ACUAN</b> .....	109

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Komponen <i>cylinder head</i> pada sepeda motor.....	5
Gambar 2. 2	Diagram fasa Al-Si.....	7
Gambar 2. 3	Struktur mikro aluminium-silikon komposisi, (a) hipoeutektik, (b) eutektik, (c) hipereutektik .....	8
Gambar 2. 4	Grafik kelarutan hidrogen pada aluminium .....	13
Gambar 2. 5	Diagram fasa Al-Si dan struktur mikro yang terbentuk berbeda pada komposisi silikon yang berbeda. ....	14
Gambar 2. 6	Pembekuan Aluminium-silikon hipoeutektik.....	15
Gambar 2. 7	Fasa intermetalik pada paduan aluminium .....	16
Gambar 2. 9	Pengaruh laju pembekuan terhadap <i>dendrit arm spacing</i> . ....	18
Gambar 2. 8	(a) Struktur mikro Al-Si hipoeutektik menunjukkan DAS, (b) sketsa geometris sel dendrit.....	18
Gambar 2. 10	Pengaruh <i>dendrit arm spacing</i> terhadap kekuatan .....	19
Gambar 2. 11	Zona <i>undercooled</i> mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit .....	21
Gambar 2. 12	<i>Fading</i> penghalus butir jenis AlTiB pada paduan aluminium .....	23
Gambar 2. 13	Perbandingan <i>hot tensile strength</i> sampel <i>grain refined</i> dan <i>non-grain refined</i> pada paduan Al-0.5%Mg-0.4%Si.....	24
Gambar 2. 14	Perbedaan ukuran dendrit yang mempengaruhi nilai fraksi padatan ..	25
Gambar 2. 15	(a)(b)(c) Ilustrasi <i>shrinkage porosity</i> pada dendrit aluminium, (d) struktur mikro dari <i>interdendritic porosity</i> .....	25
Gambar 2. 16	Pertumbuhan dan pembentukan silikon <i>acicular</i> (a) pertumbuhan silikon, (b) silikon <i>acicular</i> .....	27
Gambar 2. 17	Adsorpsi atom impurities pada tahapan pertumbuhan kristal silikon yang menyebabkan terjadinya mekanisme <i>twinning</i> .....	28
Gambar 2. 18	Silikon kasar akibat terjadinya overmodifikasi oleh stronsium (a) mikroskop optik (x400) (b) SEM (x2000).....	29
Gambar 2. 19	Tingkat pengaruh modifikasi, (A) tidak termodifikasi ; (F) termodifikasi sempurna.....	32
Gambar 2. 20	Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi. ...	34
Gambar 2. 21	Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi. ...	35
Gambar 2. 22	Perbandingan tingkat porositas.....	36
Gambar 2. 23	Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi. ....	37
Gambar 2. 24	<i>Master alloy</i> stronsium yang tersedia secara komersial.....	39
Gambar 2. 25	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. ....	43
Gambar 2. 26	Pengaruh penambahan penghalus butir dan <i>modifier</i> terhadap ketahanan aus paduan Al-7Si .....	45
Gambar 2. 27	Pengaruh penambahan penghalus butir dan <i>modifier</i> terhadap kekuatan tarik paduan Al-7Si.....	45
Gambar 2. 28	Konstruksi mesin <i>low pressure die casting</i> .....	47
Gambar 2. 29	Porositas pada aluminium.....	48
Gambar 2. 30	Dua jenis <i>shrinkage</i> .....	48

Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	50
Gambar 3. 2 Material umpan (a) ingot AC4B , (b) <i>scrap</i> AC4B.....	53
Gambar 3. 3 Dapur peleburan FCECO. ....	53
Gambar 3. 4 <i>Gas bubble flotation</i> .....	54
Gambar 3. 5 Elemen yang akan ditambahkan (a) <i>master alloy</i> Al-10Sr , (b) penghalus butir <i>flux Coveral GR 2815®</i> . ....	55
Gambar 3. 6 (a) Penempatan <i>Coveral GR 2815®</i> dan <i>master alloy</i> Al-10Sr di dalam ciduk, (b) pemasukan ke dalam <i>holding furnace</i> , (c) operator melakukan pengadukan.....	60
Gambar 3. 7 Proses GBF-manual dengan menggunakan <i>lance</i> .....	60
Gambar 3. 8 Pengambilan aluminium cair dari dapur krusibel untuk dituang pada cetakan uji tarik dan uji fluiditas. ....	61
Gambar 3. 9 Mesin <i>low pressure die casting</i> . ....	62
Gambar 3. 10 Daerah pemotongan sampel pada <i>cylinder head</i> .....	63
Gambar 3. 11 (a) Mesin amplas tangan, (b) mesin poles. ....	64
Gambar 3. 12 Geometri pemantulan sinar-X.....	65
Gambar 3. 13 Mesin XRD Philips 2213/20.....	65
Gambar 3. 14 (a) Cetakan uji komposisi, (b) sampel uji komposisi, (c) <i>optical emission spectrometer</i> merk Shimadzu. ....	66
Gambar 3. 15 Alat vakum OSTEK. ....	67
Gambar 3. 16 (a) Proses penuangan aluminium cair ke cetakan uji fluiditas, (b) cetakan uji fluiditas, (c) proses pengeluaran sampel dari cetakan. ....	68
Gambar 3. 17 Mesin uji bocor. ....	69
Gambar 3. 18 Bentuk dan ukuran sampel uji tarik yang disesuaikan dengan standar JIS 2201. ....	69
Gambar 3. 19 (a) Cetakan uji tarik, (b) sampel uji tarik yang baru dikeluarkan dari cetakan. ....	70
Gambar 3. 20 Mesin uji kekerasan Rockwell.....	71
Gambar 3. 21 Mikroskop optik.....	72
Gambar 3. 22 Metode pengukuran DAS. ....	72
Gambar 3. 23 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	73
Gambar 4. 1 Struktur mikro <i>master alloy</i> Al-10 Sr. ....	77
Gambar 4. 2 Diagram fasa Al-Sr. ....	77
Gambar 4. 3 Hasil analisis komposisi <i>master alloy</i> Al-10Sr dengan XRD.....	78
Gambar 4. 4 Struktur mikro dari penghalus butir <i>Coveral GR 2815®</i> .....	79
Gambar 4. 5 Hasil analisis komposisi <i>Coveral GR 2815®</i> dengan XRD . ....	80
Gambar 4. 6 Pengaruh komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr terhadap kekerasan paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan kekerasan pada kondisi tanpa penambahan Ti dan Sr. ....	81
Gambar 4. 7 Pengaruh komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr terhadap nilai paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan nilai elongasi pada kondisi tanpa penambahan Ti dan Sr.....	83
Gambar 4. 8 Sampel uji tarik komposisi 0.1 wt. % Ti dengan penambahan 0.003 wt. % Sr, (a) Perpatahan diluar gauge length , (b) inklusi pada permukaan patahan sampel uji tarik. ....	84
Gambar 4. 9 Pengaruh komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr terhadap kekuatan tarik paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan kekuatan tarik pada kondisi tanpa penambahan Ti dan Sr. ....	85

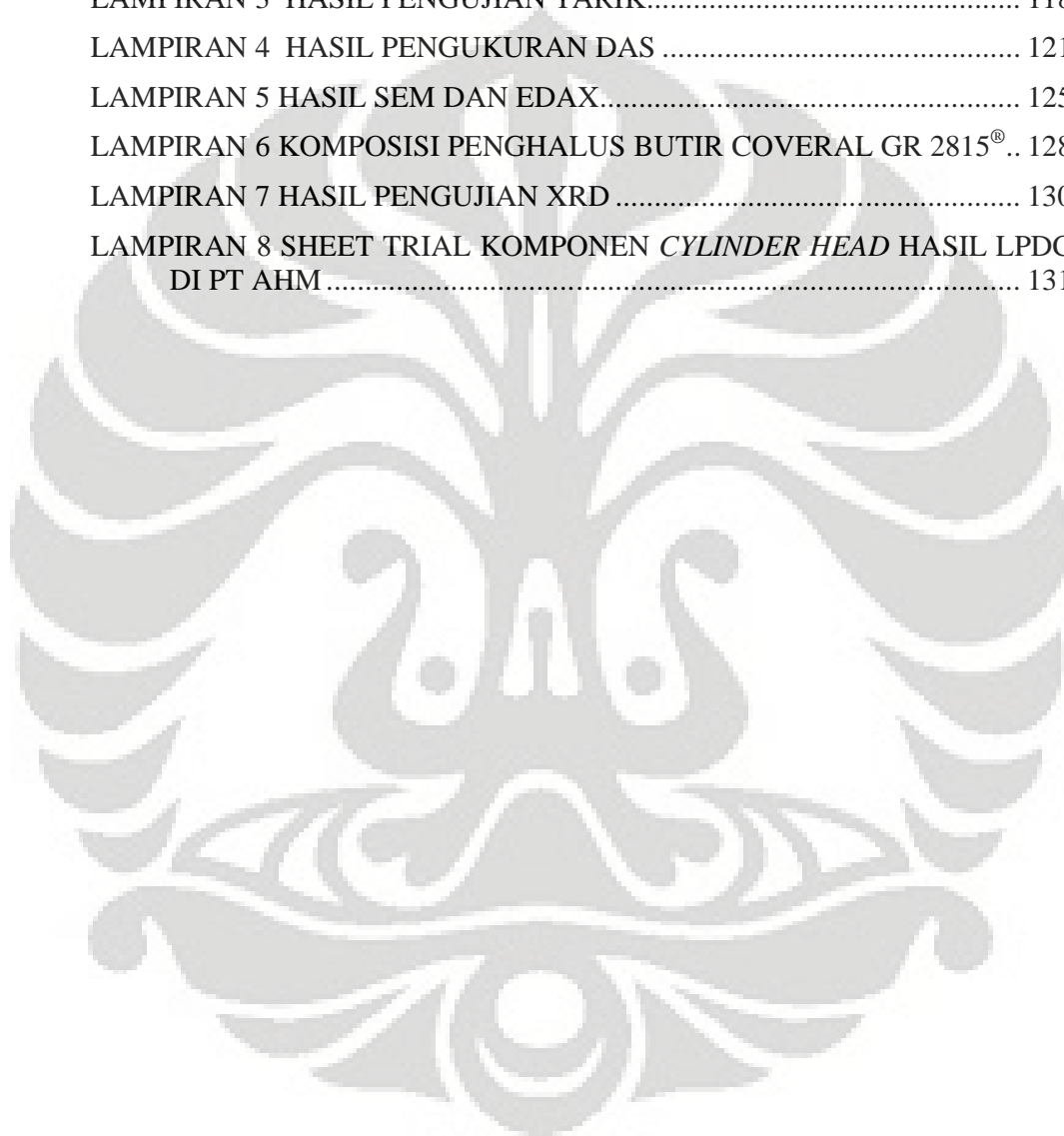
Gambar 4. 10 Penampang potongan sampel uji porositas; (a) tanpa penambahan, (b) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (c) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (d) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr.....	87
Gambar 4. 11 Perbandingan morfologi porositas mikro pada sampel fluiditas ; (a) tanpa penambahan, (b) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (c) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (d) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr.....	89
Gambar 4. 12 Perubahan komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr terhadap karakteristik fluiditas paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan tanpa penambahan Ti dan Sr.....	90
Gambar 4. 13 Perbandingan visual fluiditas,(a) komposisi tanpa penambahan (0 wt. % Ti, 0 wt. % Sr), (b) 0.1 wt.% Ti + 0.003 wt.% Sr, (c) 0.1 wt.% Ti + 0.018 wt.% Sr, (d) 0.1 wt.% Ti + 0.025 wt.% Sr.....	92
Gambar 4. 14 Perubahan struktur mikro pada paduan aluminium AC4B setelah ditambahkan Ti dan Sr , (a-b) tanpa penambahan , (c-d) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (e-f) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (g-h) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr yang memperlihatkan perubahan DAS.....	93
Gambar 4. 15 Perubahan struktur mikro pada paduan aluminium AC4B setelah ditambahkan Ti dan Sr , (a-b) tanpa penambahan , (c-d) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (e-f) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (g-h) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr yang memperlihatkan perubahan morfologi silikon. ....	94
Gambar 4. 16 Perubahan nilai DAS pada paduan aluminium AC4B setelah penambahan 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr dibandingkan dengan tanpa penambahan Ti dan Sr.....	95
Gambar 4. 17 Struktur mikro (SEM) pada paduan aluminium AC4B setelah ditambahkan Ti dan Sr , (a) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (b) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (c) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr.....	100
Gambar 4. 18 Diagram fasa Ti-Sr.....	102
Gambar 4. 19 Perbandingan presentasi kegagalan akibat misrun dan <i>shrinkage</i> pada paduan aluminium AC4B tanpa penambahan dan pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.....	103
Gambar 4. 20 Cacat pada komponen <i>cylinder head</i> tanpa penambahan (a)(b) misrun. ....	104
Gambar 4. 21 Perbandingan persentase kegagalan akibat bocor pada komponen <i>cylinder head</i> tanpa penambahan dan pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.....	105

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan JIS H5202 .....	9
Tabel 2.2 Komposisi kimia paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar <i>Aluminum Association</i> .....	9
Tabel 2.3 Karakteristik yang dimiliki paduan aluminium AC4B .....	9
Tabel 2.4 Teori-teori penting mengenai penghalusan butir .....	20
Tabel 2.5 Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut pada aluminium .....	22
Tabel 2.6 Bentuk dan komposisi modifier stronsium .....	39
Tabel 2.7 Pengaruh penambahan penghalus butir dan/atau <i>modifier</i> terhadap SDAS Al-7Si .....	44
Tabel 4.1 Komposisi aktual paduan aluminium AC4B pada <i>holding furnace</i> sebelum proses LPDC. ....	75
Tabel 4. 2 Nilai GRF pada paduan aluminium AC4B setelah penambahan Ti dan Sr. ....	76
Tabel 4. 3 Hasil analisis komposisi <i>Coveral GR 2815®</i> flux dari XRD. ....	79
Tabel 4.4 Hasil penghitungan fraksi volume porositas dengan metode grid (ASTM E562) .....	88
Tabel 4.5 Perbandingan karakteristik paduan aluminium AC4B terhadap GRF .....	98
Tabel 4. 6 Hasil analisis komposisi paduan aluminium AC4B pada Gambar 4.17 (a) komposisi 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (b) komposisi 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (c) komposisi 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr. ....	101


## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 HASIL PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA .....	113
LAMPIRAN 2 HASIL PENGUJIAN KEKERASAN .....	117
LAMPIRAN 3 HASIL PENGUJIAN TARIK.....	118
LAMPIRAN 4 HASIL PENGUKURAN DAS .....	121
LAMPIRAN 5 HASIL SEM DAN EDAX.....	125
LAMPIRAN 6 KOMPOSISI PENGHALUS BUTIR COVERAL GR 2815®..	128
LAMPIRAN 7 HASIL PENGUJIAN XRD .....	130
LAMPIRAN 8 SHEET TRIAL KOMPONEN <i>CYLINDER HEAD</i> HASIL LPDC DI PT AHM .....	131





## DAFTAR SINGKATAN



<b>AA</b>	<b>Aluminum Association</b>
<b>ASM</b>	<b>American Society for Material</b>
<b>ASTM</b>	<b>American Standard for Testing and Material</b>
<b>DAS</b>	<b>Dendrite arm spacing</b>
<b>EDAX</b>	<b>Energy Dispersed X-Ray Analysis</b>
<b>GBF</b>	<b>Gas Bubbling Floatation</b>
<b>HRB</b>	<b>Hardness Rockwell B</b>
<b>JIS</b>	<b>Japan Industrial Standard</b>
<b>LPDC</b>	<b>Low Pressure Die Casting</b>
<b>SE</b>	<b>Secondary Electron</b>
<b>SEM</b>	<b>Scanning Electron Microscope</b>
<b>UTS</b>	<b>Ultimate Tensile Strength</b>
<b>XRD</b>	<b>X-ray Diffraction</b>

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Penelitian

Penggunaan logam aluminium semakin meluas dan berkembang dalam berbagai bidang aplikasi, khususnya dalam industri manufaktur. Salah satunya dalam pembuatan komponen otomotif dan sebagian besar dibuat dari paduan hasil pengecoran aluminium. Hal ini dikarenakan keunggulan dari aluminium, dimana logam ini memiliki berat jenis yang hampir sepertiga dari logam baja sehingga memiliki karakteristik yang ringan. Selain itu logam aluminium juga memiliki titik lebur yang relatif rendah yaitu sekitar  $660^{\circ}\text{C}$ , ketahanan korosi yang baik serta mudah dipadu dengan unsur lain untuk meningkatkan sifat dari aluminium tersebut. Salah satu jenis aluminium paduan yang sering digunakan dalam industri otomotif adalah paduan AC4B (standar JIS) atau setara dengan paduan aluminium AA 333 (standar ASTM). Pada kendaraan roda dua paduan aluminium (Al-Si-Cu) ini digunakan sebagai bahan baku pengecoran komponen *cylinder head*.

Komponen *cylinder head* dihasilkan dengan metode pengecoran *low pressure die casting* (LPDC) yang merupakan proses pengecoran logam bertekanan rendah. Sayangnya, masalah yang seringkali muncul dalam proses pengecoran *cylinder head* adalah adanya cacat pada komponen ini seperti bocor, *shrinkage*, *misrun* serta porositas. Cacat-cacat tersebut yang masih menjadi penyebab utama dari banyaknya kegagalan dari komponen *cylinder head*. Kegagalan ini memberikan kerugian dimana komponen yang gagal tidak dapat masuk ke dalam produksi dan kerugian dari sisi materi. Untuk itu perlu dihasilkan suatu inovasi untuk dapat mengurangi cacat pada hasil pengecoran *cylinder head*.

Sebagai salah satu upaya dalam mengatasi masalah cacat ini dilakukan suatu proses rekayasa material dari komponen *cylinder head*. Proses rekayasa material ini dapat berupa modifikasi dan penghalusan butir (*grain refining*). Modifikasi menggambarkan keadaan yang ditandai dengan adanya penghalusan dari struktur kristal silikon dalam aluminium-silikon eutektik. Dengan perlakuan modifikasi, struktur kristal silikon yang tadinya berbentuk *acicular* akan berubah

menjadi *fibrous* atau lamelar. *Modifier* yang berasal dari unsur – unsur golongan IA, IIA, dan unsur tanah jarang seperti stronsium (Sr) dan natrium (Na) untuk paduan aluminium-silikon hipoeutektik, sedangkan fosfor (P) dan antimoni untuk paduan aluminium-silikon hipereutektik<sup>[1]</sup>. Proses modifikasi akan merubah struktur silikon yang awalnya berbentuk pelat kasar berubah menjadi struktur *fibrous* halus. Struktur pelat yang kasar dan tajam akan menjadi potensi terjadinya konsentrasi tegangan sehingga material dengan struktur ini cenderung getas. Dengan berubah menjadi struktur *fibrous* yang lebih halus akan meningkatkan nilai keuletan dan UTS<sup>[2]</sup>. Dalam penelitian ini unsur modifikasi yang ditambahkan berupa stronsium.

Selain dengan penambahan *modifier*, sifat mekanik dari paduan aluminium juga dapat ditingkatkan dengan penghalusan butir (*grain refining*). *Grain refining* adalah proses penghalusan butir, sehingga diperoleh ukuran butir yang lebih kecil, halus dan homogen dengan melakukan perlakuan terhadap cairan logam pada saat proses pengecorannya<sup>[5]</sup>. Penghalus butir yang ditambahkan akan berfungsi sebagai inti serta sebagai unsur terlarut yang memiliki kemampuan untuk menghalangi pertumbuhan butir sehingga memberikan kesempatan butir lain untuk tumbuh maka. Dengan demikian butir yang dihasilkan akan lebih kecil sehingga didapatkan sifat mekanik yang lebih baik<sup>[13]</sup>. Pengaruh lainnya antara lain membuat *shrinkage* porositas lebih terdistribusi dan meminimalisasi terjadinya *hot tearing*<sup>[7]</sup>. Apabila kedua dari perlakuan ini dilakukan secara bersamaan diharapkan akan membuat material memiliki karakteristik yang lebih baik lagi.

Penelitian ini akan difokuskan untuk mengetahui pengaruh penggabungan dari penghalus butir dan *modifier* terhadap karakteristik dari paduan AC4B dalam aplikasinya di dunia industri otomotif. Penelitian ini sendiri dikhususkan untuk mempelajari pengaruh kadar 0.1 wt. % Ti dengan variasi 0.003, 0.018, dan 0.025 wt. % terhadap karakteristik paduan AC4B pada LPDC. Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian payung mengenai pengembangan material aluminium sebagai bahan baku industri otomotif di Indonesia dengan menggunakan penghalus butir dan *modifier*. Pemilihan komposisi Ti dan Sr didasarkan pada hasil penelitian sebelumnya<sup>[3][4]</sup>.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- 1) Mempelajari pengaruh komposisi 0.1 wt. % Ti dengan 0.003, 0.018, dan 0.025 wt. % Sr terhadap sifat mekanis, struktur mikro dan porositas serta karakteristik fluiditas paduan aluminium AC4B.
- 2) Mempelajari mekanisme penggabungan proses modifikasi serta penghalusan butir pada paduan AC4B.

## 1.3 Ruang Lingkup Penelitian

### 1.3.1 Material

- 1) Paduan aluminium tuang AC4B.
- 2) *Master Alloy* Al-10%Sr
- 3) *Flux Coveral* GR – 2815<sup>®</sup> ( 15 % Ti )

### 1.3.2 Parameter Penelitian

- 1) Variabel komposisi tanpa penambahan (0 wt. % Sr, 0 wt. % Ti) dan komposisi 0.1 wt. % Ti dengan variasi komposisi Sr yaitu 0.003, 0.018 dan 0.025 wt. % Sr.
- 2) Proses LPDC dengan temperatur *dies*  $375 \pm 75^{\circ}\text{C}$ .
- 3) Temperatur aluminium cair dijaga konstan pada  $710 \pm 10^{\circ}\text{C}$ .
- 4) Pengujian fluiditas metode spiral dengan temperatur *pre-heating*  $290 \pm 10^{\circ}\text{C}$ .
- 5) Pengambilan sampel uji tarik dengan temperatur *pre-heating*  $290 \pm 10^{\circ}\text{C}$ .

### 1.3.3 Tempat Penelitian

- 1) Proses pengecoran dilakukan di pabrik LPDC PT AHM.
- 2) Pengujian tarik, kekerasan, spektrometri dan kebocoran dilakukan di PT AHM.

- 3) Pengamatan mikrostruktur dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik dan Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- 4) Analisis struktur dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDAX di laboratorium SEM di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan di PT AHM.
- 5) Pengujian XRD dilakukan di BATAN.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

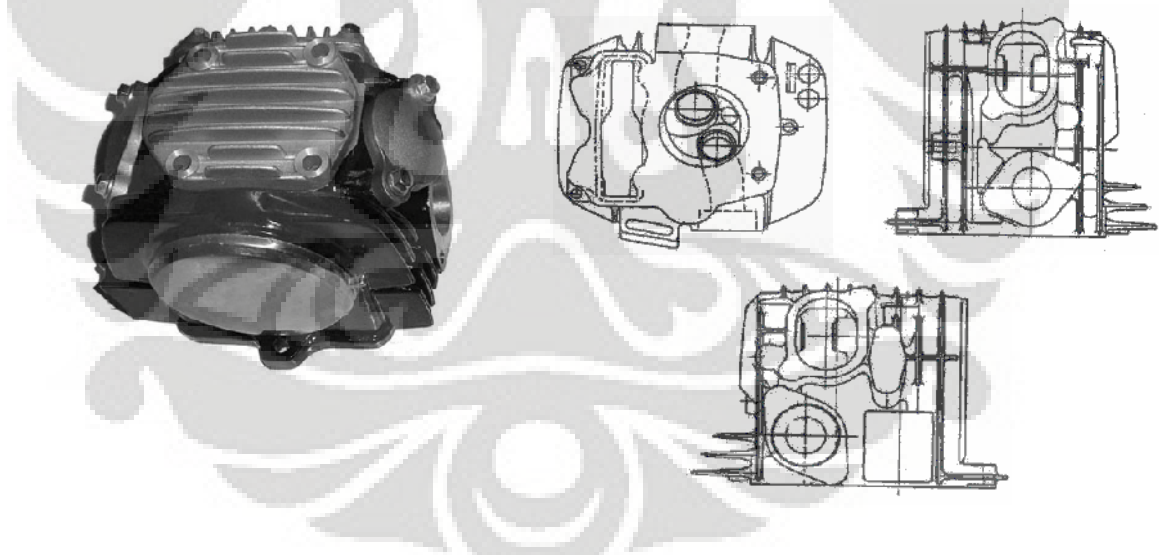
Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat memberikan suatu alternatif solusi sebagai upaya dalam peningkatan kualitas produk AC4B dengan metode LPDC dan dapat menurunkan angka kegagalan pada komponen *cylinder head*. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi tambahan studi literatur bagi pihak lain yang ingin mengetahui pengaruh penggabungan antara penambahan penghalus butir serta *modifier* terhadap karakteristik paduan aluminium silikon.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Cylinder Head

*Cylinder head* adalah bagian mesin yang berperan dalam mengatur proses pembakaran. *Cylinder head* berada pada bagian atas dari *cylinder* yang terdiri atas ruang bakar (*combustion chamber*), kedudukan *valve* dan *spark plug*. Pada bagian atas terdapat ruang untuk rantai keteng dan *rocker arm* yang berfungsi mentransfer gerakan berputar rantai keteng menjadi gerak lurus (*linear*) untuk mengoperasikan *valve*. Di bagian terluar *cylinder head* terdapat sirip-sirip yang berfungsi sebagai pendingin udara untuk mesin<sup>[1]</sup>. Sebagaimana perannya dalam mengatur ruang pembakaran maka *cylinder head* harus memiliki ketahanan terhadap *hot tear*. Gambar 2.1 memperlihatkan komponen *cylinder head* pada sepeda motor.



Gambar 2. 1 Komponen *cylinder head* pada sepeda motor<sup>[8]</sup>.

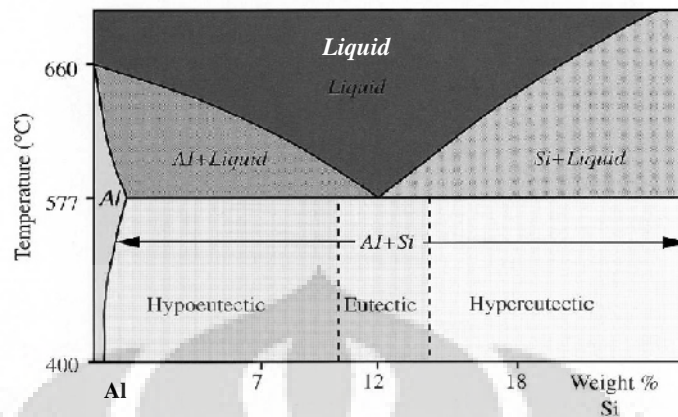
## 2.2 Paduan Aluminium

Aluminium murni merupakan logam yang memiliki kemampuan cor (*castability*) yang rendah, oleh karenanya pengecoran aluminium dilakukan dengan menggunakan paduan aluminium tuang. Aluminium tuang memiliki komposisi silikon yang lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium tempa dimana penambahan silikon akan membuat aluminium memiliki karakteristik tuang yang lebih baik. Sebagai material tuang aluminium memiliki karakteristik antara lain<sup>[9]</sup>:

- 1) Memiliki temperatur lebur yang rendah. Hal tersebut akan menghemat penggunaan energi dalam proses peleburannya.
- 2) Massa jenis aluminium sekitar 1/3 dari massa jenis baja ( *Al alloy* = 2.6-2.9g/cm<sup>3</sup> sedangkan baja karbon = 7.85 g/cm<sup>3</sup>).
- 3) Fluiditas nya baik sehingga aluminium mampu mengisi rongga – rongga dari cetakan yang tipis.
- 4) Memiliki stabilitas kimia yang cukup baik.
- 5) Memiliki siklus penuangan yang cukup cepat karena perpindahan panas dari aluminium ke cetakan relatif cepat.
- 6) Dalam hal kelarutan gas terhadap hidrogen dapat dikendalikan dengan proses yang tepat.
- 7) Memiliki permukaan *as-cast* yang baik, berkilat, dan tanpa noda.
- 8) Cukup banyak jenis paduan aluminium tuang yang relatif bebas dari kecenderungan *hot shortness*.

### 2.2.1 Paduan Aluminium-Silikon

Paduan aluminium-silikon merupakan kelas paduan yang cukup penting dalam industri pengecoran aluminium dimana penggunaannya telah meluas untuk berbagai aplikasi seperti untuk komponen otomotif, industri penerbangan serta industri pertahanan karena memiliki karakteristik tuang yang baik. Paduan aluminium-silikon memiliki fluiditas yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, sifat mampu las yang baik serta memiliki koefisien ekspansi termal yang rendah. Tetapi, kehadiran partikel silikon yang keras dalam struktur mikro membuat paduan aluminium-silikon ini susah dalam proses permesinannya<sup>[10]</sup>.



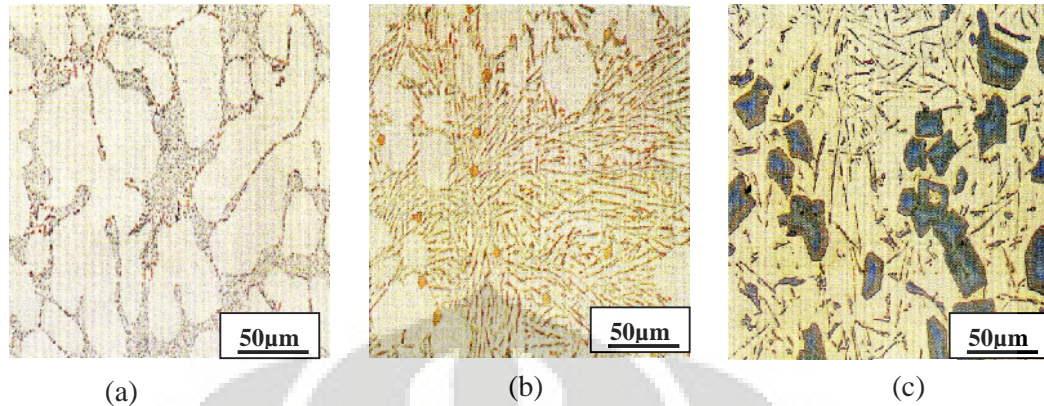
**Gambar 2. 2** Diagram fasa Al-Si<sup>[11]</sup>.

Seperti terlihat pada Gambar 2.2, paduan aluminium-silikon dibagi menjadi paduan hipoeutektik (kadar Si < 11.7 %), paduan eutektik (Si 11.7-12.2%) dan paduan hipereutektik (kadar Si > 12.2 %) dimana struktur utama dari ketiga komposisi ini berupa fasa  $\alpha$ -Al yang sangat kaya akan aluminium. Struktur ini akan tetap muncul meskipun pada kondisi hipereutektik, karena bentuk struktur ini akan selalu terpisah dari fasa padatnya, baik dalam kondisi hipoeutektik, eutektik dan hipereutektik. Selain fasa  $\alpha$ -Al, terdapat juga fasa yang merupakan partikel-partikel kristal silikon yang tidak terlarut dalam fasa  $\alpha$ -Al. Pada kondisi hipereutektik, fasa tersebut menghasilkan silikon primer yang bentuknya kasar<sup>[12]</sup>.

Pada komposisi hipoeutektik, terdapat kandungan silikon < 11.7 %. Pada daerah ini, pembekuan terjadi melalui fasa cair-padat. Struktur akhir dari komposisi ini adalah struktur yang kaya aluminium, dan sebagai fasa utamanya adalah fasa  $\alpha$  dengan struktur eutektik sebagai struktur tambahan<sup>[13]</sup>.

Komposisi eutektik merupakan daerah dimana paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya<sup>[14]</sup>. Komposisi eutektik mengandung kadar silikon antara 11.7 % - 12.2 %<sup>[12]</sup>. Proses pembekuan yang berlangsung menyerupai pembekuan logam murni, dimana temperatur awal dan temperatur akhir adalah sama (isotermal). Adanya struktur eutektik ini mengakibatkan paduan aluminium-silikon memiliki karakteristik mampu cor yang baik.





Gambar 2.3 Mikrostruktur aluminium-silikon komposisi, (a) hipoeutektik, (b) eutektik, (c) hipereutektik<sup>[11]</sup>

Untuk komposisi hipereutektik, kandungan silikonnya  $> 12.2\%$ <sup>[12]</sup>. Struktur mikro paduan ini terdiri dari endapan partikel silikon primer dalam matrik eutektik. hipereutektik memiliki ketahanan aus yang sangat baik<sup>[16]</sup>. Akan tetapi kekuatan tarik dan keuletannya lebih rendah dibandingkan dengan aluminium-silikon hipoeutektik. Selain itu, adanya endapan partikel silikon ini membuat masalah pada proses permesinannya. Gambar 2.3 memperlihatkan struktur mikro dari paduan aluminium-silikon hipoeutektik, eutektik dan hipereutektik.

### 2.2.2 Paduan Aluminium AC4B

Paduan AC4B sebagai bahan utama dalam pembuatan *cylinder head* merupakan paduan aluminium berdasarkan standar JIS (*Japan Industrial Standard*) H5202 yang setara dengan paduan 333.0 standar AA (*Aluminum Association*). Komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan standar JIS dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan komposisi kimia paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar AA pada Tabel 2.2. Kelebihan dari paduan aluminium tuang AC4B adalah kekuatan dan kekerasan yang baik, sifat mampu cor (*castability*) juga baik, sifat mampu las yang baik dan dapat dilakukan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanisnya<sup>[15]</sup>. Karakteristik yang dimiliki oleh paduan aluminium AC4B hasil pengecoran (*as-cast*) diperlihatkan pada Tabel 2.3.

**Tabel 2. 1** Komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan JIS H5202 <sup>[16]</sup>

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

**Tabel 2. 2** Komposisi kimia paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar *Aluminum Association* <sup>[5]</sup>

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

**Tabel 2. 3** Karakteristik yang dimiliki paduan aluminium AC4B <sup>[17]</sup>

Karakteristik	Nilai	Satuan
Kekuatan Tarik	≥193	MPa
Kekerasan	65 – 100	HB
Modulus Elastisitas	73000	MPa
Modulus Geser	27400	MPa
Kekuatan Geser	119	MPa
Titik Lebur	516 – 585	°C
Konduktivitas Panas	105	W/m-K
Difusi Panas	389	J/g

### 2.2.3 Pengaruh Unsur dalam Paduan Aluminium Tuang

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

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

#### 1) Silikon (Si)

Silikon adalah unsur yang paling sering ditemui pada paduan aluminium karena dapat memperbaiki karakteristik coran. Silikon pada paduan Al-Si (terutama pada kadar 5-13% Si) meningkatkan fluiditas dan ketahanan terhadap retak panas, meningkatkan kekuatan dan kekerasan serta menurunkan berat jenis. Apabila kadar Si >12 % maka akan terbentuk kristal silikon primer yang bersifat keras, memiliki ekspansi termal yang rendah dan ketahanan ausnya baik. Akan tetapi sifat mampu permesinannya kurang baik. Berdasarkan standar JIS, kandungan silikon dapat mencapai 5-14 % dan untuk paduan aluminium AC4B sendiri sekitar 7-10 %<sup>[16]</sup>.

#### 2) Tembaga (Cu)

Kandungan tembaga pada paduan aluminium AC4B berkisar 2-4 %<sup>[1]</sup>. Unsur tembaga sebagai paduan akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam saat *as - cast* dan saat dilakukan perlakuan panas dengan membentuk fasa kedua Al<sub>2</sub>Cu. Namun unsur ini dapat mengurangi ketahanan terhadap *hot tear* (retak panas), fluiditas dan ketahanan korosi<sup>[18]</sup>.

#### 3) Besi (Fe)

Unsur besi merupakan pengotor yang sering ditemukan di aluminium<sup>[12]</sup>. Besi merupakan elemen paduan pada aluminium yang dapat meningkatkan ketahanan *hot-tear* dan menurunkan kecenderungan terjadinya efek

penyambungan (*soldering*) dengan cetakan pada *die-casting*. Kelarutan besi dalam aluminium pada fasa padat sangat rendah (~0.04%), dan kebanyakan keberadaan besi dalam aluminium yang melebihi jumlah tersebut berupa fasa intermetalik kedua yang berkombinasi dengan aluminium dan unsur lainnya. Besi bereaksi membentuk fasa-fasa tidak terlarut (*insoluble*) dalam leburan paduan aluminium, yang umumnya berupa  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ ,  $\text{FeMnAl}_6$ , dan  $\text{Al}_5\text{FeSi}$ . Adanya kadar besi pada paduan yang berlebihan akan membentuk kristal  $\text{FeSiAl}_5$  akan menurunkan sifat keuletan dan ketahanan korosi paduan Al-Si dan mengakibatkan struktur butir yang kasar<sup>[12]</sup>.

#### 4) Magnesium (Mg)

Paduan magnesium berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan, terutama jika dilakukan perlakuan panas karena terbentuk fasa  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Fasa ini akan terbentuk pada paduan Al-Si dengan penambahan Mg dalam jumlah kecil (optimal pada 0.7 wt % Mg). Pada paduan AC4B, kandungan magnesium dijaga agar tidak melebihi 0.5 %<sup>[16]</sup>. Pengaruh Mg lainnya antara lain meningkatkan ketahanan korosi akan tetapi Mg berpengaruh buruk menurunkan sifat mampu cor (*castability*)<sup>[19]</sup>.

#### 5) Seng (Zn)

Penambahan seng (Zn) tidak memiliki pengaruh yang signifikan bila hanya ditambahkan ke dalam paduan Al-Si. Akan tetapi bila dipadukan bersama dengan tembaga Cu) dan/atau magnesium maka akan menghasilkan komposisi *heat-treatable* yang berpengaruh meningkatkan kekerasan dan kekuatan karena membentuk presipitat  $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{CuAl}_2$ . Akan tetapi pengaruh buruk penambahan Zn ini dapat meningkatkan kegetasan dan menurunkan ketangguhan. Kandungan seng dalam paduan AC4B dibatasi hingga 0.1 %<sup>[16]</sup>.

#### 6) Mangan (Mn)

Mangan biasanya dianggap sebagai pengotor dalam komposisi coran, sehingga harus dikendalikan agar tetap rendah dalam proses *gravity casting*. Tanpa melakukan *work hardening*, mangan tidak memberikan efek yang signifikan pada coran paduan aluminium. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa fraksi volume yang tinggi dari  $\text{MnAl}_6$  pada paduan aluminium yang mengandung

lebih dari 0.5 % Mn akan memiliki pengaruh yang menguntungkan pada mutu internal dari coran<sup>[12]</sup>.

#### 7) Nikel (Ni)

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

#### 8) Kromium (Cr)

Kromium memiliki laju difusi yang rendah dan membuat fasa halus yang terdispersi pada produk tempa. Fasa terdispersi ini mencegah nukleasi dan pertumbuhan butir. Kromium digunakan untuk mengontrol struktur butir, untuk menjaga pertumbuhan butir pada paduan aluminium-magnesium-zinc selama proses *hot working* atau *heat treatment*<sup>[20]</sup>.

#### 9) Titanium (Ti)

Titanium merupakan unsur minor pada paduan AC4B. Kelarutan Titanium dalam paduan AC4B dibatasi sampai 0.2 %<sup>[16]</sup>. Titanium digunakan sebagai penghalus butir (*grain refiner*) pada paduan aluminium.

#### 10) Boron (B)

Boron digunakan pada aluminium dan paduannya sebagai penghalus butir dan untuk meningkatkan konduktivitas dengan pengendapan vanadium, titanium, kromium dan molybdenum. Boron dapat digunakan sendiri (pada level 0.005% - 0.1%) sebagai penghalus butir selama proses solidifikasi, namun menjadi lebih efektif saat digunakan dengan titanium berlebih<sup>[20]</sup>

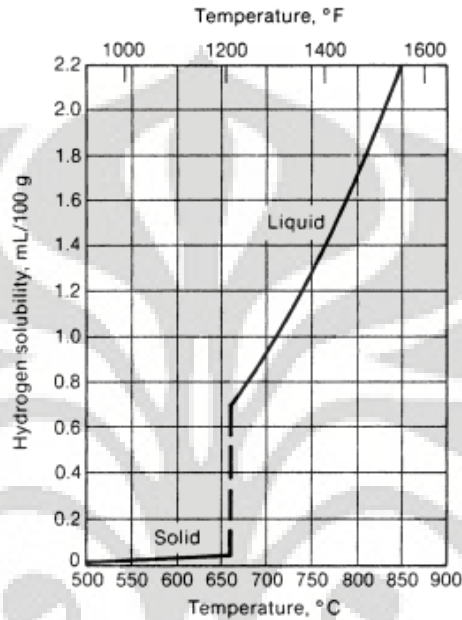
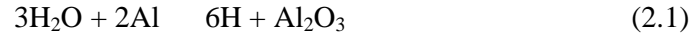
#### 11) Stronsium (Sr)

Stronsium digunakan sebagai unsur yang memodifikasi kristal silikon eutektik. Modifikasi yang efektif akan didapatkan dengan penambahan Sr pada kadar yang rendah<sup>[12]</sup>.

#### 12) Hidrogen

Aluminium dan paduannya sangat rentan terhadap absorpsi hidrogen dalam kondisi cair. Hidrogen merupakan satu-satunya gas yang memiliki kelarutan yang cukup besar pada aluminium cair dan paduannya. Kehadiran hidrogen dalam aluminium cair akan menimbulkan masalah yang mengarah pada terjadinya cacat porositas pada hasil coran. Penyerapan hidrogen pada aluminium

cair pada saat terjadi kontak antara permukaan aluminium cair dengan uap air pada atmosfer sehingga air tereduksi dan menghasilkan hidrogen<sup>[19]</sup>.



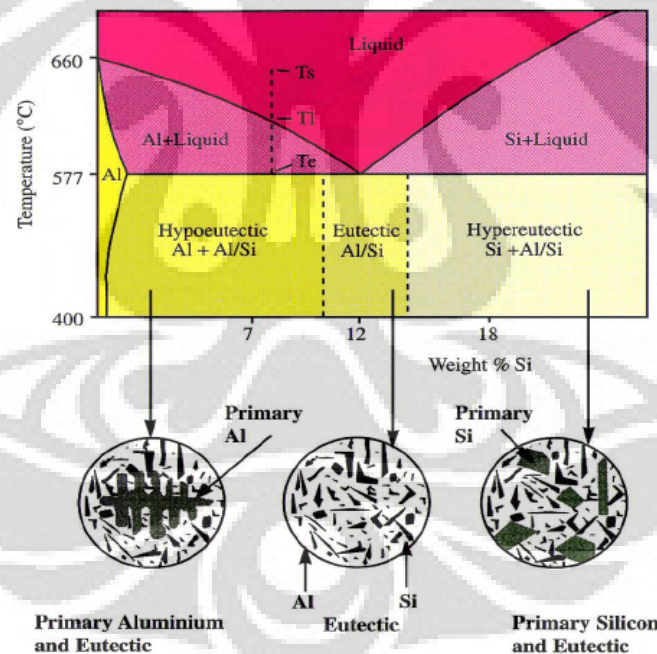
Gambar 2. 4 Grafik kelarutan hidrogen pada aluminium<sup>[15]</sup>.

Seperti terlihat pada Gambar 2.4 diketahui bahwa kelarutan gas hidrogen akan meningkat secara eksponensial seiring dengan kenaikan temperatur. Selama pendinginan aluminium cair, hidrogen terlarut yang memiliki kelarutan rendah pada keadaan padat, akan mengendap dalam bentuk molekul, sehingga mengakibatkan pembentukan porositas<sup>[21]</sup>. Upaya pengendalian hidrogen dalam aluminium cair dapat dilakukan dengan beberapa cara misalnya dengan meminimalisasi sumber hidrogen yang masuk ke aluminium cair seperti dari bahan material yang mengandung uap air, melakukan proses *fluxing* dengan optimal (seluruh permukaan aluminium cair dapat terlindungi dari kontak dengan atmosfer), serta dengan melakukan proses *degassing* yang baik untuk menghilangkan hidrogen terlarut dalam aluminium cair<sup>[21]</sup>.

Proses *degassing* dilakukan dengan memasukkan senyawa kimia kering yang akan terurai dan mampu mengikat serta mengangkat hidrogen keluar dari aluminium cair. Mekanisme pengikatan serta pengangkatan hidrogen ini menggunakan prinsip difusi tekanan parsial. Senyawa kimia yang digunakan biasanya mengandung nitrogen, argon, klorin atau freon, serta senyawa heksakloroetana. Senyawa kimia ini ada dalam bentuk gas ataupun tablet<sup>[21]</sup>.

### 1.2.3 Proses pembekuan

Proses pembekuan dan peleburan merupakan transformasi antara keadaan kristalografi dan non-kristalografi dari logam maupun paduan. Transformasi ini digunakan sebagai dasar dari aplikasi teknologi dalam industri pengecoran<sup>[23]</sup>. Proses pembekuan akan mempengaruhi produk dari benda tuang sehingga variabel-variabel yang mempengaruhi proses pembekuan ini perlu diperhatikan.

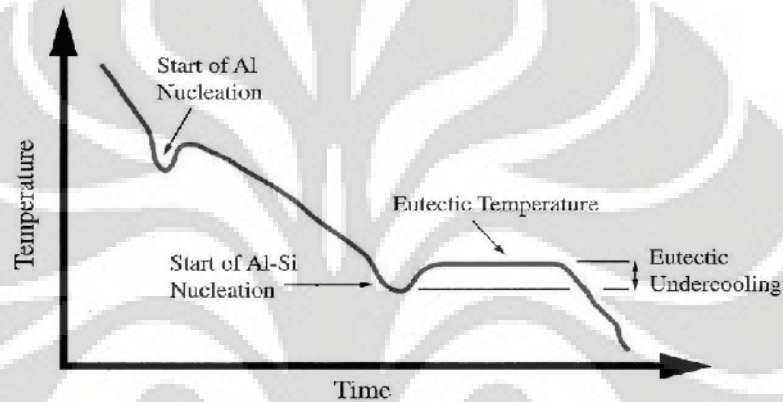


**Gambar 2. 5** Diagram fasa Al-Si dan struktur mikro yang terbentuk berbeda pada komposisi silikon yang berbeda<sup>[22]</sup>.

Paduan AC4B memiliki kandungan silikon 7-10 wt. % yang merupakan paduan hipoutektik. Pada pembekuan paduan aluminium-silikon yang memiliki kandungan silikon <12 % fasa pertama yang akan terbentuk adalah aluminium.

Reaksi pembekuan paduan Al-Si hipoeutektik dan eutektik terjadi beberapa mekanisme pengendapan fasa, yaitu pembentukan jaringan dendritik  $\alpha$ -Al, reaksi eutektik Al-Si dan pengendapan fasa kedua (fasa intermetalik).

Pada Gambar 2.5  $T_s$  adalah temperatur tuang, temperatur *liquidus* adalah  $T_2$ , dan temperatur solidus adalah  $T_e$ . Perbedaan antara temperatur  $T_s$ - $T_1$  dinamakan *superheat*. Zona lumpur (*mushy zone*) merupakan daerah diantara temperatur *liquidus* dan temperatur *solidus* ( $T_e$ ). Grafik pembekuan pada paduan aluminium-silikon diperlihatkan melalui Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Pembekuan Aluminium-silikon hipoeutektik<sup>[22]</sup>.

Pembekuan dimulai ketika aluminium cair melewati temperatur  $T_1$  dimana aluminium-primer (pro-eutektik) yang memiliki struktur dendritik akan terbentuk untuk pertama kali. Tetapi, awal pembekuan harus terjadi dibawah temperatur  $T_e$  untuk dapat membentuk inti awal aluminium-primer. Terlihat adanya selisih temperatur antara  $T_1$  dengan temperatur pembekuan aktual dibawah  $T_e$  yang dinamakan *undercooling*. Pembekuan tidak akan terjadi hanya pada satu temperatur, melainkan terjadi pada jangkauan temperatur  $T_1$  sampai temperatur  $T_e$ <sup>[22]</sup>.

### 2.3 Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Sifat Mekanis

Struktur mikro akan mempengaruhi sifat-sifat yang dimiliki oleh material. Struktur mikro dari material sangat dipengaruhi oleh komposisi material

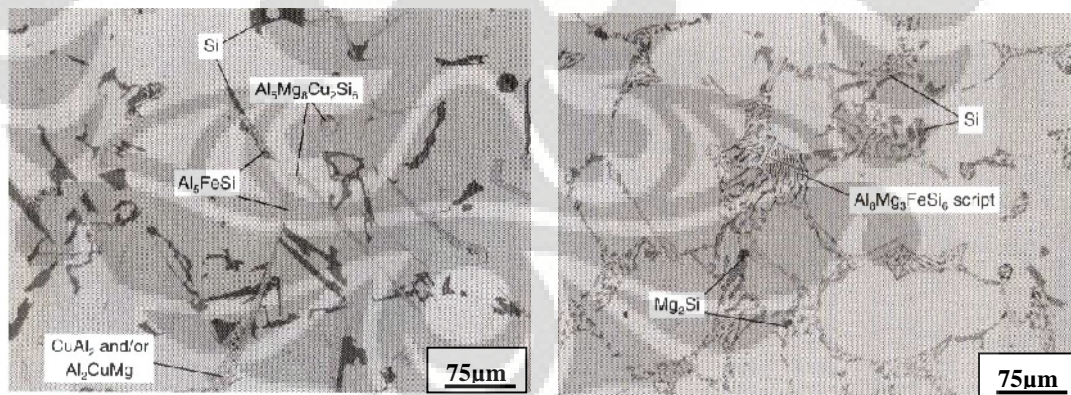


dan kondisi solidifikasi serta perlakuan panas. Komponen dari struktur mikro yang mempengaruhi sifat mekanis pada aluminium tuang adalah<sup>[15]</sup> :

- 1) Ukuran, bentuk, dan distribusi fasa intermetalik
- 2) *Dendrite arm spacing* (DAS)
- 3) Ukuran dan bentuk butir
- 4) Modifikasi eutektik

### 2.3.1 Fasa Intermetalik

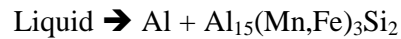
Fasa intermetalik akan dipengaruhi oleh komposisi kimia dan mekanisme pembekuan yang terjadi. Fasa intermetalik terbentuk akibat komposisi kimia yang melebihi batas kelarutan yang membentuk fasa kedua dan mengendap pada struktur mikro paduan. Dengan mengontrol konsentrasi dari elemen dalam paduan serta memperhatikan rasio stokiometri yang dibutuhkan dalam pembentukan fasa intermetalik akan menghasilkan mikrostruktur yang lebih utama (disukai) dalam pengembangan sifat mekanis paduan. Keberadaan fasa intermetalik akan mempengaruhi sifat mekanis dari paduan<sup>[15]</sup>. Fasa intermetalik yang sangat getas akan mengurangi keuletan material sehingga akan menurunkan kekuatan dari paduan aluminium-silikon<sup>[12]</sup>. Gambar 2.7 memperlihatkan morfologi fasa intermetalik pada paduan aluminium.



**Gambar 2. 7** Fasa intermetalik pada paduan aluminium<sup>[5]</sup>.

Dibawah ini diberikan penjabaran tahapan reaksi saat solidifikasi <sup>[13]</sup>:

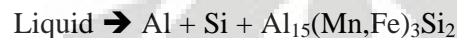
- 1) Awal solidifikasi dan pembentukan -Aluminium
- 2) Pengendapan fasa yang mengandung Fe (titik koherensi dendrit)



atau



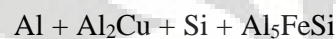
- 3) Awal reaksi utama eutektik



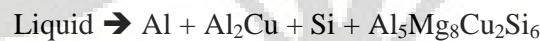
atau



- 4) Pengendapan fasa  $\text{Al}_2\text{Cu}$



- 5) Pengendapan fasa kompleks



- 6) Akhir dari solidifikasi

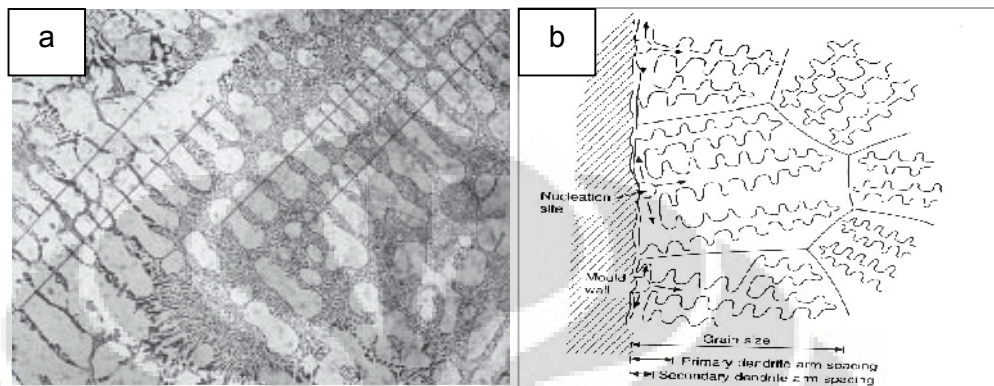
### 2.3.2 Dendrite Arm Spacing (DAS)

Dendrit merupakan struktur khas yang akan muncul dari hasil proses pengecoran. Dendrit merupakan struktur aluminium yang menyerupai pohon yang tumbuh ketika aluminium cair yang *undercooled* membeku<sup>[24]</sup>. Ada 3 hal yang menjadi acuan dalam menjelaskan karakteristik dendrit, yaitu :

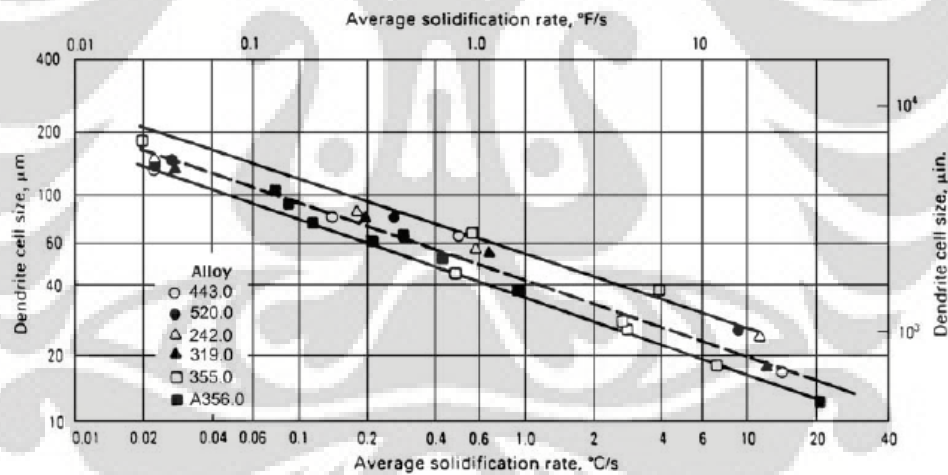
- *Dendrite arm spacing* : jarak antara lengan sekunder dendrit.
- *Dendrite sel interval* : jarak antara garis sumbu dendrit yang saling berdekatan.
- *Dendrite cell size* : lebar dendrit <sup>[12]</sup>.

*Dendrite arm spacing* (DAS) atau jarak antar lengan dendrit dapat digunakan untuk menggambarkan struktur metalurgi dari material cor. Gambar 2.8 memperlihatkan ) Struktur mikro Al-Si hipoeutektik menunjukkan DAS serta sketsa geometris sel dendrit. Kecepatan proses pembekuan akan mempengaruhi DAS seperti terlihat pada Gambar 2.9. Dan nilai DAS ini mempengaruhi sifat mekanis suatu paduan logam. Nilai DAS yang semakin besar mengindikasikan struktur mikro yang kasar sehingga sifat mekanisnya pun tidak baik. Sedangkan nilai DAS yang yang kecil mengindikasikan struktur mikro yang halus dengan sifat mekanis yang baik<sup>[25]</sup>.

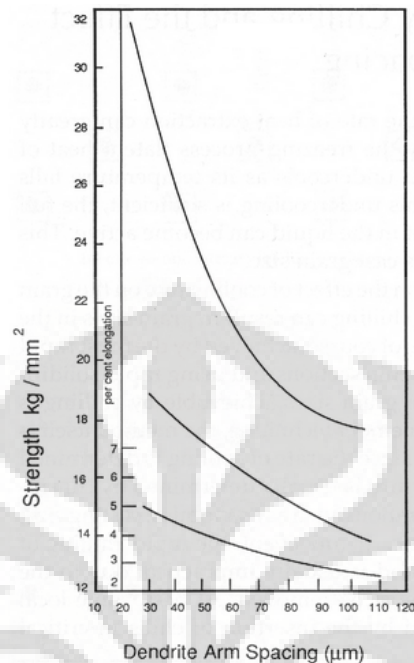
Gambar 2.10 memperlihatkan pengaruh DAS terhadap kekuatan paduan aluminium silikon.



Gambar 2. 8 (a) Struktur mikro Al-Si hipoeutektik menunjukan DAS, (b) sketsa geometris sel dendrit<sup>[6]</sup>.



Gambar 2. 9 Pengaruh laju pembekuan terhadap *dendrit arm spacing*<sup>[15]</sup>.



Gambar 2.10 Pengaruh *dendrit arm spacing* terhadap kekuatan<sup>[15]</sup>

#### 2.4 Penghalusan Butir

Bentuk butir dalam struktur mikro akan mempengaruhi sifat dari material. Butir yang halus dan *equiaxed* sangat diinginkan dalam struktur mikro logam karena dapat menghasilkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan. Sedangkan adanya butir yang kasar dan berbentuk kolumnar tidak diinginkan karena menurunkan sifat mekanis. Bentuk dan ukuran butir dipengaruhi oleh komposisi kimia, kecepatan pembekuan serta konsentrasi dari efektifitas inti saat pembekuan<sup>[15]</sup>. Salah satu cara untuk mendapatkan butir yang halus adalah dengan cara penghalusan butir (*grain refining*). *Grain refining* adalah proses penghalusan butir, sehingga diperoleh ukuran butir yang lebih kecil, halus dan homogen dengan melakukan perlakuan terhadap cairan logam pada saat proses pengecorannya<sup>[5]</sup>. Penghalus butir (*grain refiner*) yang umum digunakan adalah yang mengandung unsur titanium dan boron, biasanya berupa senyawa dari logamnya, seperti  $TiAl_3$  dan  $TiB_2$ . Penambahan unsur penghalus butir ini dapat berupa *master alloy*, ataupun dalam bentuk serbuk.

### 2.4.1 Mekanisme Penghalusan Butir dengan Ti

Penghalusan butir merupakan hasil dari dua proses yang terpisah, yaitu pengintian kristal baru dari cairan logam dan selanjutnya pertumbuhan kristal baru sampai ukuran tertentu. Kedua proses ini membutuhkan *driving force* yang menyuplai ke sistem melalui *undercooling* dan/atau *supersaturation* dalam hubungannya dengan kondisi keseimbangan dari sistem aktual<sup>[13]</sup>.

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 penghalusan butir. Teori yang paling terakhir dikemukakan oleh M. Johnsson<sup>[26]</sup> mengenai teori paradigma unsur terlarut. Pada Tabel 2.4 diberikan ringkasan mengenai teori-teori sebelumnya mengenai penghalusan butir.

**Tabel 2. 4** Teori-teori penting mengenai penghalusan butir<sup>[6]</sup>

Teori	Substrat pengintian
<i>The nucleant Paradigm</i> Teori Borida/ Karbida	terjadi pada borida atau karbida
<i>Phase diagram theories</i> <i>Peritectic hulk</i>	via reaksi peritektik terjadi pada Ti-B
<i>Hypernucleation</i>	via reaksi peritektik pada borida
<i>Duplex nucleation</i>	terjadi pada $Al_3Ti$ dimana terbentuk pada permukaan partikel $TiB_2$
<i>The solute Paradigm</i> Mekanisme <i>undercooling-driven</i>	borida (atau partikel lain)

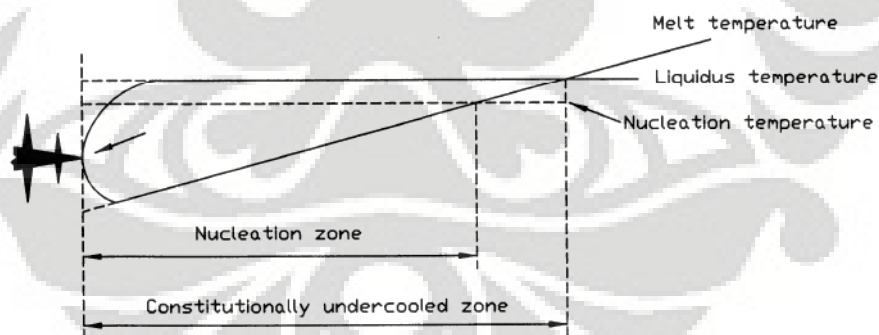
Dalam teori paradigma unsur terlarut dikemukakan dua alasan penting mengapa elemen terlarut sangat esensial dalam penghalusan butir. Yang pertama adalah unsur-unsur terlarut mampu membatasi laju dari pertumbuhan butir sehingga akan memberikan waktu pembentukan inti untuk terjadi. Hal ini akan sangat 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 *growth*

*restriction factor* (GRF) selama pembekuan. GRF dapat dihitung dengan menggunakan rumus<sup>[6]</sup>:

$$\text{GRF} = m \cdot C_0 \cdot (k-1) \quad (2.2)$$

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 aluminium cair dan padatan pada daerah antarmuka pertumbuhan butir.

Selanjutnya yang sangat penting adalah kemampuan segregasi dari unsur-unsur terlarut ini dengan cara menciptakan zona *undercooled* mendatar di depan daerah antarmuka pertumbuhan butir. Zona *undercooled* mendasar 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 2.11 memperlihatkan adanya zona *undercooled* mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dimana pertumbuhan butir baru dapat terjadi dengan adanya unsur-unsur terlarut. Besarnya zona ini bergantung pada kemampuan dari pembentuk inti dan keadaan aluminium cair<sup>[6]</sup>.



**Gambar 2. 11** Zona undercooled mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit<sup>[6]</sup>.

Pada Tabel 2.5 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>[2][27]</sup>.

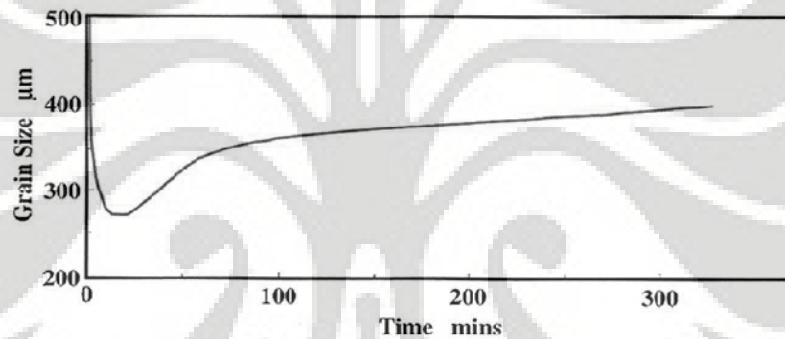
**Tabel 2. 5** Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut pada aluminium<sup>[6][27]</sup>

Unsur	k	m	(k - 1)m	Konsentrasi Maksimum (wt%)	Tipe Reaksi
Ti	~ 9	30.7	245.6	0.15	peritektik
Ta	2.5	70	105	0.1	peritektik
V	4	10	30	~	peritektik
Hf	2.4	8	11.2	~	peritektik
Mo	2.5	5	7.5	~	peritektik
Zr	2.5	4.5	6.8	0.11	peritektik
Nb	1.5	13.3	6.6	~	peritektik
Si	0.11	-6.6	5.9	~	eutektik
Cr	2	3.5	3.5	~	peritektik
Ni	0.01	-3.3	3.3	~	eutektik
Mg	0.51	-6.2	3	~	eutektik
Fe	0.02	-3	2.9	~	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 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>[6]</sup>.

Dalam mekanisme penghalusan butir dikenal dengan istilah *fading*. *Fading* merupakan kejadian dimana penghalus butir kehilangan kemampuannya setelah beberapa waktu<sup>[7]</sup>. Peristiwa *fading* ini dapat terjadi karena tiga alasan yaitu adanya pengendapan (*settling*), penggumpalan (*agglomeration*), dan adanya pencemaran (*poisoning*). Pengendapan terjadi pada aluminium cair yang tidak mengalami pengadukan secara kontinyu dimana hal ini terjadi karena berat jenis dari  $TiB_2$  ( $4.5\text{g/cm}^3$ ) serta  $TiAl_3$  ( $3.35\text{g/cm}^3$ ) dibandingkan dengan aluminium cair ( $2.7\text{g/cm}^3$ ). Penggumpalan terjadi karena partikel-partikel borida berkumpul

dan menggumpal sehingga terjadi pengendapan yang lebih cepat. Sedangkan mekanisme pencemaran (*poisoning*) terjadi dengan sangat cepat dan tidak dapat dikembalikan sehingga menjadi masalah yang cukup serius. Elemen pencemar kimia seperti zirkonium dipercaya dapat mensubstitusi titanium pada partikel  $TiAl_3$  atau pun  $TiB_2$  menjadi  $(Zr,Ti)Al_3$  atau  $(Zr,Ti)B_2$  maka dapat membuat pembentukan inti menjadi berkurang. Selain itu, penambahan silikon melebihi nilai 3 % juga dapat menyebabkan efek pencemaran. Dalam penelitian tersebut menyebutkan bahwa silikon akan menimbulkan *fading*  $TiB_2$  dengan laju yang konstan ketika kadar silikon diatas 3 %<sup>[7]</sup>. Gambar 2.12 memperlihatkan pengaruh *fading* penghalus butir AlTiB terhadap besar butir paduan aluminium.



Gambar 2. 12 *Fading* penghalus butir jenis AlTiB pada paduan aluminium<sup>[7]</sup>.

#### 2.4.2 Pengaruh Penambahan *Grain Refiner* pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B

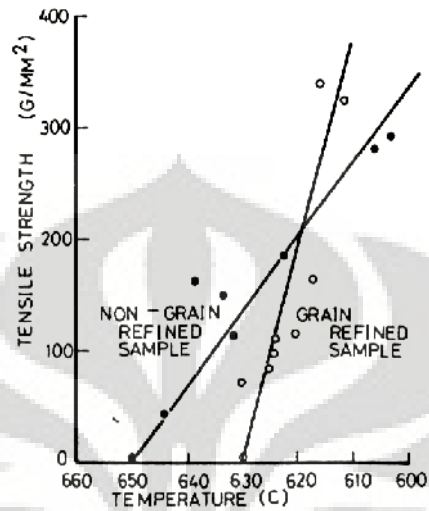
Pengaruh penambahan penghalus butir pada paduan aluminium tuang adalah sebagai berikut :

##### 1) Sifat mekanis

Sifat mekanis seperti *tensile strength* dan elongasi akan meningkat seiring dengan ukuran butir yang semakin halus. Semakin halus butir maka semakin banyak batas butir yang akan menghalangi pergerakan dari dislokasi sehingga terjadi mekanisme penguatan yang disebut *grain boundary strengthening*. Selain itu penghalusan butir menyebabkan peningkatan kekerasan paduan aluminium silikon. Gambar 2.13 memperlihatkan Perbandingan *hot tensile*



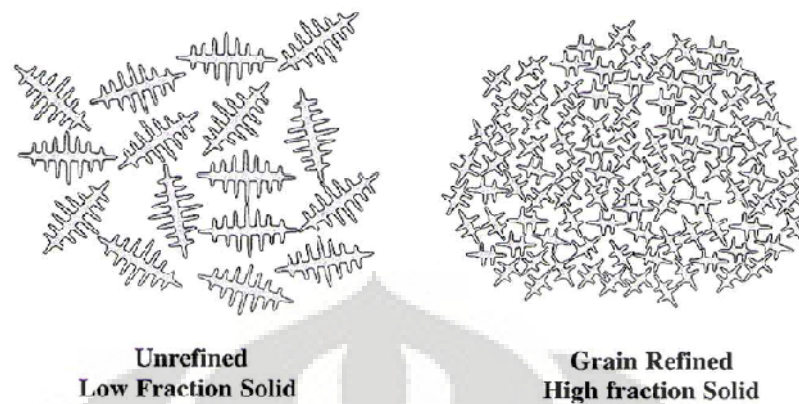
strength sampel *grain refined* dan *non- grain refined* pada paduan Al-0.5%Mg-0.4%Si.



**Gambar 2.13** Perbandingan *hot tensile strength* sampel *grain refined* dan *non- grain refined* pada paduan Al-0.5%Mg-0.4%Si<sup>[1]</sup>.

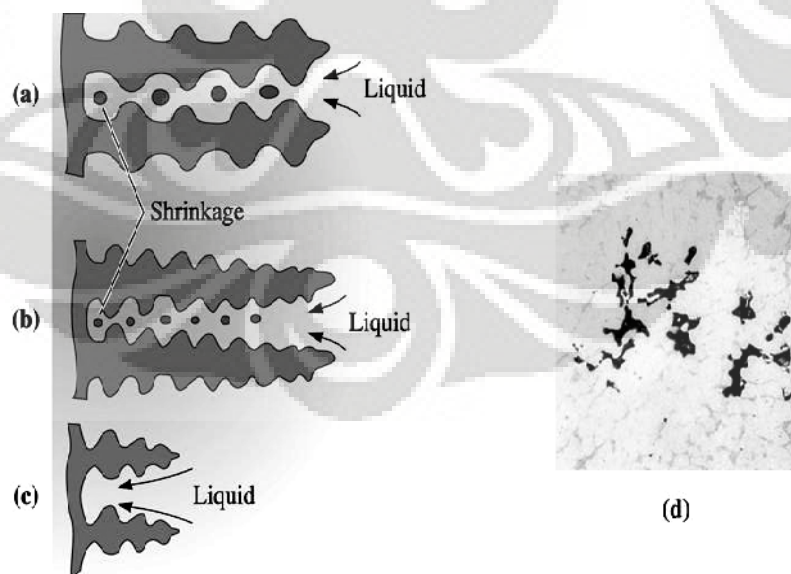
## 2) Kemampuan cor (*castability*)

Kemampuan cor (*castability*) akan meningkat dengan penambahan penghalus butir. Selama proses pengisian cetakan, pendinginan pada aluminium cair akan menghasilkan dendrit yang akan terbawa ke dalam cetakan. Dengan ukuran dendrit yang lebih halus maka jumlah fraksi padat akan meningkat. Hal ini akan membuat tumbukan antara lengan dendrit semakin kecil dan tahanan pergerakan aluminium cair berkurang seperti terlihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Perbedaan ukuran dendrit yang mempengaruhi nilai fraksi padatan<sup>[7]</sup>.

- 3) Kecenderungan *hot tearing* , penyusutan berkurang dan porositas terdistribusi  
 Dengan penambahan penghalus butir akan dihasilkan jaringan dendritik yang lebih halus, sehingga daerah yang terisolasi pada jaringan dendrit menjadi lebih kecil. Hal ini akan menyebabkan penyusutan dan porositas yang halus serta tersebar merata pada produk cor. Dengan penyusutan yang kecil tentunya resiko *hot tearing* menjadi berkurang. Gambar 2.15 mengilustrasikan *shrinkage porosity* pada dendrit dan struktur mikro dari *interdendritic porosity*.



Gambar 2. 15 (a)(b)(c) Ilustrasi *shrinkage porosity* pada dendrit aluminium, (d) struktur mikro dari *interdendritic porosity*<sup>[24]</sup>.

#### 4) Kemampuan permesinan

Dengan ukuran butir yang semakin halus, fasa kedua dan porositas terdistribusi secara lebih merata akan meningkatkan kemampuan permesinan dari material.

#### 5) Meningkatkan kemampuan *feeding*

Selama proses pembekuan, sangatlah penting untuk menyeimbangkan volume dari aluminium yang menyusut dengan memasok aluminium yang masih cair, atau yang disebut juga *feeding*. Dengan ukuran dendrit yang besar pada aluminium, tahanan terhadap mekanisme *feeding* akan terjadi lebih awal. Apabila mekanisme *feeding* terhalang atau terganggu maka akan terjadi penyusutan dan porositas yang besar pada prosuk cor. Dengan penambahan penghalus butir maka ukuran dendrit akan lebih halus sehingga *feeding* dapat berlangsung lebih lama<sup>[7]</sup>.

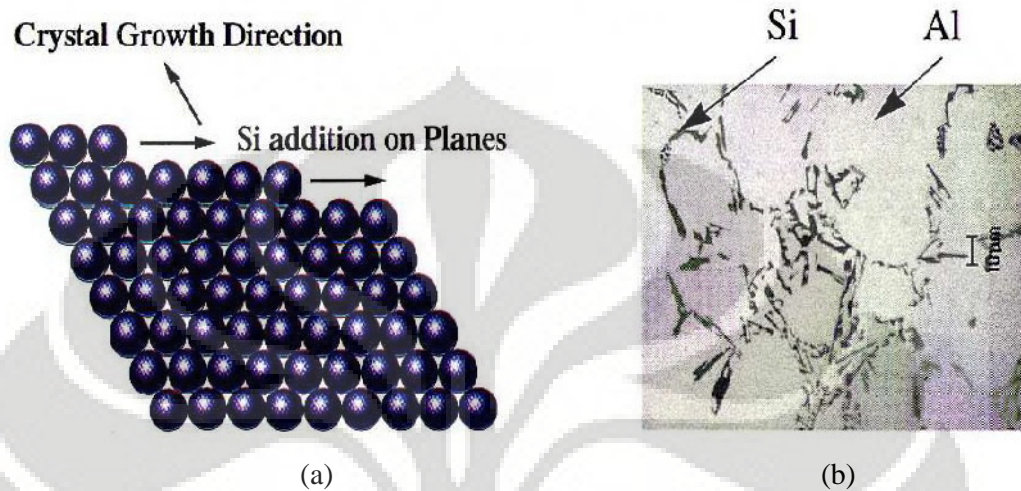
### 2.5 Modifikasi Eutektik

Pada tahun 1920, Aladar Pacs menemukan bahwa penghalusan atau modifikasi struktur mikro yang sama seperti yang diperoleh ketika pembekuan cepat terjadi ketika alkali flourida tertentu ditambahkan terlebih dahulu ke aluminium cair ketika akan dituang<sup>[3]</sup>. Modifikasi menggambarkan keadaan yang ditandai dengan adanya penghalusan dari struktur kristal silikon dalam aluminium-silikon eutektik. Dengan perlakuan modifikasi ini struktur kristal silikon yang tadinya berbentuk *acicular* akan berubah menjadi *fibrous* atau lamelar. *Modifier* yang berasal dari unsur – unsur golongan IA, IIA, dan unsur tanah jarang seperti stronsium (Sr) dan natrium (Na) untuk paduan aluminium-silikon hipoeutektik, sedangkan fosfor (P) dan antimoni untuk paduan aluminium-silikon hipereutektik<sup>[1]</sup>.

#### 2.5.1 Modifikasi pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B

Sifat dari aluminium-silikon hipoeutektik dapat diperbaiki dengan memodifikasi bentuk dari kristal silikon eutektik. Perilaku modifikasi pada paduan aluminium-silikon AC4B dilakukan dengan menambahkan *modifier* paduan Al-Si hipoeutektik. Dalam paduan aluminium-silikon, fasa silikon memegang peranan penting dalam proses pemodifikasian. Silikon adalah unsur

non logam dan memiliki bentuk kristal dalam paduan aluminium. Kristal silikon memiliki perilaku yang khusus saat berada dalam paduan Al-Si yang disebut *faceted manner* seperti terlihat pada Gambar 2.16. Maksudnya adalah kristal silikon hanya memiliki arah kristalografi tertentu dalam pertumbuhannya.



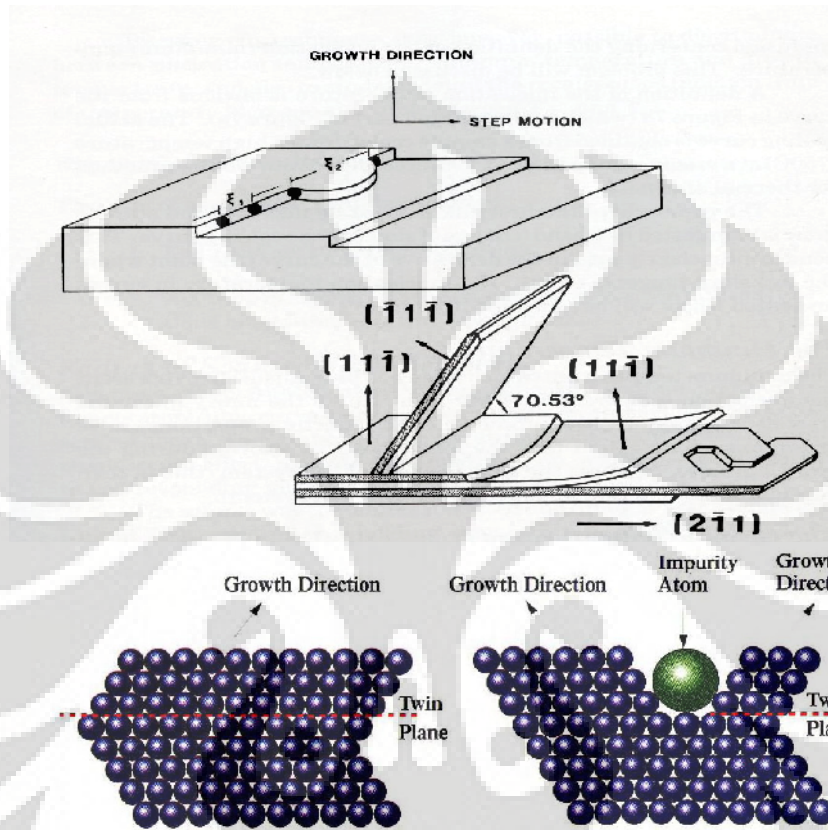
**Gambar 2. 16** Pertumbuhan dan pembentukan silikon *acicular* (a) pertumbuhan silikon, (b) silikon *acicular*<sup>[22]</sup>.

Kristal silikon memiliki arah bidang  $\langle 211 \rangle$ , dan arah pertumbuhan  $\langle 111 \rangle$ . Selain itu, silikon juga memiliki sifat lain yang unik, yaitu mudahnya terbentuk bidang kembar (*twinning*). Bidang ini merupakan salah satu bentuk cacat kristalografi yang dapat terbentuk pada saat sekumpulan atom silikon mengalami pergeseran posisi melewati suatu bidang kristalografi<sup>[13]</sup>.

Proses pembekuan, dapat diilustrasikan seperti bentuk anak tangga, dimana terjadi penambahan atom pada antar muka padat-cair yang berlangsung pada setiap arah pertumbuhannya<sup>[13]</sup>. Akibat dari fenomena ini, maka kemungkinan terjadinya cabang pada struktur kristal silikon sangat kecil. Gambar 2.15 menunjukkan secara skematik pada saat atom silikon tumbuh pada bidang dilihat dari arah sisi depan yang menyebabkan pada paduan yang tidak dimodifikasi akan terlihat kristal yang berbetuk pelat tajam yang biasa disebut *accicular*<sup>[22]</sup>.

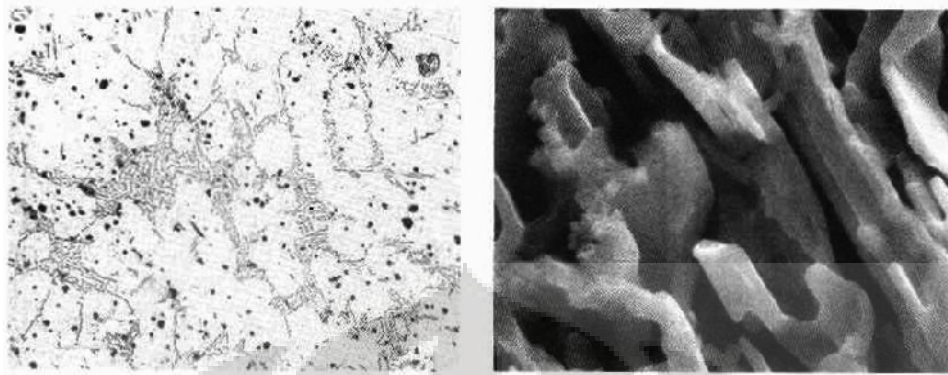
Pada saat ditambahkan *modifier*, dihasilkan struktur kristalografi dengan jumlah bidang kembar (*twinning*) yang lebih banyak daripada tanpa penambahan

*modifier*. Mekanisme modifikasi ini biasa disebut sebagai *impurity induced twinning* diperlihatkan Gambar 2.17, dimana secara singkat bahwa adanya elemen modifikasi akan mengganggu tahapan pertumbuhan silikon sehingga menyebabkan *twinning*.



**Gambar 2.17** Adsorpsi atom impurities pada tahapan pertumbuhan kristal silikon yang menyebabkan terjadinya mekanisme *twinning*<sup>[22][13]</sup>.

Dengan terjadinya banyak *twinning* menyebabkan terbentuknya banyak cabang pada kristal sehingga menghasilkan silikon *fibrous* dari paduan yang dimodifikasi. Pada Gambar 2.16 terlihat penambahan impurities yang merupakan *modifier* pada paduan. Ukuran dari atom impurities akan menjadi faktor yang menentukan apakah akan terjadi *twinning*<sup>[22][13]</sup>. Pada literatur dijelaskan bahwa elemen yang menjadi *modifier* harus memiliki afinitas dan persenyawaan dengan silikon. Hal ini akan memfasilitasi adsorpsi *modifier* pada permukaan kristal silikon. Selain mempengaruhi tahapan pertumbuhan kristal silikon, *modifier* juga menurunkan temperatur nukleasi dan temperatur dari silikon<sup>[13]</sup>.



**Gambar 2. 18** Silikon kasar akibat terjadinya overmodifikasi oleh stronsium (a) mikroskop optik (x400) (b) SEM (x2000)<sup>[1]</sup>.

Penambahan *modifier* sebaiknya dilakukan pada konsentrasi yang cukup untuk memodifikasi struktur kristal silikon eutektik. Apabila *modifier* ditambahkan pada level yang berlebih dari yang dibutuhkan untuk menghasilkan kristal silikon yang termodifikasi seluruhnya maka akan terjadi yang dinamakan overmodifikasi. Misalnya pada penambahan Na lebih dari 0.02 wt. % maka yang terjadi adanya penolakan Na pada daerah *interface* pembekuan. Hal ini menyebabkan terbentuknya fasa AlSiNa yang kemudian menjadi inti dari pertumbuhan kristal silikon yang kasar. Setelah terjadi pertumbuhan kristal silikon kemudian diselimuti oleh pertumbuhan aluminium primer dan selanjutnya akan menjadi tampilan pita overmodifikasi pada produk akhir cor<sup>[1]</sup>.

Pada overmodifikasi Sr akan terjadi dua fenomena. Yang pertama adalah terbentuknya silikon yang kembali menjadi bentuk jarum kasar dan reversi silikon fibrous yang halus menjadi bentuk plate kasar. Belum banyak penelitian yang mempelajari mengenai fenomena ini sehingga alasan pengkasaran kembali ini belum diketahui. Yang kedua adalah terbentuknya fasa intermetalik Al<sub>4</sub>SrSi sehingga menyebabkan tubuhnya silikon primer kasar yang saling terhubung. Kedua fenomena ini akan menyebabkan penurunan sifat mekanis. Penelitian mengenai peristiwa overmodifikasi cukup terbatas sehingga belum diketahui penyebab fenomena ini<sup>[1]</sup>. Gambar 2.18 memperlihatkan struktur silikon yang kembali menjadi kasar akibat terjadinya modifikasi oleh stronsium.

*Modifier* yang ditambahkan pada aluminium cair, secara berkala sifatnya akan memudar seiring dengan waktu. Peristiwa ini disebut dengan *fading*. Fenomena *fading* ini disebabkan oleh penguapan karena tekanan pada aluminium cair yang tinggi atau karena *modifier* ini teroksidasi<sup>[1]</sup>. *Modifier* juga bisa berikatan dengan unsur lain dalam bentuk persenyawaan sehingga tidak efektif lagi sebagai *modifier*. *Modifier* yang baik adalah dalam bentuk atom bebas.

### 2.5.2 Pengaruh Modifikasi pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B

Modifikasi yang dilakukan terhadap morfologi kristal silikon akan memberikan pengaruh terhadap karakteristik dari paduan. Berikut ini pengaruh yang terjadi akibat penambahan *modifier* pada paduan aluminium.

#### 1) Pengaruh modifikasi terhadap struktur mikro

Seperti telah dijelaskan pada bagian 2.5.1, modifikasi akan membuat kristal silikon yang tadinya *accicular* menjadi *fibrous* atau lamelar. Ada beberapa variabel yang menentukan struktur mikro akhir dari paduan Al-Si yang dimodifikasi, yaitu :<sup>[9]</sup>

- Jenis *modifier*

Kemampuan suatu unsur dalam memodifikasi akan berbeda satu sama lain. Misalnya pada stronsium dan natrium. Natrium akan menghasilkan mikrostruktur yang termodifikasi secara merata pada konsentrasi yang lebih rendah dibandingkan dengan stronsium.

- Keberadaan pengotor atau impuritis

Adanya impuritis akan mempengaruhi mudah atau tidaknya pemodifikasian mikrostruktur terjadi. Jenis impuritis yang mengganggu proses modifikasi adalah unsur fosfor dan antimoni. Namun mekanismenya masih belum diketahui.

- Jumlah *modifier*

Jumlah *modifier* yang semakin banyak akan menyebabkan struktur mikro yang semakin termodifikasi. Tetapi perlu dipertimbangkan juga akan terjadinya overmodifikasi jika penambahan *modifier* secara berlebihan. Untuk jumlah *modifier* Sr yang efektif adalah antara 0.01% - 0.02%<sup>[13]</sup>.

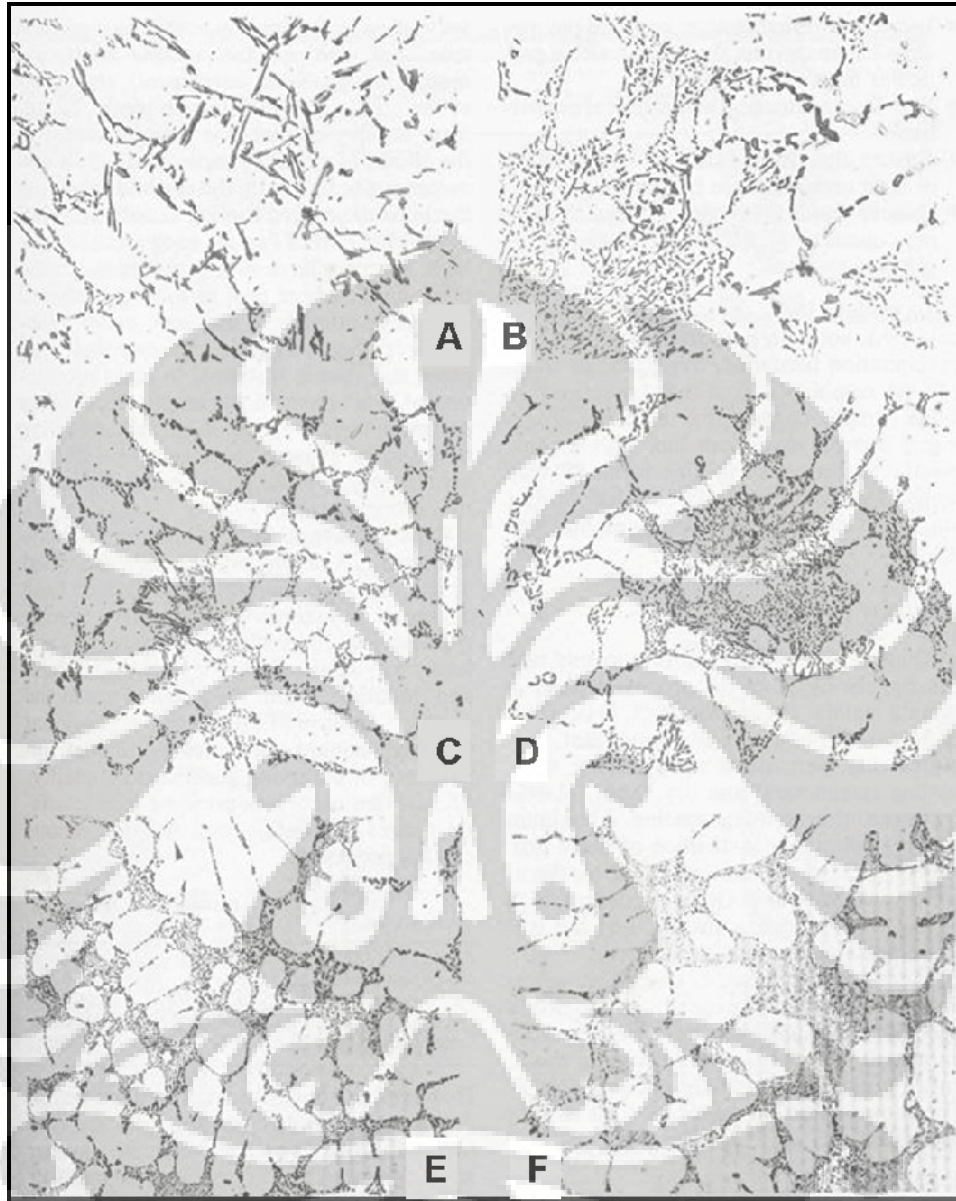
- Kecepatan pembekuan

Semakin besar nilai kecepatan pembekuan, maka semakin halus struktur mikro yang termodifikasi. Oleh sebab itu, *modifier* jarang sekali digunakan pada proses pengecoran dengan menggunakan *die casting*.

- Kandungan silikon

Kandungan silikon dalam suatu paduan akan mempengaruhi banyaknya *modifier* yang diperlukan untuk dapat memodifikasi struktur silikon tersebut. Sehingga semakin besar kandungan silikon dalam paduan akan membutuhkan kandungan *modifier* yang juga semakin besar. Hasil modifikasi pada silikon yang mungkin terjadi pada paduan hipoeutektik diperlihatkan pada Gambar 2.9. Struktur ini memiliki tingkatan dimana pada kelas E memiliki struktur yang termodifikasi paling baik. Sedangkan struktur yang sangat halus (*supermodified*) terjadi pada kelas F<sup>[13]</sup>.





**Gambar 2. 19** Tingkat pengaruh modifikasi<sup>[15]</sup>, (A) tidak termodifikasi ; (F) termodifikasi sempurna

2) Pengaruh modifikasi terhadap sifat mekanis

Dengan dilakukannya modifikasi, kristal silikon yang awalnya berupa pelat kasar berubah menjadi bentuk yang halus. Hal ini tentu akan berakibat terhadap sifat mekanis dari paduan. Struktur pelat yang kasar dan tajam akan menjadi potensi terjadinya konsentrasi tegangan sehingga material dengan struktur ini cenderung getas. Dengan berubah menjadi struktur *fibrous* yang

**Universitas Indonesia**

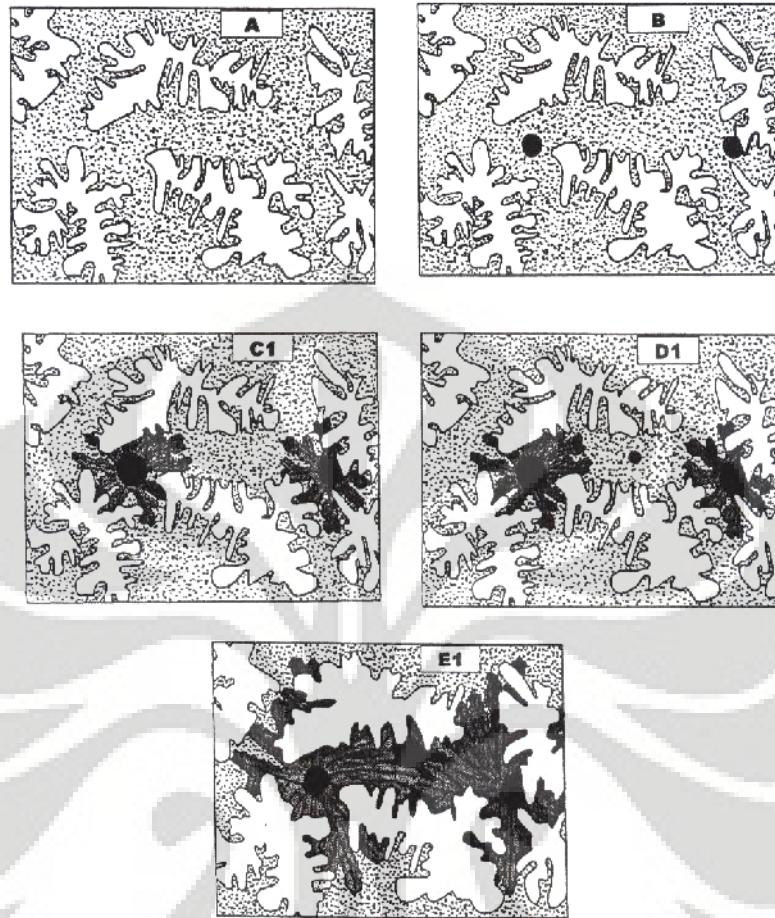
lebih halus akan meningkatkan nilai keuletan serta nilai UTS. Pengaruh *modifier* terhadap nilai kekerasan berbeda-beda pada banyak literatur. Secara teoritis, seharusnya penambahan stronsium yang dapat mengubah struktur mikro menjadi lebih halus akan meningkatkan nilai kekerasan dari aluminium paduan tersebut<sup>[2]</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.

### 3) Porositas

Perlakuan modifikasi dengan Sr dapat meningkatkan kandungan hidrogen pada aluminium cair dengan satu atau kombinasi mekanisme antara lain<sup>[1]</sup>:

- masuknya hidrogen secara langsung ke aluminium cair bersamaan dengan *modifier*;
- peningkatan laju penyerapan hidrogen oleh aluminium cair yang termodifikasi;
- peningkatan kelarutan hidrogen dari aluminium cair yang termodifikasi.

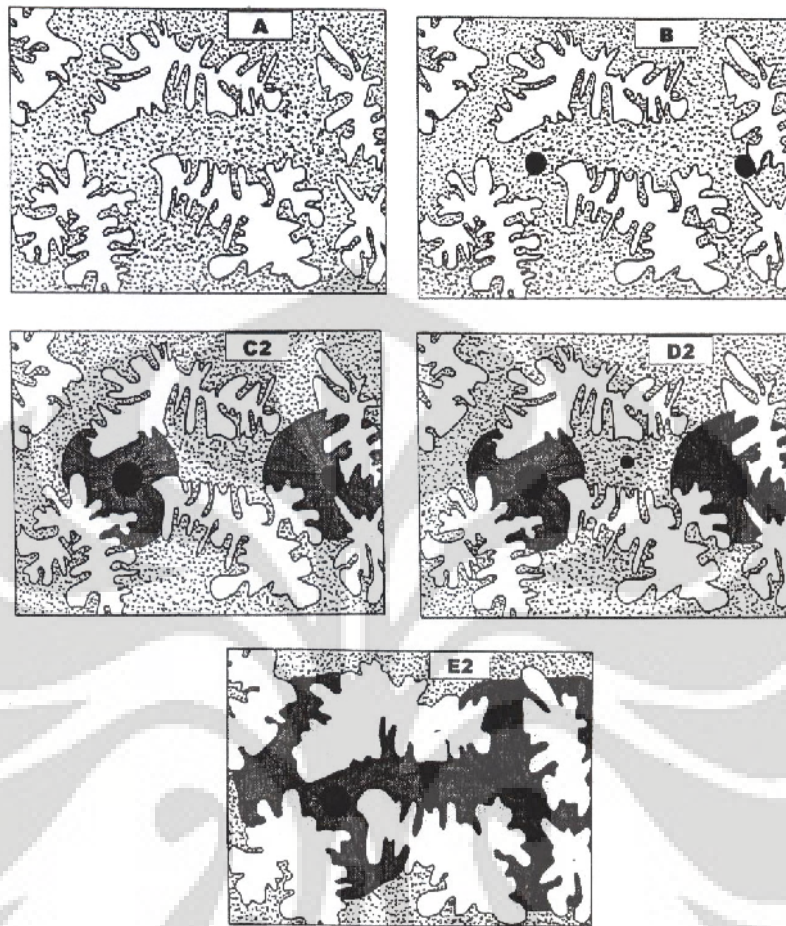
Mekanisme yang terakhir disadari tidak berperan penting karena kandungan hidrogen pada aluminium cair tidak pernah mencapai batas kelarutan. Pada beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa penambahan *modifier* stronsium pada paduan aluminium-silikon hipoeutektik meningkatkan jumlah porositas makro (namun tetap terdispersi merata). Hal ini dapat disebabkan oleh turunnya tegangan permukaan aluminium cair sehingga membuat permukaan luar dari aluminium cair lebih lebih encer, hal ini memudahkan larutnya hidrogen<sup>[28]</sup>. Selain itu terbentuknya lapisan oksida  $\text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  pada aluminium cair tidak bersifat protektif akibat penambahan stronsium. Pembentukan lapisan oksida ini mengakibatkan gas hidrogen mudah masuk ke dalam aluminium cair<sup>[29]</sup>. Mekanisme pembentukan porositas pada saat solidifikasi diperlihatkan pada Gambar 2.20 dan setelah ditambahkan *modifier* diperlihatkan pada Gambar 2.21.



**Gambar 2. 20** Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi<sup>[34]</sup>.

Ket :

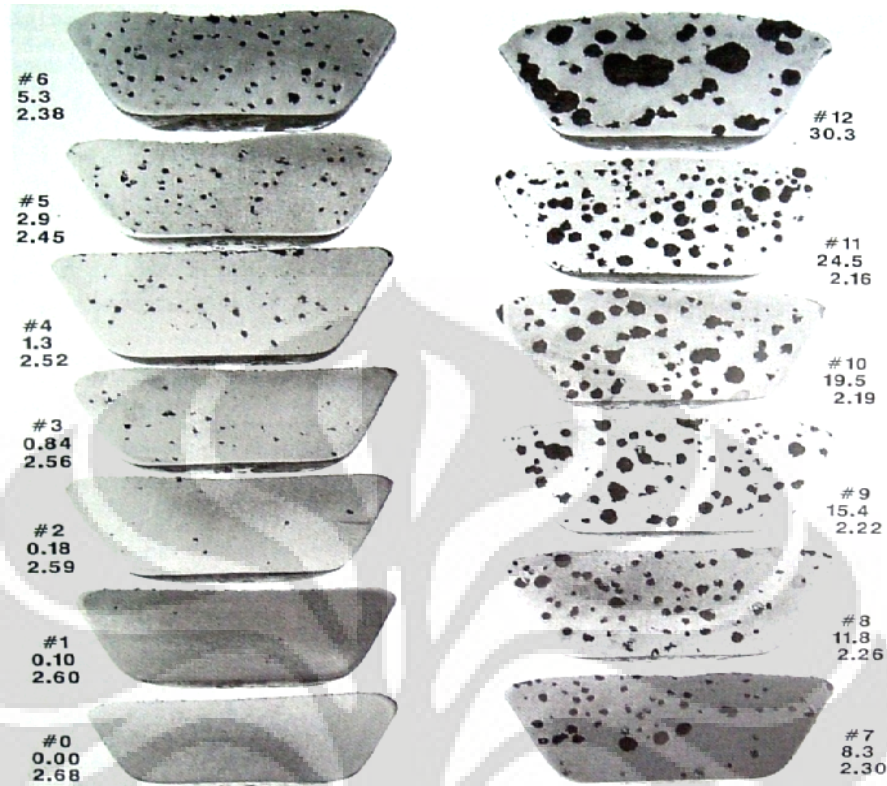
- A : Kondisi sebelum solidifikasi eutektik (dendrit -Al dan *liquid*)
- B : Porositas muncul pada bagian interdendritik
- C : Pertumbuhan porositas dipengaruhi oleh bentuk dendrit dan fasa eutektik
- D : penyusunan dari porositas baru pada *intercellular liquid*
- E : Hasil akhir terbentuk porositas dengan bentuk *irregular* dan bercabang-cabang



Gambar 2. 21 Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi<sup>[34]</sup>.

Ket :

- A : Kondisi sebelum solidifikasi eutektik (dendrit -Al dan *liquid*)
- B : Porositas berbentuk bulat mulai muncul sebelum solidifikasi eutektik
- C : Fasa eutektik mulai tumbuh, porositas dikelilingi oleh fasa eutektik dan mempengaruhi bentuk porositas
- D & E : Porositas bulat terus bernukleasi pada bagian *intercellular* menghasilkan porositas *irregular* sebagian



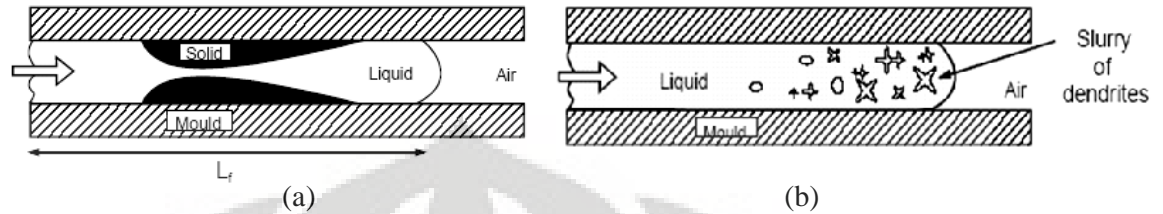
Gambar 2. 22 Perbandingan tingkat porositas<sup>[12]</sup>.

Sebelum dimodifikasi, porositas terdistribusi kebanyakan pada bagian tebal benda cor dan memiliki bentuk yang tidak beraturan (*irregular*). Setelah dimodifikasi, porositas terdistribusi merata (terdispersi) pada seluruh bagian benda cor dan memiliki bentuk yang bulat<sup>[29]</sup>. Gambar 2.21 menunjukkan modifikasi terhadap porositas. ASM standar mengelompokkan porositas dalam beberapa tingkatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.22.

#### 4) Fluiditas

Fluiditas logam cair memegang peranan penting terhadap kualitas dari benda cor yang dihasilkan khususnya berkaitan dengan cacat-cacat yang sering terjadi pada benda cor yang sangat tidak diinginkan. Fluiditas adalah sifat mampu alir dari logam cair yaitu kemampuan logam cair untuk mengisi rongga-rongga cetakan dalam proses pengecoran logam. Satuan dalam pengukuran fluiditas berupa ukuran panjang berupa cm atau inch<sup>[30]</sup>. Paduan yang memiliki fluiditas yang baik adalah paduan dengan kisaran pembekuan pendek, sedangkan paduan dengan range pembekuan panjang memiliki

fluiditas yang buruk. Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi diperlihatkan Gambar 2.23.



**Gambar 2. 23** Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi<sup>[31]</sup>.

- Kisaran pembekuan pendek  
Pada aliran logam paduan dengan kisaran pembekuan pendek, solidifikasi dimulai dari bagian dinding menuju ketengah logam cair. Bagian ini akan mengalami remelting secara terus-menerus hingga bagian yang membeku pada kedua sisi bertemu. Saat kondisi ini tercapai aliran berhenti.
- Kisaran pembekuan panjang  
Mekanisme solidifikasi aliran pada paduan dengan kisaran pembekuan panjang 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 remelting dan terbentuk fasa lumpur berupa serpihan dendrit.

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. Sedangkan kondisi pengecoran yang dimaksud adalah temperatur, tekanan, kecepatan pengecoran, jenis material cetakan dan karakteristik permukaan cetakan<sup>[28]</sup>. Penambahan *modifier* pada paduan Al-Si memiliki memperbaiki fluiditas dari logam cair. *Modifier* akan berperan dengan menurunkan temperatur eutektik nukleasi dan

temperatur pertumbuhan. Hal ini akan membuat kisaran pembekuan menjadi lebih pendek sehingga diperoleh peningkatan fluiditas<sup>[13]</sup>.

### 2.5.3 Modifier Stronsium

Stronsium bisa ditambahkan ke dalam paduan Al-Si baik sebagai logam murni maupun dalam bentuk master alloy. Proses penambahan *modifier* Sr pada suatu proses pengecoran umumnya menggunakan *master alloy* yang mengandung 10 % Sr. Penambahan menggunakan Sr murni memiliki beberapa keterbatasan karena logam akan mudah teroksidasi dalam atmosfer yang lembab dan dengan adanya lapisan oksida dapat menghambat kecepatan pelarutan stronsium ke dalam logam cair.

Pada tahun 1975 stronsium diperkenalkan sebagai unsur yang dapat memodifikasi paduan Al-Si. Penggunaan Sr biasanya digunakan pada paduan Al-Si hipoeutektik, bertujuan untuk merubah bentuk silikon eutektik dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*. Perubahan bentuk ini menyebabkan perubahan sifat mekanis paduan aluminium tuang<sup>[5]</sup>.

Seperti dijelaskan pada bagian 2.5.1 bahwa penambahan *modifier* akan mempengaruhi tahapan pertumbuhan kristal silikon, menurunkan temperatur nukleasi dan temperatur pertumbuhan kristal silikon. Penambahan stronsium juga akan mempengaruhi temperatur solidifikasi eutektik seperti pada Gambar 2.24, dan dapat diketahui :

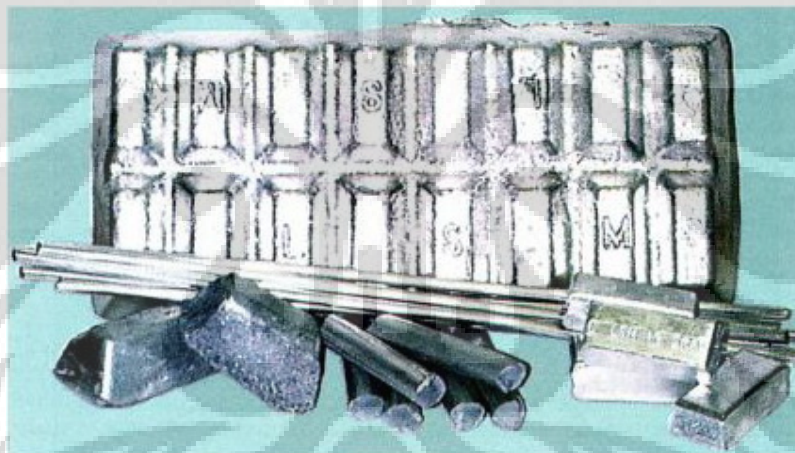
- Terjadi penurunan temperatur nukleasi dan temperatur pertumbuhan sekitar 10 °C
- Temperatur nukleasi mencapai titik minimum setelah ½ sampai 2 jam
- Setelah tercapai kondisi modifikasi optimum, grafik solidifikasi menjadi lebih datar. Setelah efek memudar (efek *fading*), temperatur nukleasi dan pertumbuhan kembali.

Stronsium memiliki waktu *fading* yang lebih lama dibandingkan dengan natrium. Selain itu mekanisme memudar Sr juga berbeda dengan natrium. Penyebab utama

*fading* dari Sr karena Sr akan teroksidasi. Berdasarkan banyak penelitian diketahui bahwa kadar stronsium yang efektif dalam memodifikasi paduan Al-Si adalah antara 0.01-0.02 wt % Sr<sup>[13]</sup>

**Tabel 2. 6** Bentuk dan komposisi modifier stronsium <sup>[5]</sup>

Alloy	Komposisi	Sumber Sr	Bentuk
A	Al-90 % Sr	mumi	Rod, can
B	Al-3.5% Sr	mumi	Rod, can
C	Al-5% Sr	mumi	Rod, waffle
D	Al-10% Sr	mumi	Waffle, buttons
E	Al-10% Sr-1% Ti	mumi	Rod
F	Al-10% Sr-14% Si	Sr2Si	Waffle, buttons



**Gambar 2. 24** Master alloy stronsium yang tersedia secara komersial<sup>[22]</sup>.

Berbagai jenis paduan stronsium sebagai *modifier* dapat dilihat pada Tabel 2.6 dan Gambar 2.24. *Modifier* dapat ditambahkan dengan meletakkan pada bagian dapur pada bagian bawah melting, ataupun dimasukkan setelah aluminium telah cair, tetapi mengingat bahwa stronsium dapat bereaksi dengan *chlorine* atau *fluorine* dari *flux* sebaiknya penambahan stronsium setelah dilakukan perlakuan yang dapat menghilangkan kandungan *chlorine* tadi misalnya dilakukan GBF (*gas bubble flotation*) terlebih dahulu. Setelah proses ini selesai maka penambahan *modifier* dapat dilakukan<sup>[22]</sup>.



## 2.6 Penggabungan Penghalus Butir AlTiB Dan *Modifier* Sr

Struktur mikro dari suatu material akan mempengaruhi karakteristik dari material tersebut. Pada struktur mikro Al-Si hipoeutektik akan ditemui fasa-fasa seperti fasa  $\beta$ -Al, fasa eutektik serta adanya fasa intermetalik yang timbul akibat adanya unsur lain yang melebihi batas kelarutannya dalam material. Dalam dunia pengecoran aluminium perlakuan yang dapat dilakukan untuk meningkatkan karakteristik paduan aluminium yaitu dengan pemberian penghalus butir serta penambahan unsur modifikasi. Dengan melakukan perlakuan masing-masing diatas telah diketahui bahwa akan didapatkan hasil yang cukup baik dimana terjadi peningkatan dari karakteristik paduan aluminium seperti peningkatan terhadap sifat mekanis. Selanjutnya dilakukan penelitian untuk mengetahui efek penggabungan dari penghalusan butir serta penambahan *modifier* secara bersamaan.

Pada paduan A356, penambahan penghalus butir didapatkan bahwa terjadi kenaikan pada temperatur nukleasi  $\beta$ -Al ( $T_N$ ) sekitar 4-5 °C, sementara penambahan *modifier* Sr menurunkan temperatur eutektik (TE) sekitar 7-8 °C. Maka jika keduanya dikombinasikan, akan mengakibatkan peningkatan sekitar 11-13 °C dari kisaran solidifikasi atau perbedaan temperatur nukleasi  $\beta$ -Al ke temperatur eutektik. Penambahan sejumlah kecil Ti dan B akan menyebabkan pergeseran kurva pendinginan ke atas. Penambahan penghalus butir akan mempercepat nukleasi  $\beta$ -Al primer karena adanya inti yang meningkat walaupun peningkatan tersebut lebih besar pada kasus nukleasi. Hal tersebut mengindikasikan ada lebih banyak inti dengan kesempatan tumbuh yang rendah pada waktu yang diberikan selama proses nukleasi dan pertumbuhan awal fasa  $\beta$ -Al. Perubahan pada parameter temperatur eutektik merupakan hal yang sama baik bagi masing-masing ataupun kombinasi kedua perlakuan tersebut, yang mengindikasikan bahwa penghalus butir dan *modifier* tersebut bisa bertindak sendiri selama proses solidifikasi<sup>[32]</sup>.

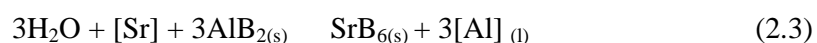
### 2.6.1 Interaksi antara penghalus butir dan *modifier*

Beberapa penelitian dilakukan untuk mempelajari kemungkinan adanya efek pencemaran (*poisoning*) yang diduga akibat adanya interaksi antara

penghalus butir dan *modifier* yang menyebabkan terjadinya efek tereduksinya keefektifan dari masing-masing zat tadi. Behnam Golbahar<sup>[32]</sup> mempelajari mengenai efek interaksi antara Sr dan Ti terhadap performa paduan A356.2. Dalam penelitian ini tidak ditemukan sesuatu yang menandakan terjadinya interaksi antara Sr-Ti pada jangkauan kandungan Ti tertentu. Interaksi yang terjadi antara Sr-B membentuk SrB<sub>6</sub>. Interaksi antara Sr-B tidak signifikan pada penambahan Al-Ti-B dengan kandungan yang rendah. L. Lu<sup>[33]</sup> mengamati pengaruh penambahan Sr dan AlTiB pada pembekuan Al + Si eutektik dan Al primer. Lu mendapati bahwa struktur termodifikasi dengan baik serta halus akan didapat saat penambahan penghalus butir pada kadar rendah. Tidak ditemukan pula efek poisoning antara Sr dan Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B meskipun pada level penambahan penghalus butir yang tinggi. Terjadinya pengkasaran kembali dari silikon eutektik secara kumulatif dipercayai karena kehilangan Sr akibat adanya oksidasi dan penguapan dari Sr<sup>[33]</sup>.

Hengcheng *et al*<sup>[34]</sup> mengemukakan bahwa dengan penambahan *master alloy* Al-5Ti-1B menyebabkan poisoning pada efek modifikasi Sr terhadap kristal silikon eutektik. Hal tersebut dikarenakan adanya interaksi antara Ti dan Sr dimana Ti mengkonsumsi Sr sehingga hasilnya terjadi penurunan Sr efektif dalam cairan aluminium AC4B. Terbentuknya partikel yang sangat halus yang mengandung Ti, Sr, Si dan Al menjelaskan terjadinya penurunan kandungan Sr dan Ti efektif untuk modifikasi dan penghalusan butir.

Liao dan Sun<sup>[34]</sup> melalui studinya menyatakan bahwa pada paduan sekitar eutektik, efek penghalusan dari boron akan berkurang dengan adanya penambahan stronsium, dengan kata lain, kemampuan boron untuk menghaluskan butir telah tercemar oleh stronsium. Efek pencemaran juga bisa diamati jika kandungan stronsium dan boron melebihi batas tertentu, dimana nantinya efek penghalusan dari boron dan modifikasi dari stronsium akan berkurang. Interaksi ini bisa dihubungkan dengan adanya pembentukan senyawa 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:



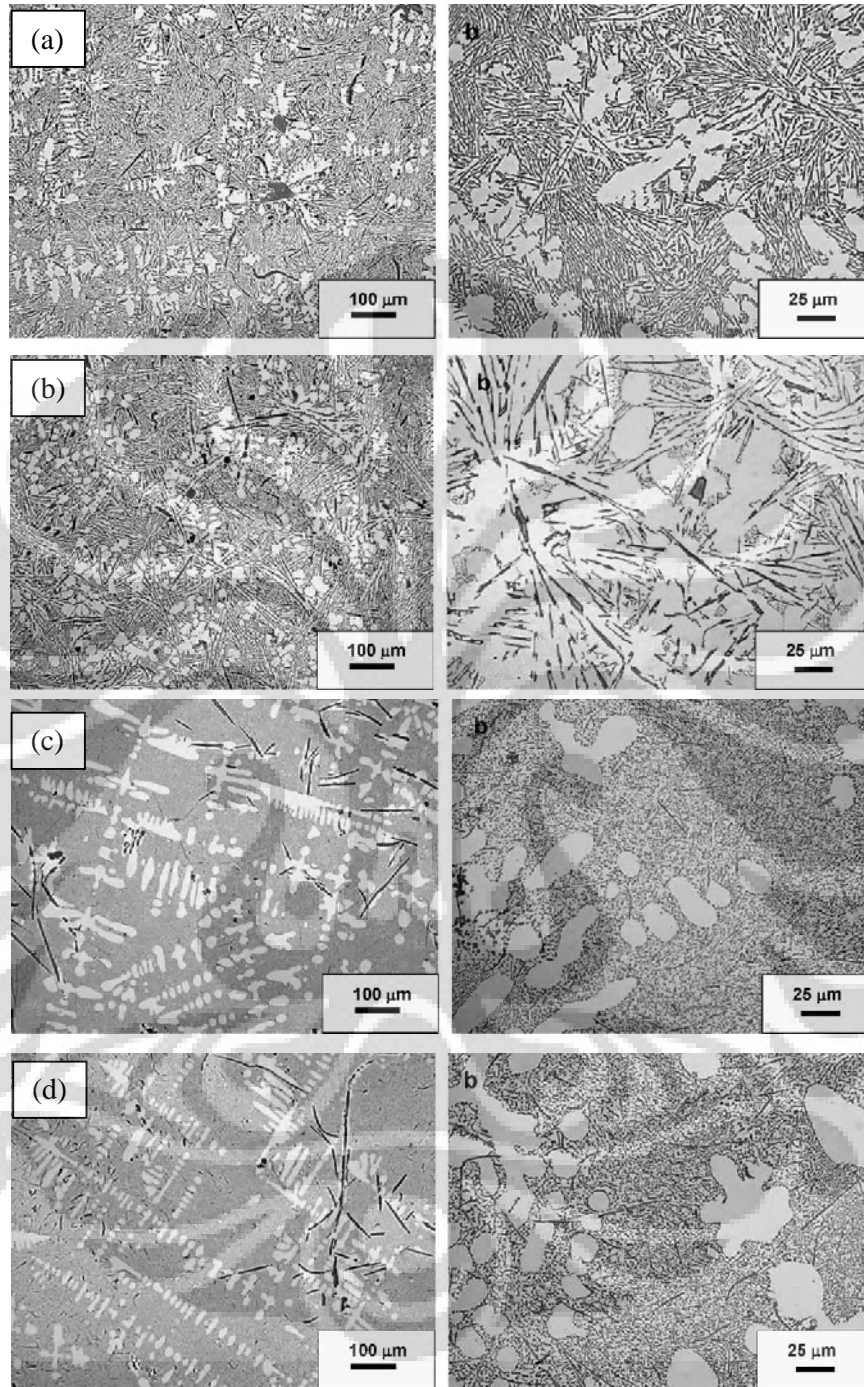
Partikel  $\text{SrB}_6$  yang terbentuk memiliki berat jenis yang tinggi sekitar  $3.422 \text{ g/cm}^3$  dan kemudian akan mengendap di bagian bawah cairan. Partikel  $\text{SrB}_6$  tersebut akan terus tumbuh ketika mengendap. Sebagai hasilnya, maka senyawa intermetalik yang kaya akan stronsium dan boron akan berada dilapisan pada bagian bawah logam cair dan tentunya kadar stronsium dalam logam cair akan menurun secara drastis<sup>[34]</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.

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

#### 1) Pengaruh terhadap struktur mikro

Juan Asensio-Lozano *et al*<sup>[35]</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 *master alloy* Al-3Ti-1B memiliki pengaruh yang cukup baik pada penghalusan dendrit dari fasa  $\beta$ -Al. Penambahan Ti meningkatkan fraksi volume dari fasa  $\beta$ -Al dan *primary silicon cuboids* serta menghaluskan ukuran butir. Penambahan *master alloy* Al-10Sr akan meningkatkan fraksi volume dari dendrit  $\beta$ -Al primer. Pada Gambar 2.25 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 kolomar serta meningkatkan struktur *cellular*. Penambahan Ti pada paduan dengan modifikasi Sr akan memberikan efek pada transisi kolomar-*cellular* struktur butir, meskipun masih terlihat adanya campuran keduanya. Penambahan Sr akan mentransformasi struktur silikon eutektik menjadi *fibrous* yang seragam dan terdistribusi.



**Gambar 2. 25** Struktur mikro dari paduan Al-12Si<sup>[2]</sup> (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.

## 2) Pengaruh terhadap nilai SDAS

A.K Prasada Rao *et al*<sup>[36]</sup> melakukan penelitian terhadap paduan Al-7Si dengan kombinasi antara penambahan penghalus butir serta *modifier*. Pengamatan dilakukan besarnya nilai SDAS (*Secondary Dendrite Arm Spacing*). Tabel 2.7 memperlihatkan pengaruh penambahan *grain refiner* dan *modifier* terhadap nilai SDAS. Nilai SDAS akan menggambarkan besarnya dendrit -Al yang ada. Semakin besar nilai SDAS akan menggambarkan semakin besarnya jarak antara dua lengan dendrit utama dalam material.

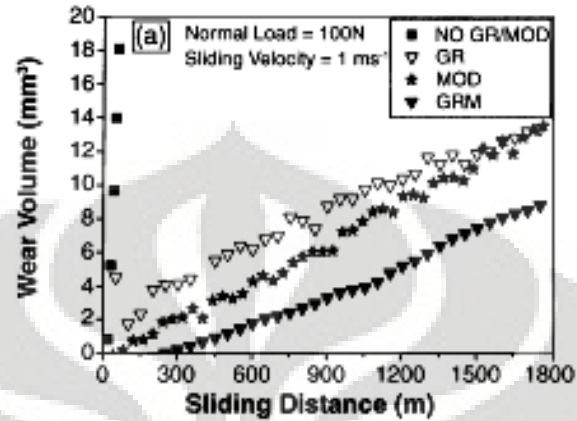
**Tabel 2. 7** Pengaruh penambahan penghalus butir dan/atau *modifier* terhadap SDAS Al-7Si<sup>[36]</sup>

Penambahan pada Al-7Si		
<i>grain refiner</i>	<i>modifier</i>	SDAS
-	-	60 $\mu\text{m}$
Al-1Ti-3B	-	24 $\mu\text{m}$
-	0,02%Sr	51 $\mu\text{m}$
Al-1Ti-3B	0,02%Sr	22 $\mu\text{m}$

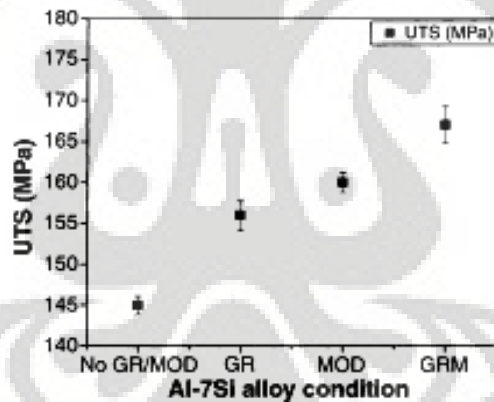
## 3) Pengaruh terhadap sifat mekanis

A.K Prasada Rao *et al*<sup>[36]</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 volume aus specimen dengan penggabungan penghalus butir dan *modifier* memiliki nilai yang paling rendah jika dibandingkan dengan lainnya. Gambar 2.26 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 2.27 terlihat bahwa paduan dengan penambahan penghalus butir dan *modifier* memiliki nilai UTS yang paling tinggi<sup>[36]</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. 26** Pengaruh penambahan penghalus butir dan *modifier* terhadap ketahanan aus paduan Al-7Si<sup>[36]</sup>.



**Gambar 2. 27** Pengaruh penambahan penghalus butir dan *modifier* terhadap kekuatan tarik paduan Al-7Si<sup>[36]</sup>.

#### 4) Efek Terhadap Porositas

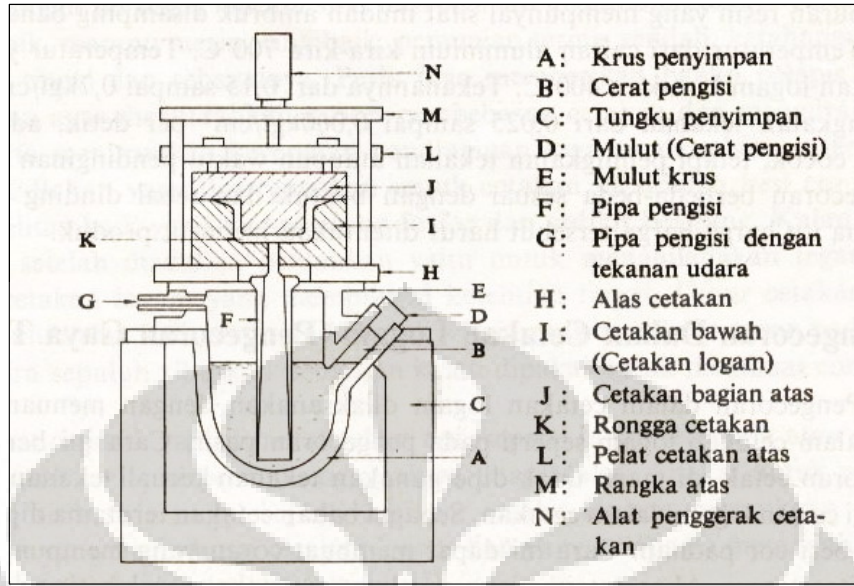
Shivkumar<sup>[37]</sup> menemukan bahwa jumlah porositas dalam paduan yang mengkombinasikan modifikasi dan penghalus butir lebih sedikit dari paduan yang hanya dimodifikasi saja tapi lebih banyak dari pada paduan yang dilakukan proses penghalusan butir saja.

## 2.7 Low Pressure Die Casting

*Die casting* adalah salah satu metode pengecoran dengan menggunakan cetakan logam dan metode ini adalah cara yang tercepat dalam hal waktu untuk memproduksi part casting dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan pengecoran cetakan pasir. Proses *die casting* dilakukan dengan memberikan tekanan pada aluminium cair metal sehingga melewati rongga atau celah dari cetakan (cetakan)<sup>[20]</sup>. *Low pressure die casting* (LPDC) merupakan proses pengecoran dengan menggunakan cetakan permanen (*cetakan*) yang biasa diaplikasikan untuk pengecoran logam-logam dengan temperatur lebur tidak terlalu tinggi, contohnya aluminium, timah dan seng. Penamaan “*low pressure die casting*” berhubungan dengan mekanisme dan kondisi pengecoran yang terjadi.

Proses *low pressure die casting* (LPDC) menggunakan cetakan permanen yang menggunakan material *tool steel*. Pada bagian bawah dari alat ini terdapat *holding furnace* yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan aluminium cair yang akan dicor. Cetakan logam berada pada bagian atas. Parameter parameter yang mempengaruhi hasil dari *low pressure die casting* ini adalah besarnya tekanan yang diberikan kepada logam cair, dan gradien termal, yang berperan dalam membentuk pembekuan terarah. Karena kebanyakan *low pressure die casting* mempunyai satu jalan masuk cairan logam maka proses pemotongan saluran tuang bisa diminimalisasi. Gambar 2.28 memperlihatkan konstruksi dari mesin *low pressure die casting*.

Proses LPDC menggunakan tekanan yang tidak terlalu tinggi (2-15 psi) untuk menekan aluminium cair dibagian *holding furnace* sehingga mengakibatkan aluminium cair naik ke atas melalui bagian *fill stalk* (seperti pipa) menuju cetakan dan akhirnya logam cair mengisi cetakan. Bagian cetakan memiliki dua bagian yaitu *cup* dan *drug* dimana bagian *cup* dapat bergerak naik ke atas untuk membuka cetakan sehingga produk cor dapat dikeluarkan<sup>[20]</sup>.



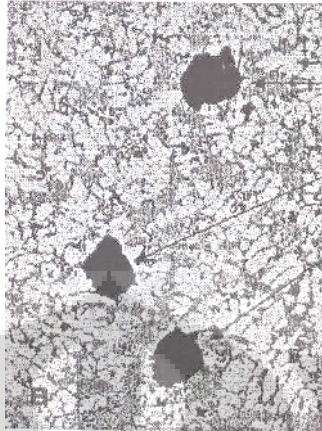
Gambar 2. 28 Konstruksi mesin *low pressure die casting* <sup>[38]</sup>.

Cacat seringkali terjadi pada produk hasil *low pressure die casting*. Cacat ini berupa kerusakan atau kesalahan yang terjadi pada benda cor yang menyebabkan ditolakny benda cor tersebut oleh konsumen (*reject*). Beberapa jenis cacat yang seringkali ditemui dalam produk hasil *low pressure die casting* yaitu :

1) Cacat porositas

Pada Gambar 2.29 diperlihatkan cacat porositas pada paduan aluminium. Cacat porositas biasanya disebabkan oleh terperangkapnya gas dalam logam cair waktu proses pengecoran. Pada benda cor terdapat lubang-lubang baik pada permukaan baik pada permukaan maupun bagian dalam benda cor. Jenis cacat porositas yang banyak terjadi adalah *pinholes* atau *blister*<sup>[20]</sup>. Pada aluminium, kebanyakan porositas merupakan kombinasi dari *shrinkage* dan gas hidrogen. Selama pembekuan aluminium akan berkontraksi. Ketidakmampuan logam cair untuk melakukan *feeding* melalui daerah interdendritik menyebabkan aluminium cair dikelilingi padatan dan terperangkap di dalamnya, hal ini menyebabkan *shrinkage*. Di sisi lain, kelarutan gas hidrogen juga berkurang, proses pembebasan gas hidrogen selama pembekuan tersebut menyebabkan porositas pula<sup>[39]</sup>.





Gambar 2. 29 Porositas pada aluminium<sup>[29]</sup>.

## 2) Cacat *shrinkage*

Ketika logam cair membeku ke temperatur kamar akan terjadi penyusutan volume. Pada paduan aluminium, volume penyusutan yang terjadi selama pembekuan berkisar antara 3.5–8.5 %. Penyebab dari *shrinkage* ini antara lain adalah adanya perbedaan ketebalan benda cor yang terlalu besar sehingga terdapat bagian tebal yang tidak dapat dialiri logam cair secara utuh. *Shrinkage* pada produk aluminium terdapat dalam dua jenis yaitu *cavity* (rongga) dan *pipe* (pipa) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.30. Tipe pipa ditandai dengan rongga kasar yang tertarik ke dalam bagian yang tebal sedangkan tipe rongga terdapat di dalam bagian yang tebal<sup>[24]</sup>. Tipe rongga tidak terlihat dari luar namun kadang dapat diketahui dengan adanya lubang kecil pada bagian tebal yang jika dibelah merupakan rongga kasar pula.



Gambar 2. 30 Dua jenis *shrinkage*<sup>[24]</sup>.

### 3) Cacat misrun

Misrun merupakan suatu cacat yang terjadi karena logam cair tidak mengisi seluruh rongga cetakan sehingga benda cor menjadi tidak lengkap atau ada bagian yang hilang dari benda cor<sup>[20]</sup>. Ada dua tanda misrun yang bisa dikenali pada produk aluminium. Misrun pada produk aluminium dapat terlihat sebagai lubang pada bagian yang tipis. Sisi-sisi lubang tersebut cembung dan halus serta daerah di sekelilingnya juga halus dan mengkilat. Misrun juga bisa terlihat sebagai garis cekung pada pinggir bagian yang tipis yang menunjukkan adanya dua aliran aluminium cair yang belum sempat bertemu.

Penyebab terjadinya misrun antara lain<sup>[20]</sup>:

- Fluiditas cairan logam yang kurang baik
- Temperatur tuang yang terlalu rendah
- Sistem ventilasi yang bermasalah
- *Coating* yang terlalu tipis
- Penempatan saluran masuk yang kurang tepat
- Penambah (*riser*) yang kurang sempurna

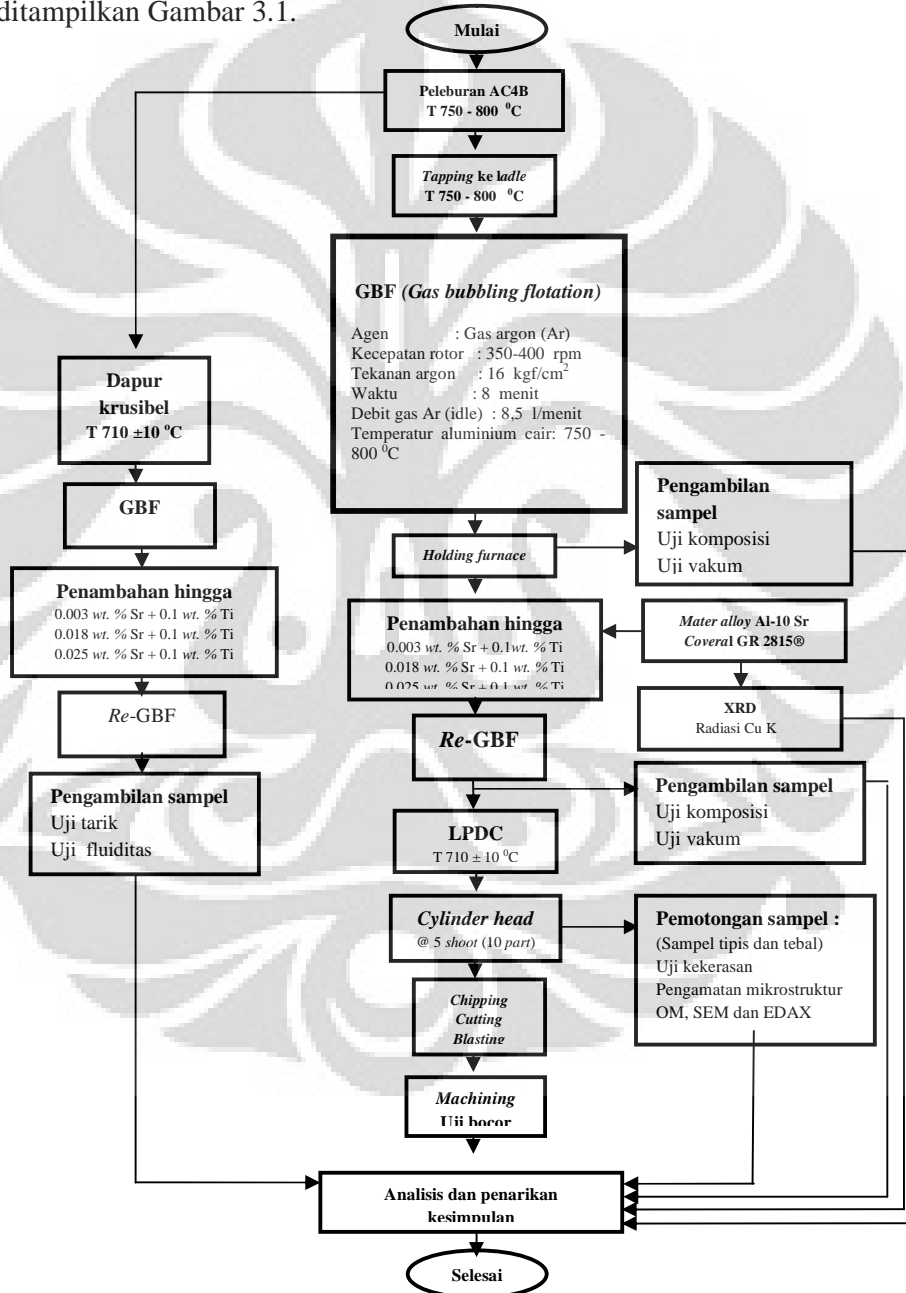
### 4) Cacat retak panas

*Tearing/hot cracking* terjadi selama pembekuan jika sejumlah besar *shrinkage* terjadi (biasa juga disebut *hot shortness* = intergranular)<sup>[20]</sup>. Penyusutan selama pembekuan dan kontraksi termal dapat menyebabkan adanya tegangan yang signifikan. Karena hal tersebut, retak dapat terjadi pada bagian-bagian dengan kekuatan yang masih rendah. Pada daerah yang demikian biasanya logam belum semuanya membeku dan terjadi *hot spot*. Retak panas pada produk aluminium dapat terlihat sebagai garis-garis hitam kasar yang terlihat di permukaan. Retak panas kebanyakan terlihat pada bagian-bagian bersudut pada benda casting.

## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan tahapan untuk menghasilkan komponen *cylinder head* sebagai sampel pengujian serta sampel uji lainnya dengan tahapan seperti yang ditampilkan Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.

### 3.2 Bahan Dan Peralatan

#### 3.2.1 Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan:

- 1) *Ingot* paduan aluminium AC4B,
- 2) *Scrap* paduan aluminium AC4B,
- 3) Penghalus butir merk *Coveral GR 2815<sup>®</sup>* dalam bentuk *flux*
- 4) *Master alloy* Al-10Sr
- 5) *Flux* merk *Coveral 111*
- 6) Kertas amplas dengan ukuran *mesh* 400 – 1500
- 7) Kain poles
- 8) Zat poles alumina
- 9) Zat etsa reagen *Tucker* (15 ml HNO<sub>3</sub> + 45 ml HCl + 15 ml HF (45 %) + 25 ml H<sub>2</sub>O).

#### 3.2.2 Peralatan

Penelitian ini menggunakan peralatan:

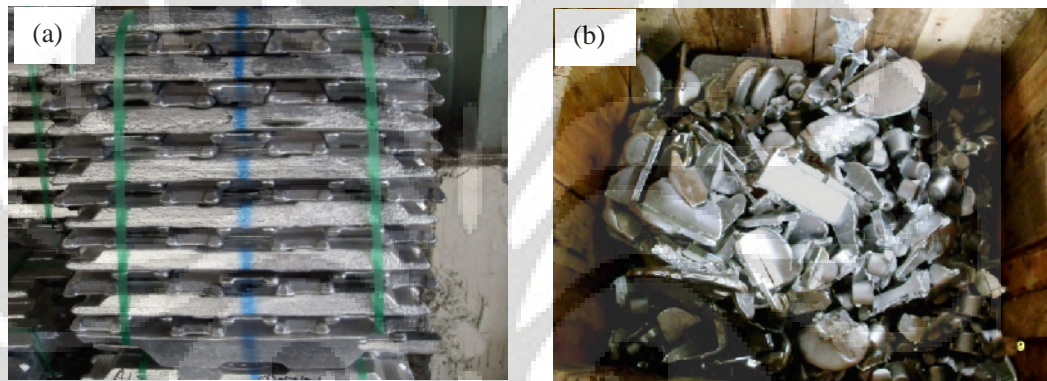
- 1) Dapur peleburan FCECO dengan spesifikasi:
  - Model HM - 150T buatan *Furnace Kakoki Co.Ltd*
  - Kapasitas 1500 kg
  - *Melting rate* 500 kg/jam
- 2) Mesin GBF(*Gas Bubble Flotation*) dengan spesifikasi:
  - Model *Smart Clean* buatan PT. Ostenko Promitra Jaya
  - Agen atau material : Gas argon (Ar)
  - Kecepatan rotor : 350-400 rpm
  - Tekanan argon : 16 kgf/cm<sup>2</sup>
  - Waktu : 8 menit
  - Temperatur aluminium cair : 750 - 800 °C
  - Debit gas Ar (idle) : 8,5 l/menit
- 3) Mesin *low pressure die casting* dengan spesifikasi:
  - Model OG - LFR - 500P buatan Osaka Giken Co.Ltd

- *Holding furnace:*  
Temperatur aluminium cair  $710 \pm 10$  °C  
Kapasitas hingga 500 kg
  - Mesin *inject* (LPDC):  
Temperatur *lower cetakan*  $375 \pm 75$  °C  
Temperatur *upper cetakan*  $250 \pm 75$  °C  
Tekanan *cetakan* sebesar  $256 \pm 6$  KPa  
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) merek Future Tech
  - 18) Mesin XRD Philips PW 2213/20
  - 19) Mesin ampelas merek Ecomet
  - 20) Mesin Poles merek Ecomet
  - 21) Mikroskop optik merek Olympus
  - 22) *Scanning Electron Microscope* LEO 420i
  - 23) Lain-lain : spidol,tang penjepit, palu, masker dan sarung tangan.

### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Proses pengecoran

Proses pengecoran dari material AC4B ini dilakukan di PT AHM dimana proses ini dimulai dengan peleburan dari material AC4B. Material input yang digunakan (Gambar 3.2) merupakan perpaduan dari ingot AC4B (45 %) dan *return scrap* (55 %) yang dilebur dalam *reverberatory furnace* FCECO (Gambar 3.3) dengan kapasitas 1500 kg dan temperatur proses sekitar 750 - 800 °C. *Return scrap* ini berasal dari hasil *reject cylinder head* ataupun dari *gating cylinder head*.



Gambar 3. 2 Material umpan (a) ingot AC4B , (b) *scrap* AC4B.



Gambar 3. 3 Dapur peleburan FCECO.

Proses berikutnya adalah *degassing* atau GBF (*gas bubbling flotation*) dimana sebelumnya aluminium dituang ke dalam *ladle* yang telah di *pre-heating* terlebih dahulu pada suhu minimal 100 °C. Tujuan dari *pre-heating* ini adalah agar mencegah kejutan panas yang menyebabkan batu tahan api (refraktori) pada *ladle* retak atau pecah. Proses *degassing* atau GBF dilakukan dengan tujuan untuk mengeluarkan gas hidrogen terlarut dalam aluminium cair serta mengeluarkan kotoran dengan cara menginjeksikan gas yang bersifat hampir vakum (argon) dengan pengadukan (*stirring*). Gas argon ditiupkan dengan debit 8-12 /menit dan kecepatan rotor 350-400 rpm. Proses ini berlangsung selama 8 menit. Setelah itu akan dilakukan pengangkatan kotoran yang berada dipermukaan aluminium cair ini. Gambar 3.4 memperlihatkan mesin GBF.



**Gambar 3. 4** Gas bubble flotation.

Setelah proses GBF ini selesai *ladle* akan dibawa menuju mesin LPDC dengan menggunakan forklift. Aluminium cair dituangkan ke dalam *holding furnace* sampai penuh. *Holding furnace* yang terdapat pada bagian bawah mesin LPDC ini memiliki kapasitas 500 kg. Setelah aluminium cair berada di dalam *holding* maka dilakukan proses penambahan *modifier* dan penghalus butir. Penampakan penghalus butir *Coveral GR 2815<sup>®</sup>* dan *master alloy Al-10Sr* diperlihatkan oleh Gambar 3.5.

**Universitas Indonesia**



**Gambar 3. 5** Elemen yang akan ditambahkan (a) *master alloy* Al-10Sr , (b) penghalus butir *flux* *Coveral* GR 2815<sup>®</sup>.

Sebelum melakukan pengecoran aluminium, dilakukan penghitungan banyaknya *modifier* dan penghalus butir yang ditambahkan agar tercapai kadar yang sesuai. Berdasarkan penelitian sebelumnya kadar Ti dalam penghalus butir *Coveral* GR – 2815<sup>®</sup> *flux* sebesar 15 wt. % Ti<sup>[3]</sup>. *Master alloy* Al-10Sr mengandung 10 % Sr. Oleh karena itu dilakukan perhitungan *material balance* dengan data – data yang terkait sebagai berikut :

Kapasitas *holding furnace* = 500 kg

Berat *ladle* = 270 kg

Berat 1 *shoot* (2 part) = 3.8 kg

Berat Sampel:

Uji vakum = 0.15 kg

Uji komposisi = 0.075 kg

Uji tarik = 3 kg

Uji fluiditas = 5.7 kg

Proses pengecoran ini dilakukan secara kontinu menggunakan satu *holding* yang sama serta cetakan yang sama. Dilakukan secara bertingkat dari satu komposisi ke komposisi yang lain. Berikut adalah perhitungan penambahan Ti dan Sr dalam *holding furnace*.



**1) Variabel penambahan 0.002 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti**

Keadaan awal sebelum penambahan adalah 0 wt. % Sr dan 0.04 wt. % Ti. Sedangkan komposisi akhir yang seharusnya tercapai adalah 0.002 wt. % Sr dan 0.11 wt. % Ti. Dalam *holding* terdapat 492.325 kg aluminium cair.

- Sr yang harus dimasukkan agar tercapai 0.002 wt. % Sr

$$492.325 \text{ kg} \times (0.002) \%$$

$$4.92325 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan

$$4.92325 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 100/10 = 4.92325 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukkan agar tercapai 0.11 wt. % Ti

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

$$0.03446275 \text{ kg}$$

*Coveral* GR 2815<sup>®</sup> yang ditambahkan

$$0.03446275 \text{ kg} \times 100/15 = 2.29 \text{ kg}$$

**2) Variabel penambahan 0.018 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti**

Keadaan sebelum penambahan adalah 0 wt. % Sr dan 0.038 wt. % Ti. Sedangkan yang di inginkan adalah penambahan 0.02 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti sehingga komposisi akhir yang seharusnya tercapai adalah 0.02 wt. % Sr dan 0.108 wt. % Ti.

Dalam *holding* tersisa aluminium cair sebanyak 375.4763 kg dengan kadar 0.003 wt. % Sr dan 0.098 wt. % Ti.

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

$$375.4763 \text{ kg} \times (0.02 - 0.003) \%$$

$$0.0638 \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan

$$0.0638 \text{ kg} \times 100/10 = 0.638 \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukkan aga tercapai 0.108 wt. % Ti

$$375.4763 \text{ kg} \times (0.108 - 0.098) \%$$

$$0.03754 \text{ kg}$$

*Coveral* GR 2815<sup>®</sup> yang ditambahkan

$$0.03754 \text{ kg} \times 100/15 = 0.2502 \text{ kg}$$

### 3) Variabel penambahan 0.025 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti

Keadaan sebelum penambahan adalah 0 wt. % Sr dan 0.033 wt. % Ti. Sedangkan yang di inginkan adalah penambahan 0.03 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti sehingga komposisi akhir yang seharusnya tercapai adalah 0.03 wt. % Sr dan 0.103 wt. % Ti.

Dalam *holding* tersisa aluminium cair sebanyak 441.896 kg dengan kadar 0.014 wt. % Sr dan 0.073 wt. % Ti.

- Sr yang harus di masukan agar tercapai 0.03 wt. % Sr

$$441.896 \text{ kg} \times (0.03 - 0.014) \%$$

$$0.0707 \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan

$$0.0707 \text{ kg} \times 100/10 = 0.707 \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukan aga tercapai 0.103 wt. % Ti

$$441.896 \text{ kg} \times (0.103 - 0.073) \%$$

$$0.1325 \text{ kg}$$

*Coveral GR 2815<sup>®</sup>* yang ditambahkan

$$0.1325 \text{ kg} \times 100/15 = 0.883792 \text{ kg}$$

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

Dalam *holding* tersisa aluminium cair sebanyak 441.821 kg dengan kadar 0.024 wt. % Sr dan 0.096 wt. % Ti.

- Sr yang harus di masukan agar tercapai 0.03 wt. % Sr

$$441.821 \text{ kg} \times (0.03 - 0.024) \%$$

$$0.0265 \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan

$$0.0265 \text{ kg} \times 100/10 = 0.265 \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukan agar tercapai 0.103 wt. % Ti

$$441.821 \text{ kg} \times (0.103 - 0.096) \%$$

$$0.03092 \text{ kg}$$

*Coveral GR 2815<sup>®</sup>* yang ditambahkan

$$0.03092 \text{ kg} \times 100/15 = 0.206 \text{ kg}$$

Dapur krusibel :

**1) Variabel penambahan 0.002 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti**

Keadaan awal sebelum penambahan adalah 0 wt. % Sr dan 0.04 wt. % Ti.

Sedangkan komposisi akhir yang seharusnya tercapai adalah 0.003 wt. % Sr dan 0.123 wt. % Ti. Dalam *holding* terdapat 200 kg aluminium cair.

- Sr yang harus dimasukkan agar tercapai 0.003 wt. % Sr

$$200 \text{ kg} \times (0.002) \%$$

$$4 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan

$$4 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 100/10 = 4 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukkan agar tercapai 0.123 wt. % Ti

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

$$0.166 \text{ kg}$$

*Coveral* GR 2815<sup>®</sup> yang ditambahkan

$$0.166 \text{ kg} \times 100/15 = 1.1 \text{ kg}$$

**2) Variabel penambahan 0.018 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti**

Komposisi akhir yang seharusnya tercapai adalah 0.018 wt. % Sr dan 0.108 wt. % Ti. Dalam *holding* tersisa aluminium cair sebanyak 188 kg dengan kadar 0.003 wt. % Sr dan 0.098 wt. % Ti.

- Sr yang harus di masukan agar tercapai 0.018 wt. % Sr

$$188 \text{ kg} \times (0.018 - 0.003) \%$$

$$0.0282 \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan

$$0.0282 \text{ kg} \times 100/10 = 0.282 \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukkan agar tercapai 0.108 wt. % Ti

$$188 \text{ kg} \times (0.108 - 0.098) \%$$

$$0.0188 \text{ kg}$$

*Coveral* GR 2815<sup>®</sup> yang ditambahkan

$$0.0188 \text{ kg} \times 100/15 = 0.125 \text{ kg}$$

### 3) Variabel penambahan 0.025 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti

Komposisi akhir yang seharusnya tercapai adalah 0.025 wt. % Sr dan 0.103 wt. % Ti. Dalam *holding* tersisa aluminium cair sebanyak 176 kg dengan kadar 0.014 wt. % Sr dan 0.073 wt. % Ti.

- Sr yang harus di masukan agar tercapai 0.025 wt. % Sr

$$176 \text{ kg} \times (0.025 - 0.014) \%$$

$$0.019 \text{ kg}$$

*Master alloy* Al-10Sr yang ditambahkan

$$0.019 \text{ kg} \times 100/10 = 0.19 \text{ kg}$$

- Ti yang harus dimasukan aga tercapai 0.103 wt. % Ti

$$176 \text{ kg} \times (0.103 - 0.073) \%$$

$$0.053 \text{ kg}$$

*Coveral* GR 2815<sup>®</sup> yang ditambahkan

$$0.053 \text{ kg} \times 100/15 = 0.352 \text{ kg}$$

Perhitungan *material balance* nya adalah :

- Variabel penambahan 0.002 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti

***Holding furnace***

*Input* : 492.325 kg

*Output* :

Sampel uji komposisi = 3 x

$$0.075 \text{ kg}$$

Sampel uji vakum

$$= 3 \times 0.15 \text{ kg}$$

*Cylinder head* 22 shoot

$$= 3.8 \text{ kg} \times 22 = 38 \text{ kg}$$

**Dapur krusibel**

*Input* : 200 kg

*Output* :

Sampel uji komposisi

$$= 2 \times 0.075 \text{ kg}$$

Sampel uji fluiditas =

$$5.6934 \text{ kg}$$

Sampel uji tarik = 6kg

- Variabel penambahan 0.018 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti

***Holding furnace***

*Input* : 375.4763 kg

*Output* :

Sampel uji komposisi

$$= 3 \times 0.075 \text{ kg}$$

Sampel uji vakum

$$= 3 \times 0.15 \text{ kg}$$

*Cylinder head* 22 shoot

$$= 3.8 \text{ kg} \times 22 = 38 \text{ kg}$$

**Dapur krusibel**

*Input* : 188 kg

*Output* :

Sampel uji komposisi

$$= 2 \times 0.075 \text{ kg}$$

Sampel uji fluiditas

$$= 5.6 \text{ kg}$$

Sampel uji tarik = 6kg

- **Variabel penambahan 0.025 wt. % Sr dan 0.07 wt. % Ti**

**Holding furnace**

*Input* : 441.896 kg

*Output* :

Sampel uji komposisi = 3 x 0.075 kg

Sampel uji vakum = 3 x 0.15 kg

*Cylinder head 22 shoot* = 3.8 kg x 22 = 38 kg

**Dapur krusibel**

*Input* : 176 kg

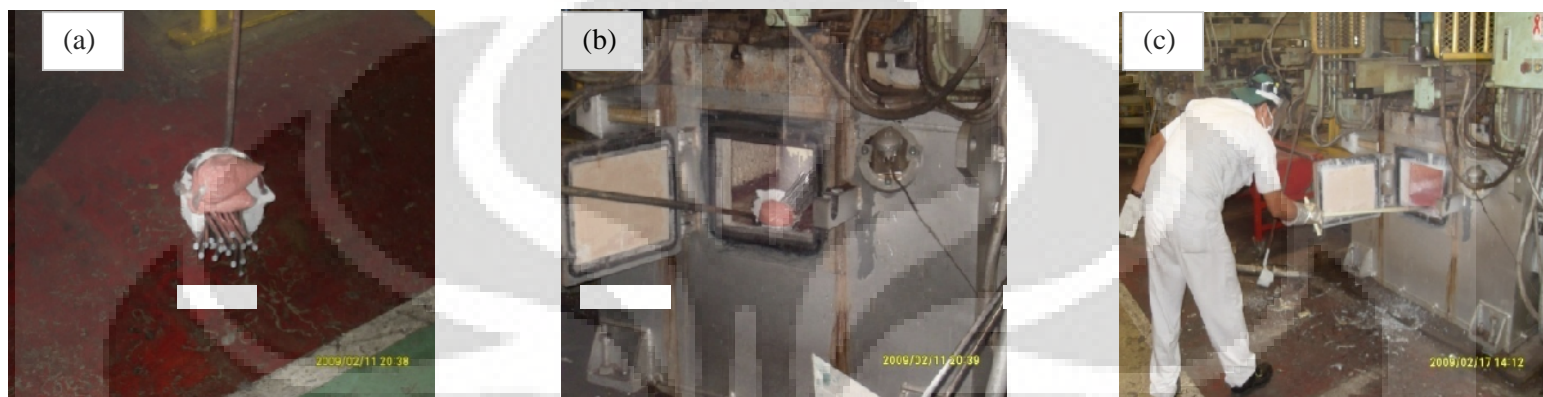
*Output* :

Sampel uji komposisi = 2 x 0.075 kg

Sampel uji fluiditas = 5.69 kg

Sampel uji tarik = 6kg

Setelah mengetahui banyaknya *master alloy* Al-10 Sr dan *flux Coveral GR 2815*<sup>®</sup> yang harus ditambahkan kemudian kedua unsur tadi ditimbang menggunakan timbangan digital. Proses penambahan dilakukan pada *holding furnace* dengan menggunakan ciduk khusus seperti terlihat pada Gambar 3.6. Setelah ditambahkan dilakukan pula pengadukan (*stirring*) manual agar tercampur merata dalam aluminium cair.



**Gambar 3. 6** (a) Penempatan *Coveral GR 2815*<sup>®</sup> dan *master alloy* Al-10Sr di dalam ciduk, (b) memasukan ke dalam *holding furnace*, (c) operator melakukan pengadukan.



**Gambar 3. 7** Proses GBF-manual dengan menggunakan *lance*.

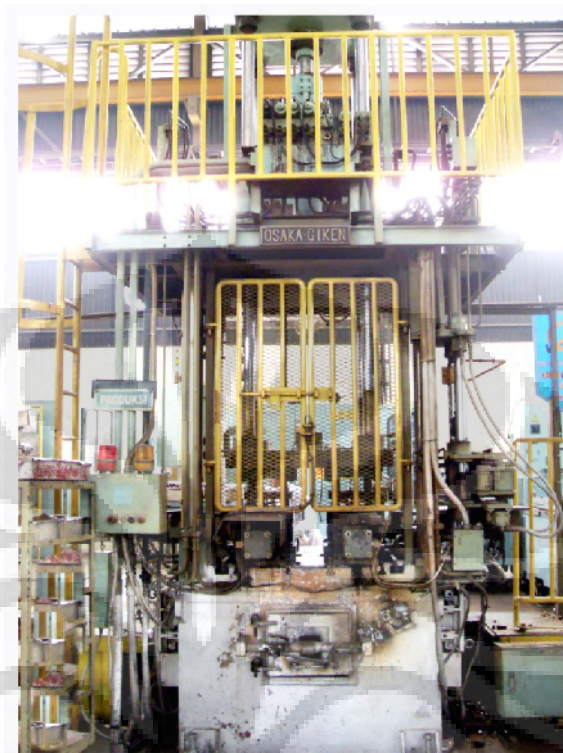
Agar hasil yang didapatkan lebih homogen maka dilakukan *re-GBF* atau *degassing* kembali pada aluminium cair tersebut seperti yang diperlihatkan Gambar 3.7. Metode yang digunakan dengan GBF manual atau *injection* GBF. Prinsip dari proses GBF manual ini sama halnya dengan proses GBF sebelumnya, hanya saja pada proses GBF manual gas argon di injeksikan dengan menggunakan *lance* yang dicelupkan ke dalam aluminium cair 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.

Untuk pengambilan sampel uji tarik dan uji fluiditas menggunakan aluminium cair pada dapur krusibel. Dimana sebelum dilakukan penambahan Ti dan Sr dilakukan proses *fluxing* dan GBF sama seperti pada *holding furnace* LPDC. Selanjutnya dilakukan pemanasan pada cetakan uji tarik dan uji fluiditas. Setelah itu aluminium cair di ciduk ke dalam cetakan uji fluiditas dan uji tarik secara *gravity die casting* seperti terlihat pada Gambar 3.8.



**Gambar 3. 8** Pengambilan aluminium cair dari dapur krusibel untuk dituang pada cetakan uji tarik dan uji fluiditas.

Proses LPDC diawali dengan *pre-heating* dari *cetakan* untuk menghindari terjadinya *thermal shock*. Proses LPDC dilakukan pada temperatur aluminium cair sekitar  $700 \pm 10$  °C. Dua *shoot* pertama merupakan trial. Pada komponen *cylinder head* ini diberikan tanda untuk membedakan kadar Sr dan Ti yang diberikan. Pada setiap proses injeksi dilakukan pencatatan terhadap tekanan, temperatur cetakan, temperatur aluminium cair serta temperatur dari atmosfer.



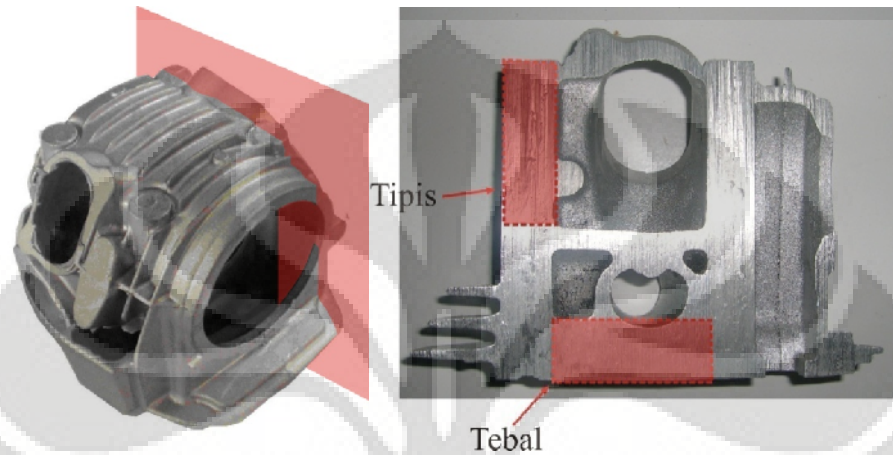
Gambar 3. 9 Mesin *low pressure die casting*.

### 3.3.2 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 struktur mikro 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*

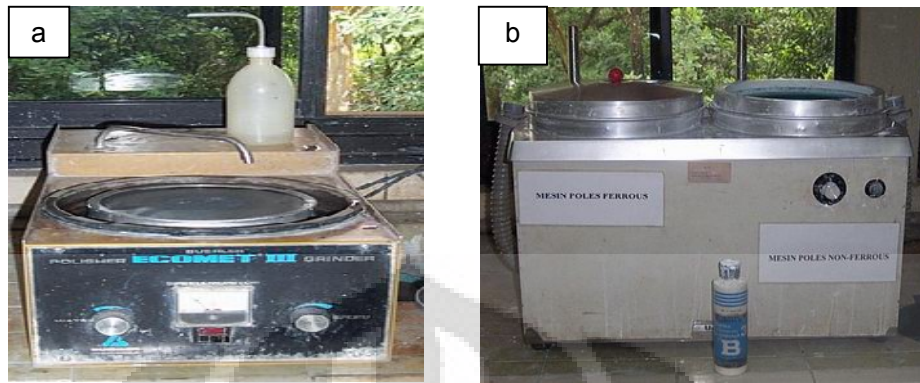
diperlihatkan pada Gambar 3.10. Pada bagian tebal dan tipis masing – masing diambil sampel dengan memotong menjadi balok berukuran dan juga diambil sampel untuk pengujian kekerasan. Untuk sampel pengujian kekerasan dilakukan lagi proses perataan dari alas sampel agar dapat di jejak nantinya.



**Gambar 3.10** Daerah pemotongan sampel pada *cylinder head*.

Untuk sampel pengamatan struktur mikro kemudian di *mounting* secara manual dan dilanjutkan dengan proses pengamplasan dengan menggunakan kertas amplas dari mesh yang terkecil (400 mesh) sampei yang terbesar (1500 mesh). Setelah itu sampel tadi dipoles dengan menggunakan mesin poles Ecomet (Gambar 3.11) dengan menggunakan zat alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan kain beludru hingga diperoleh permukaan mengkilap dan bebas dari goresan (*mirror finishing*). 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 5 detik. Dengan menggunakan reagen *Tucker* maka akan terlihat struktur dendrit dari -Al yang terbentuk.





Gambar 3.11 (a) Mesin amplas tangan, (b) mesin poles.

### 3.3.2 Proses Pengujian

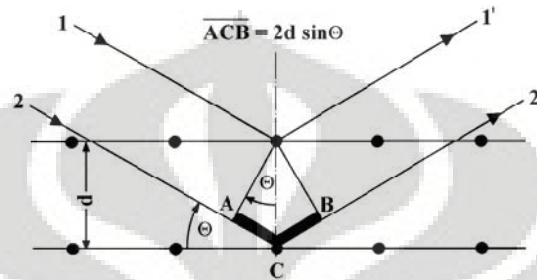
#### 3.3.2.1 Pengujian XRD

Proses pengujian XRD dilakukan untuk identifikasi dari penghalus butir *Coveral GR 2815 flux* dan *master alloy Al-10Sr*. Pengujian XRD menggunakan mesin Philips PW 2213/20 dengan radiasi Cu K $\alpha$  yang diperlihatkan Gambar 3.13. Hasil pengujian XRD berupa grafik dimana pada sumbu x adalah data  $2\theta$  dan pada sumbu y adalah intensitas. Dasar dari penggunaan difraksi sinar-X untuk mempelajari kisi kristal adalah berdasarkan persamaan Bragg yang diperlihatkan Gambar 3.12:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad ; \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

Dengan  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan,  $d$  adalah jarak antara dua bidang kisi,  $\theta$  adalah sudut antara sinar datang dengan bidang normal, dan  $n$  adalah bilangan bulat yang disebut sebagai orde pembiasan. Berdasarkan persamaan Bragg, jika seberkas sinar-X di jatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal itu akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang sama dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor kemudian diterjemahkan sebagai sebuah puncak difraksi. Makin banyak bidang kristal yang terdapat dalam sampel, makin kuat intensitas pembiasan yang dihasilkannya. Tiap puncak yang muncul pada

pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. Puncak-puncak yang didapatkan dari data pengukuran ini kemudian dicocokkan dengan standar difraksi sinar-X untuk hampir semua jenis material. Standar ini disebut JCPDS. Pada penelitian ini digunakan JCPDS Data Base 1997.



Gambar 3. 12 Geometri pemantulan sinar-X.

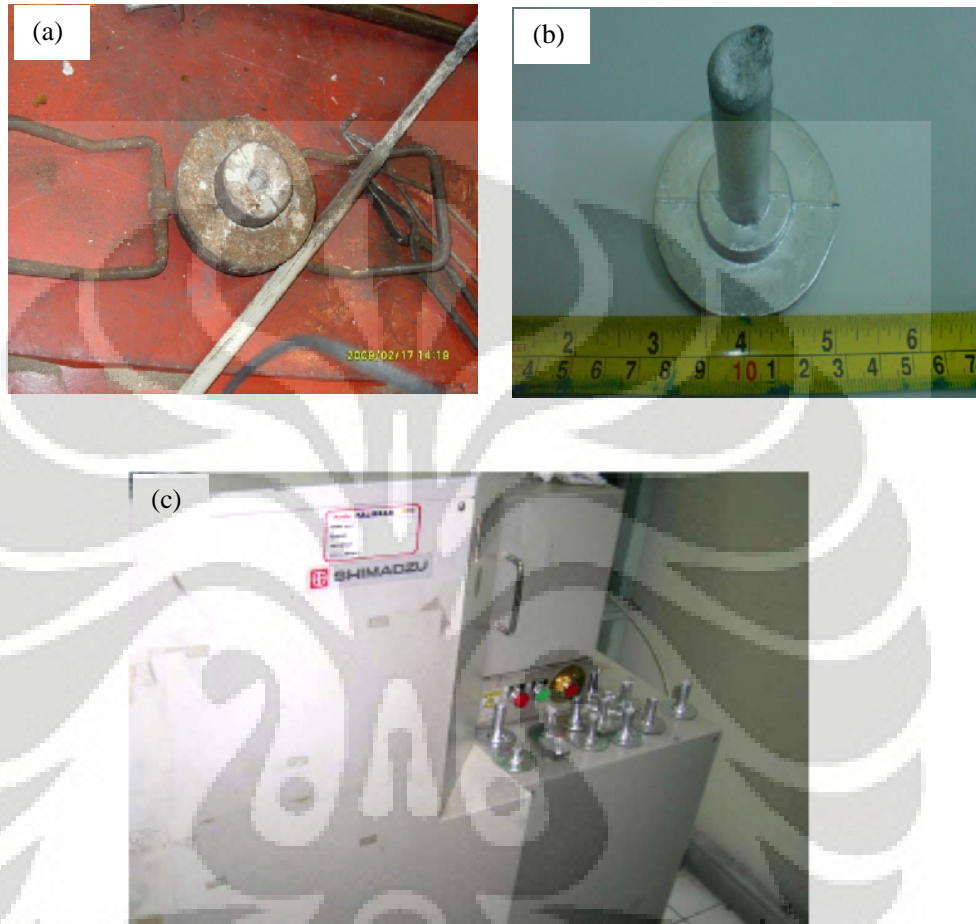


Gambar 3. 13 Mesin XRD Philips 2213/20

### 3.3.2.2 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan alat *Optical Emission Spectrometrer* merk Shimadzu. Sampel pengujian ini sebelumnya telah diratakan terlebih dahulu. Pengujian ini dilakukan pada 3 titik agar data yang diperoleh dapat mewakili komposisi kimia dari material yang diuji. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui komposisi dari aluminium AC4B hasil pengecoran apakah sesuai dengan standar atau tidak, serta untuk mengetahui

kadar penambahan Sr dan Ti. Gambar 3.14 memperlihatkan cetakan uji komposisi, sampel uji komposisi, serta mesin *optical emission spectrometer*.



**Gambar 3.14** (a) Cetakan uji komposisi, (b) sampel uji komposisi, (c) *optical emission spectrometer* merk Shimadzu.

### 3.3.2.3 Pengujian Porositas

Pengujian porositas dilakukan menggunakan alat vakum OSTEK yang diperlihatkan Gambar 3.15. Sampel yang diambil dengan tempat khusus dan di vakum selama 15 menit. Setelah itu sampel tadi akan dipotong menjadi 2 bagian pada bagian tengahnya. Untuk memudahkan pengamatan maka sampel tadi diampelas agar permukaannya lebih halus.

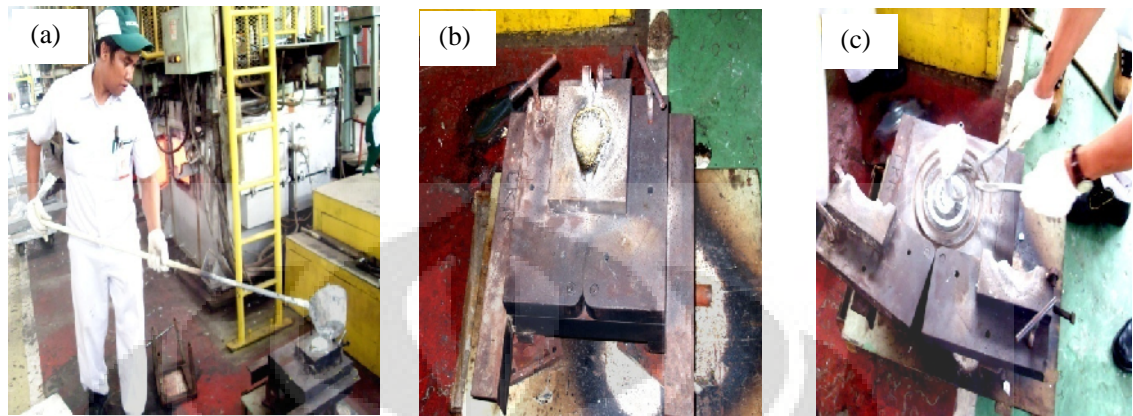


**Gambar 3. 15** Alat vakum OSTEK.

Setelah itu sampel uji porositas di foto untuk mendapatkan informasi secara kualitatif dan kuantitatif. Pengamatan secara kualitatif dilakukan dengan mencocokkan sampel tersebut dengan ASM standar porositas yang ada untuk mengetahui tingkatan dari porositas yang terjadi. Pengukuran kuantitatif porositas dilakukan untuk mengetahui fraksi volume porositas dari sampel tersebut yang akan mewakili porositas yang ada pada paduan aluminium AC4B. Pengukuran kuantitatif dilakukan dengan berdasarkan ASTM E562 menggunakan grid dua dimensi.

#### **3.3.2.4 Pengujian Fluiditas**

Pengujian fluiditas dilakukan untuk mengukur mampu alir dari logam cair untuk masuk ke rongga cetakan. Metode pengujian fluiditas yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan metode spiral. Pada metode ini digunakan cetakan yang memiliki *sprue* yang terhubung dengan saluran yang berbentuk spiral. Ukuran dari fluiditas adalah seberapa panjang lingkaran yang bisa dibentuk oleh logam cair. Sebelum dilakukan pengujian maka perlu dilakukan *pre-heating* cetakan pada temperatur  $\pm 290$  °C. Tujuannya agar logam cair yang di tuang ke dalam cetakan tidak mengalami *thermal shock* sehingga logam tidak memiliki waktu untuk mengalir atau membeku seketika. Agar hasil yang didapat lebih representatif maka diambil masing-masing lima sampel dalam setiap variabel komposisi. Proses *coating* juga dilakukan pada cetakan uji fluiditas spiral ini. Satuan dari nilai fluiditas adalah meter atau inch. Proses pengambilan sampel uji fluiditas diperlihatkan pada Gambar 3.16.



**Gambar 3. 16** (a) Proses penuangan aluminium cair ke cetakan uji fluiditas, (b) cetakan uji fluiditas, (c) proses pengeluaran sampel dari cetakan.

### 3.3.2.5 Pengujian Kebocoran

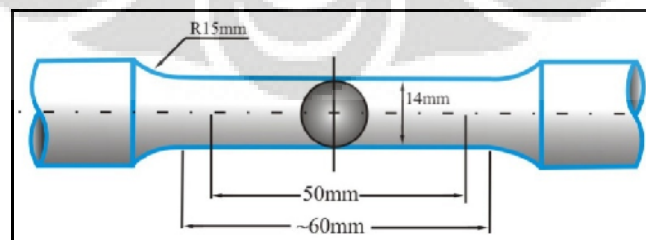
Pengujian kebocoran dilakukan setelah *cylinder head* dilakukan proses *chipping*, *cutting*, *blasting* dan *machining*. Mesin pengujian kebocoran yang digunakan terlihat pada Gambar 3.17. Pengujian yang bertujuan untuk melihat adanya kebocoran fluida karena keropos ini dilakukan dengan menutup semua lubang yang ada pada *cylinder head* lalu dimasukan udara dengan tekanan tertentu. Tekanan yang *drop* mengindikasikan bahwa *cylinder head* memiliki tingkat keropos yang buruk.



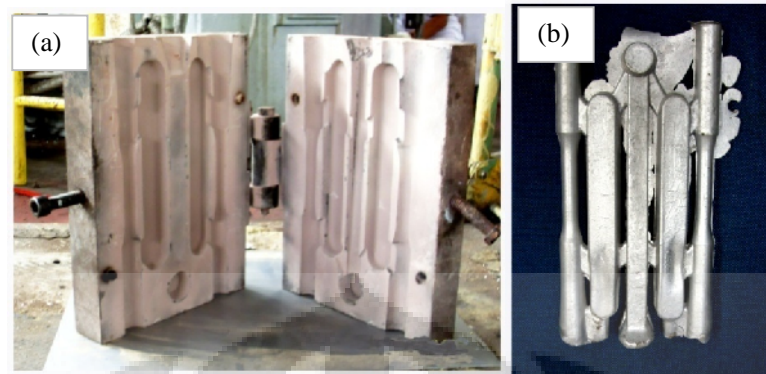
**Gambar 3. 17** Mesin uji bocor.

### 3.3.2.6 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan nilai UTS dan elongasi dari aluminium AC4B. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik Shimadzu. Pembuatan sampel uji tarik ini mengikuti standar JIS Z 2201 yang memiliki spesifikasi seperti Gambar 3.18. Sampel uji tarik dibuat dengan cetakan uji tarik seperti terlihat pada Gambar 3.19 (a) dimana aluminium cair akan dituangkan perlahan-lahan dari atas cetakan dengan posisi cetakan berdiri. Setelah  $\pm 30$  detik sampel akan mengeras dan selanjutnya dikeluarkan dari cetakan. Sampel hasil cetakan uji tarik masih memerlukan proses *machining* untuk pisahkan antara spesimen uji dan *gating system* dari sampel uji tarik. Untuk setiap variabel komposisi maka akan diambil empat sampel uji tarik. Sehingga akan didapat dua belas sampel untuk tiga variasi komposisi yang dilakukan.



**Gambar 3. 18** Bentuk dan ukuran sampel uji tarik yang disesuaikan dengan standar JIS 2201.



**Gambar 3. 19** (a) Cetakan uji tarik, (b) sampel uji tarik yang baru dikeluarkan dari cetakan.

Prinsip pengujian tarik ini adalah pemberian tegangan *uniaxial* pada material hingga putus. Salah satu ujung dihubungkan dengan pengukur beban dari mesin uji dan ujung lainnya dihubungkan dengan perangkat peregang. Kemudian sampel diberi beban tarik *uniaxial* atau searah yang bertambah besar secara terus-menerus sesuai deformasi yang terjadi. Mesin secara otomatis mencatat besar beban yang diberikan pada sampel dan disisi lain mesin juga mencatat perpanjangan yang dialami benda uji. Sehingga, data yang didapat dari pengujian ini berupa grafik berupa nilai beban, nilai stress serta nilai elongasi.

### 3.3.2.7 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode penjejakan Rokwell B. Dengan metode pengujian nilai kekerasan dapat langsung dibaca pada tampilan dalam skala HRB. Dengan metode ini material akan di jejak dengan menggunakan indenter bola baja berdiameter 1/16 inchi dengan beban 100 kg (ASTM E18). Sampel untuk pengujian kekerasan ini diambil dari salah satu bagian komponen *cylinder head* yang telah diratakan terlebih dahulu. Penjejakan dilakukan pada lima titik berbeda yang jaraknya minimal 3d antara satu jejak dan jejak lainnya. Hasil nilai kekerasan yang didapat akan diambil nilai rata-ratanya. Gambar 3.20 memperlihatkan mesin uji kekerasan Rockwell B.



Gambar 3. 20 Mesin uji kekerasan Rockwell.

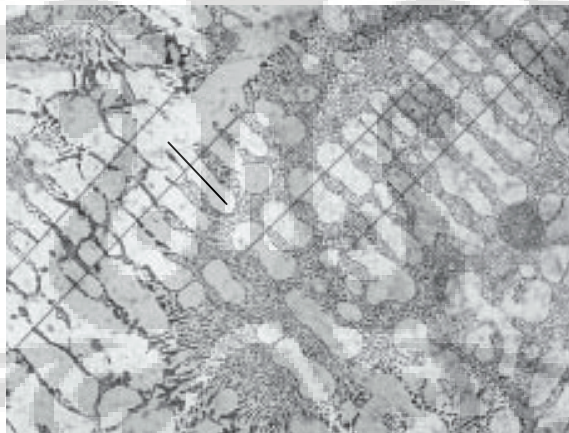
### 3.3.2.8 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik merk Olympus (Gambar 3.21) untuk melihat perubahan struktur mikro sebelum penambahan *modifier* dan penghalus butir dengan setelah penambahan. Informasi yang diinginkan berupa nilai DAS dan tingkat modifikasi. Sampel yang diamati diambil dari komponen *cylinder head* pada bagian tebal dan tipis. Dimana pada bagian yang lebih tebal terjadi pembekuan yang lebih lambat daripada yang terjadi pada bagian tipis. Pengamatan dimulai dengan menggunakan perbesaran yang paling kecil terlebih dahulu yaitu 50 X, baru kemudian setelah mendapatkan daerah yang bagus dan bersih dari goresan, perbesaran dilanjutkan ke tingkat perbesaran 100 , 200 dan 500 X.





**Gambar 3. 21** Mikroskop optik.



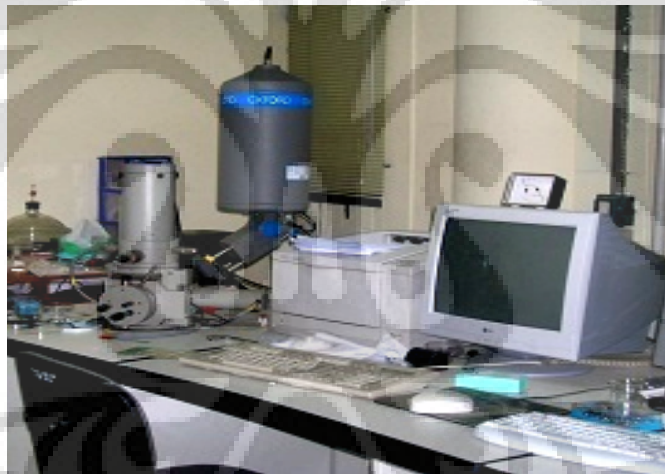
**Gambar 3. 22** Metode pengukuran DAS.

Pengukuran nilai DAS dilakukan dengan mengukur jarak dari lengan dendrit pada daerah struktur mikro yang representatif dari hasil foto struktur mikro seperti terlihat pada Gambar 3.22. Untuk mengetahui tingkat modifikasi, hasil struktur mikro yang ada akan dicocokkan dengan tingkatan modifikasi dari ASM standar.

### 3.3.2.9 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray Analysis* (EDAX)

Pengujian SEM dilakukan terhadap sampel tebal dan tipis dengan menggunakan mesin SEM LEO 420i seperti terlihat pada Gambar 3.23. Pengujian ini dilakuakn dengan *collector bias* sebesar 400 kV, kontras 40 %, *brightness* 30 %, dan EHT (M) sebesar 12 kV . Tujuan dari dilakukannya SEM adalah untuk mencari fasa pembentuk inti  $Al_3Ti$ , Sr sebagai *modifier*, mengetahui fasa intermetalik yang terbentuk dan mencari fasa yang mungkin terbentuk apabila terjadi interaksi antara Ti dan Sr.

Pencarian dilakukan dengan menembak fasa dengan EDAX untuk mengetahui komposisi fasa tersebut. Pengambilan struktur mikro dengan SEM dilakukan dengan perbesaran sebanyak 500 X.



**Gambar 3. 23** *Scanning Electron Microscope* (SEM).

## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisis Komposisi Paduan Aluminium AC4B As-Cast

Hasil analisis komposisi paduan aluminium AC4B yang telah ditambahkan Ti dan Sr ditampilkan pada Tabel 4.1 dimana terlihat adanya perbedaan antara komposisi aktual dengan target yang diinginkan. Target awal penambahan 0.07 wt. % Ti diinginkan komposisi aktual Ti adalah 0.1 wt. % Ti dengan variabel penambahan Sr yaitu 0.002, 0.02, dan 0.03 wt. % Sr. Hasilnya pada variabel penambahan 0.02 wt. % Sr komposisi aktual yang lebih besar yaitu 0.003 wt. % Sr. Sedangkan untuk variabel 0.02 wt. % Sr dan 0.03 wt. % Sr menghasilkan komposisi aktual yang lebih rendah yaitu 0.018 wt. % Sr dan 0.025 wt. % Sr. Untuk komposisi Ti aktual yang didapat dari ketiga variabel telah sesuai target yang diinginkan yaitu sebesar 0.1 wt. % Ti. Perbedaan digit kedua dibelakang koma dari wt. % Ti yang didapat pada ketiga variabel dapat diabaikan.

Adanya perbedaan antara target awal dengan komposisi wt. % Sr aktual yang didapat kemungkinan disebabkan oleh proses pemberian *master alloy* Al-10Sr yang kurang sempurna dimana ada sebagian *master alloy* yang sudah terbakar di permukaan sebelum teraduk saat proses pencampuran serta ketidakakuratan dalam memperkirakan berat aluminium dalam *holding furnace* sehingga kurang akuratnya perhitungan kesetimbangan material (*material balance*). Dengan demikian jumlah penambahan Sr yang akan dibahas selanjutnya dalam penelitian ini adalah 0.003, 0.018 dan 0.025 wt. % Sr dengan komposisi aktual Ti masing-masing adalah 0.1 wt. % Ti.

**Tabel 4. 1** Komposisi aktual paduan aluminium AC4B pada *holding furnace* sebelum proses LPDC.

Unsur	Komposisi aktual paduan aluminium AC4B + 0.07 wt. % Ti + 0.002 wt. % Sr	Komposisi aktual paduan aluminium AC4B + 0.07 wt. % Ti + 0.02 wt. % Sr	Komposisi aktual paduan aluminium AC4B + 0.07 wt. % Ti + 0.03 wt. % Sr	Komposisi standar paduan aluminium AC4B
Si	7.88 wt. %	8.84 wt. %	8.85 wt. %	7 – 10 wt. %
Cu	2.33 wt. %	2.8 wt. %	2.1 wt. %	2 – 4 wt. %
Mg	0.17 wt. %	0.26 wt. %	0.21 wt. %	0.5 wt. % maks
Zn	0.6 wt. %	0.54 wt. %	0.55 wt. %	1 wt. % maks
Fe	0.92 wt. %	0.81 wt. %	0.76 wt. %	1 wt. % maks
Mn	0.29 wt. %	0.32 wt. %	0.25 wt. %	0.5 wt. % maks
Ni	0.07 wt. %	0.06 wt. %	0.09 wt. %	0.35 wt. % maks
Ti	<b>0.123 wt. %</b>	<b>0.108 wt. %</b>	<b>0.103 wt. %</b>	<b>0.2 wt. % maks</b>
Pb	0.06 wt. %	0.07 wt. %	0.05 wt. %	0.2 wt. % maks
Sn	0.04 wt. %	0.04 wt. %	0.02 wt. %	0.1 wt. % maks
Cr	0.03 wt. %	0.03 wt. %	0.03 wt. %	0.2 wt. % maks
Sr	<b>0.003 wt. %</b>	<b>0.018 wt. %</b>	<b>0.025 wt. %</b>	<b>1.2 wt. % maks</b>
Al	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa

Selain Ti dan Sr terdapat unsur – unsur lain yang juga berperan pada paduan aluminium AC4B. Unsur silikon (Si) sebagai unsur paduan utama didalam paduan AC4B memiliki kadar yang telah masuk dalam kisaran standar pada ketiga komposisi yaitu antara 7.88 – 8.85 wt. %. Kehadiran silikon penting karena meningkatkan fluiditas dan ketahanan terhadap retak panas, meningkatkan kekuatan dan kekerasan serta menurunkan berat jenis. Apabila kadar Si >12 % maka akan terbentuk kristal silikon primer yang bersifat keras, memiliki ekspansi termal yang rendah<sup>[16]</sup>. Seperti dapat dilihat pada Tabel 2.5, silikon sebagai unsur terlarut memiliki nilai k (koefisien partisi kesetimbangan antara aluminium cair dan padatan pada daerah antarmuka pertumbuhan butir) sebesar 0.11<sup>[6]</sup>. Tembaga (Cu) pada ketiga komposisi hampir sama yaitu pada kisaran 2-3 wt. % dari rentang 2-4 wt. %. Unsur tembaga sebagai paduan akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam saat *as – cast*<sup>[18]</sup>. Tembaga sebagai unsur terlarut memiliki nilai k sebesar 0.17 akan ikut berpengaruh dalam penghalusan butir. Sementara komposisi besi (Fe) menunjukkan jumlah yang cukup tinggi pada komposisi pertama walaupun masih dalam rentang standar yaitu 0.92 wt. % dari batas maksimal 1 wt. %. Kandungan Fe yang cukup tinggi ini mungkin berasal dari peralatan pengecoran yang digunakan dimana alat-alat tersebut terbuat dari baja. Fe sebagai unsur terlarut memiliki nilai k yang kecil yaitu 0.02. Kelarutan besi dalam aluminium pada fasa padat sangat rendah (~0.04%), dan kebanyakan

keberadaan besi dalam aluminium yang melebihi jumlah tersebut berupa fasa intermetalik kedua yang berkombinasi dengan aluminium dan unsur lainnya.

Selain unsur-unsur tersebut, unsur yang memiliki nilai  $k$  sebagai unsur yang dapat menghalangi pertumbuhan butir pada aluminium AC4B antara lain Mg, Ni, Cr. Pada Tabel 4.2 ditampilkan nilai GRF dari paduan aluminium AC4B pada variasi komposisi yang digunakan dalam penelitian ini. Perhitungan GRF didasarkan pada persamaan 2.2. Dalam penelitian ini variabel yang digunakan adalah komposisi Sr. Namun, dengan mengacu pada Tabel 2.5 tidak diketahui nilai  $k$  (koefisien partisi kesetimbangan antara aluminium cair dan padatan pada daerah antarmuka pertumbuhan butir) dari Sr sehingga unsur ini tidak diikutsertakan dalam perhitungan GRF. Besarnya GRF akan mempengaruhi besar kealusan dendrit yang tumbuh saat proses pembekuan.

**Tabel 4. 2** Nilai GRF pada paduan aluminium AC4B setelah penambahan Ti dan Sr.

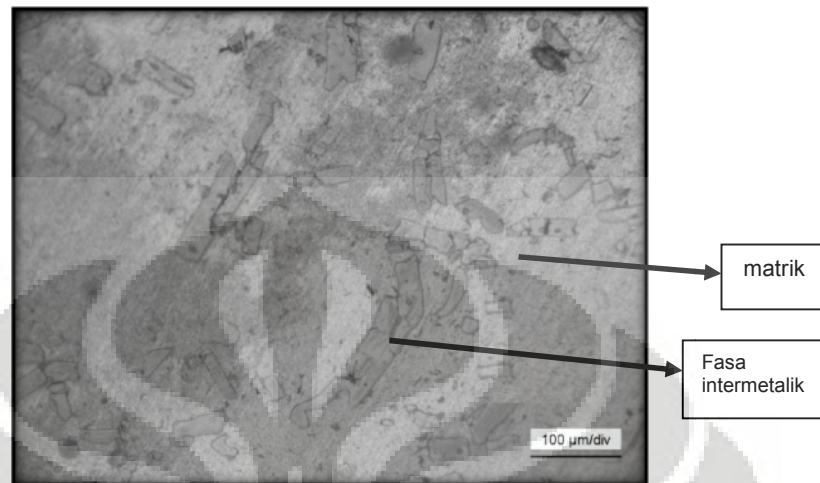
Komposisi paduan aluminium AC4B	GRF
0.1 wt. % Ti + 0.003 wt % Sr	84.162
0.1 wt. % Ti + 0.018 wt % Sr	89.953
0.1 wt. % Ti + 0.025 wt % Sr	88.687

Dengan demikian dapat diambil kesimpulan bahwa seluruh unsur pada paduan AC4B yang digunakan dalam penelitian ini memiliki komposisi yang sesuai dengan rentang komposisi standar dari PT AHM.

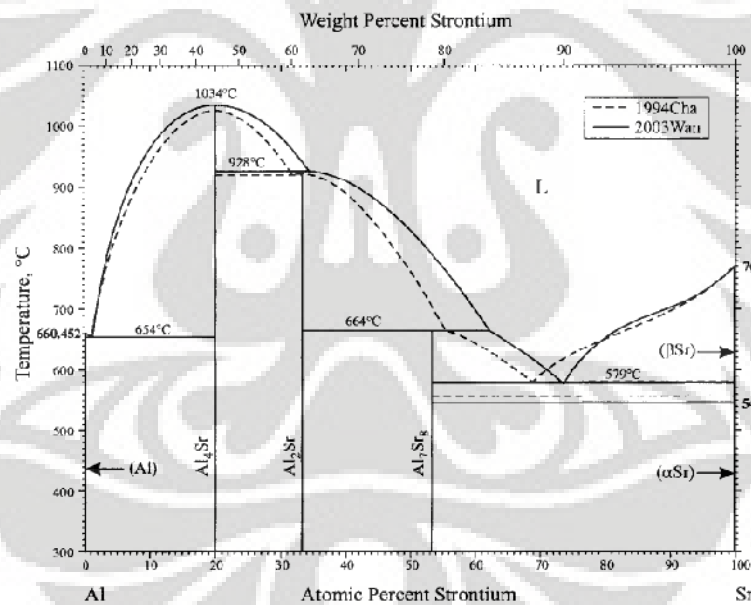
#### **4.2 Karakterisasi Penghalus Butir *Coveral GR – 2815<sup>®</sup> Flux Dan Master Alloy Al-10 Sr***

Struktur mikro *master alloy* Al-10 Sr diperlihatkan pada Gambar 4.1. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.1 terlihat bahwa morfologi struktur mikro terdiri dari matrik Al (abu-abu terang) dan fasa intermetalik (abu-abu gelap) yang diperikarakan adalah  $Al_4Sr$ . *Master alloy* Al-10 Sr merupakan paduan dengan kandungan Sr yang rendah yaitu 10 % dimana menurut literatur paduan ini dapat tersusun oleh fasa eutekik Al- $Al_4Sr$  dan fasa intermetalik  $Al_4Sr$  yang besar dan berbentuk pelat. Diagram fasa Al-Sr pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa pada

kandungan Sr 10 % fasa intermetalik yang mungkin terbentuk pada temperatur ruang adalah  $\text{Al}_4\text{Sr}$ .



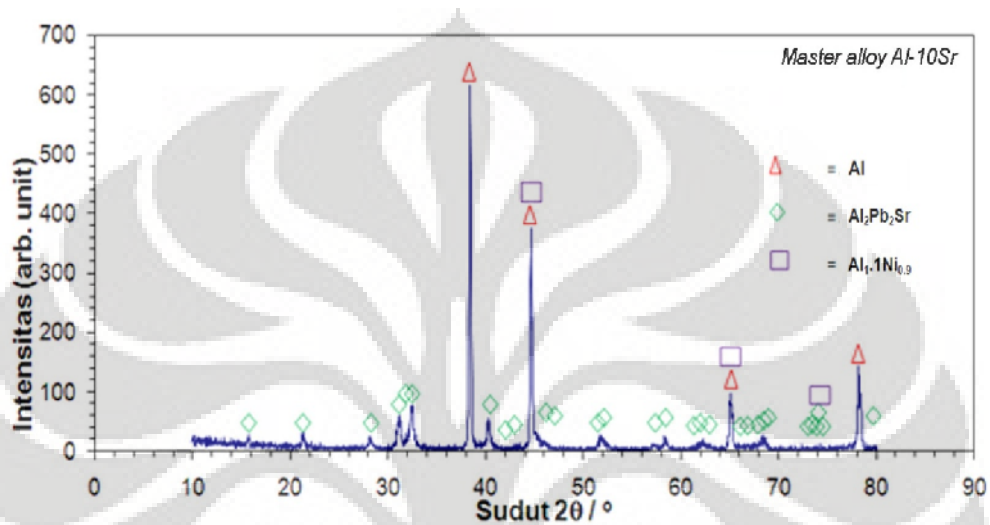
Gambar 4. 1 Struktur mikro *master alloy* Al-10 Sr.



Gambar 4. 2 Diagram fasa Al-Sr<sup>[40]</sup>.

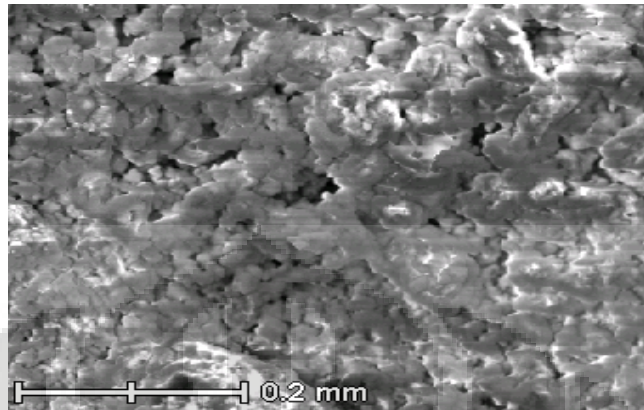
Gambar 4.3 memperlihatkan hasil analisis komposisi *master alloy* Al-10Sr dari XRD. Seperti terlihat pada Gambar 4.2 *master alloy* Al-10Sr tersusun atas Al dan  $\text{Al}_2\text{Pb}_2\text{Sr}$  dan  $\text{Al}_{1.1}\text{Ni}_{0.9}$ . Hasil ini berbeda dengan literatur yang menyatakan bahwa pada *master alloy* Al-10Sr akan tersusun atas fasa intermetalik  $\text{Al}_4\text{Sr}$ . Hal ini menunjukkan bahwa terdapat kandungan unsur lain yaitu Pb dimana Sr terkunci

pada fasa intermetalik  $\text{Al}_2\text{Pb}_2\text{Sr}$ . Ketika *master alloy* ini ditambahkan ke paduan Al-Si cair akan terjadinya pelarutan fasa ini sehingga Sr dapat memodifikasi kristal silikon. *Master alloy* dengan kandungan Sr yang rendah menunjukkan perilaku peleburan yang klasik dimana peningkatan kelarutan sebanding dengan peningkatan temperatur.



**Gambar 4.3** Hasil analisis komposisi master alloy Al-10Sr dengan XRD.

Pada Gambar 4.4 diperlihatkan struktur mikro *Coveral GR 2815*<sup>®</sup> menggunakan SEM yang didapat dalam penelitian sebelumnya<sup>[21]</sup>. Dari Gambar 4.4 terlihat bahwa struktur penghalus butir ini mirip garam. Hasil analisis komposisi dari *Coveral GR 2815*<sup>®</sup> dengan EDAX di tabulasi pada Tabel 4.3 dimana terdapat kandungan unsur penyusun garam seperti F, Na, K, Cl, Ti. Kandungan boron tidak terdeteksi dalam penghalus butir ini.



**Gambar 4. 4** Struktur mikro dari penghalus butir *Coveral* GR 2815<sup>®</sup>[3].

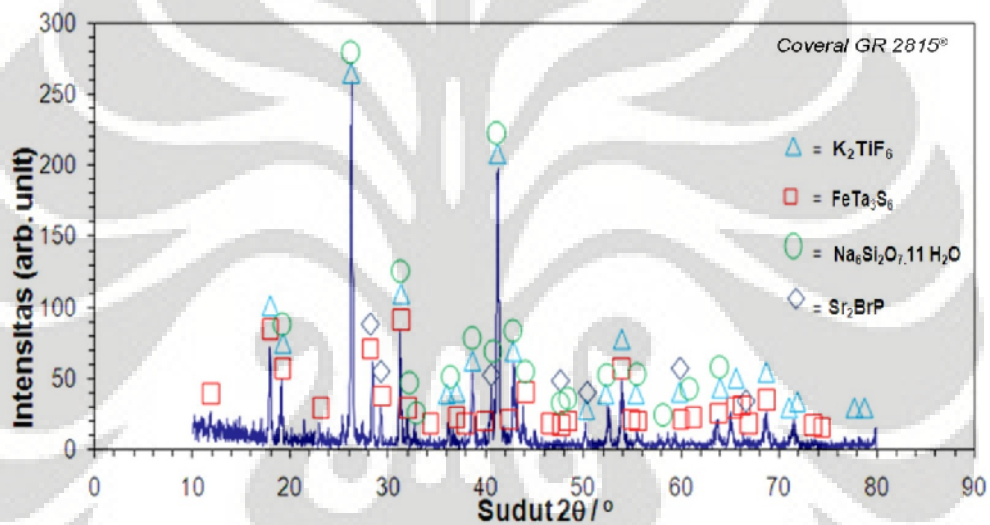
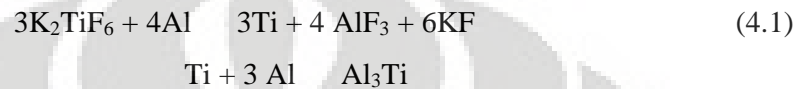
**Tabel 4. 3** Hasil analisis komposisi *Coveral* GR 2815<sup>®</sup> flux dari XRD<sup>[3]</sup>.

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

Dari Tabel 4.2 diketahui bahwa kandungan Ti yang terdeteksi dalam penghalus butir adalah 14.95 %. Untuk mengetahui formula penyusun penghalus butir ini maka dilakukan analisis komposisi *Coveral* GR 2815<sup>®</sup> dengan XRD. Gambar 4.5 menunjukkan hasil analisis komposisi *Coveral* GR 2815<sup>®</sup> dengan XRD. Dari Gambar 4.5 dapat terlihat bahwa penghalus butir ini tersusun dari senyawa  $K_2TiF_6$ ,  $FeTa_3S_6$ ,  $Na_6Si_2O_7 \cdot 11 H_2O$  dan  $Sr_2BrP$ . Apabila dibandingkan dengan hasil EDAX pada penelitian sebelumnya<sup>[3]</sup>, terlihat beberapa perbedaan unsur yang terkandung dalam flux *Coveral*. Dari hasil EDAX terdeteksi unsur Cl, tetapi hasil analisis XRD tidak menunjukkan adanya senyawa yang terdiri dari unsur tersebut. Hal ini kemungkinan disebabkan adanya pengotor pada *Coveral* GR 2815. Karena penghalus butir ini berbentuk flux sehingga kandungan pengotor tidak merata pada seluruh bagian *flux* melainkan pada beberapa bagian saja sehingga hasil EDAX dan XRD terdapat perbedaan. Tidak terdapat Boron dalam penghalus butir sehingga Ti dianggap sebagai unsur utama yang berperan dalam penghalusan



butir. Namun, seperti ditunjukkan hasil XRD bahwa pada penghalus butir ini terkandung senyawa  $\text{FeTa}_3\text{S}_6$  dimana unsur Ta memiliki nilai k terbesar kedua setelah Ti yaitu 2.5. Nilai k menggambarkan daya segregasi dari unsur yang dapat membatasi laju pertumbuhan butir melalui GRF (*growth restricting factor*). Hal ini mempengaruhi mekanisme penghalusan butir. Berikut merupakan reaksi dari penghalus butir yang mengandung  $\text{K}_2\text{TiF}_6$  dalam aluminium cair<sup>[45]</sup>:

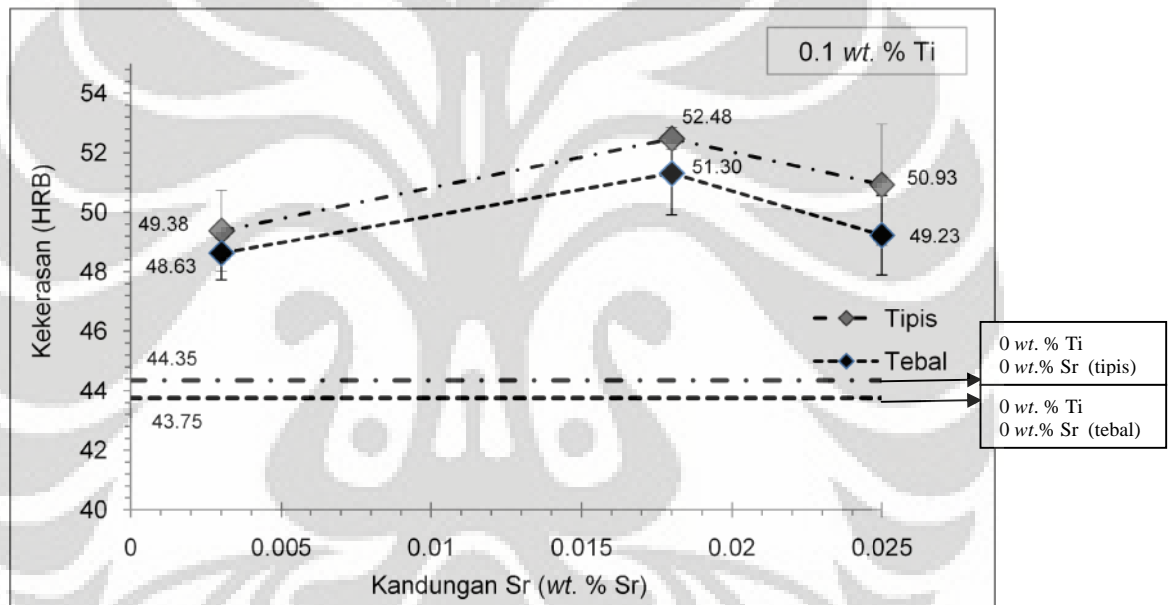


Gambar 4. 5 Hasil analisis komposisi Coveral GR 2815® dengan XRD .

### 4.3 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Karakteristik Paduan Aluminium AC4B

#### 4.3.1 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Kekerasan Paduan Aluminium AC4B

Perubahan kekerasan paduan AC4B dengan komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr yaitu 0.003, 0.018 dan 0.025 wt. % Sr diperlihatkan pada Gambar 4.6. Dari Gambar 4.6 dapat dilihat perbedaan kekerasan pada bagian tipis dan tebal dari sampel komponen *cylinder head* hasil injeksi LPDC. Nilai kekerasan dalam kondisi tanpa penambahan Ti dan Sr juga disertakan sebagai nilai pembandingan.



**Gambar 4. 6** Pengaruh komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr terhadap kekerasan paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan kekerasan pada kondisi tanpa penambahan Ti dan Sr.

Pada komposisi Ti yang sama yaitu 0.1 wt. %, penambahan 0.003 wt. % Sr meningkatkan kekerasan sebesar 11.34 % dari 44.35 HRB menjadi 49.38 HRB pada bagian tipis. Sementara pada bagian tebal, besar peningkatan yang terjadi sebesar 11.15 % dari 43.75 HRB menjadi 48.63 HRB. Penambahan 0.018 wt. % Sr meningkatkan kekerasan 6.27 % dari 49.38 HRB menjadi 52.48 HRB pada bagian tipis dibandingkan dengan penambahan 0.003 wt. % Sr. Pada bagian tebal besar peningkatan yang terjadi lebih rendah sebesar 5.49 % dari 48.63 HRB

menjadi 51.30 HRB. Selanjutnya, pada komposisi 0.025 wt. % Sr nilai kekerasan menurun sebesar 2.95 % dari 52.48 HRB menjadi 50.93 HRB pada bagian tipis dibandingkan dengan penambahan sebelumnya. Sementara pada bagian tebal, juga terjadi penurunan kekerasan sebesar 4.05 % dari 51.30 HRB menjadi 49.22 HRB.

Peningkatan kekerasan yang terjadi pada paduan aluminium AC4B setelah ditambahkan Ti dan Sr merupakan penggabungan dari efek penghalusan butir dan modifikasi. Dimana terjadi perubahan pada struktur mikro yaitu butir yang lebih halus dan kristal silikon yang termodifikasi. Dengan butir yang lebih halus akan membuat batas butir menjadi lebih banyak. Batas butir yang semakin banyak akan menghalangi pergerakan dari dislokasi sehingga nilai kekerasan bertambah<sup>[7]</sup>. Serta dengan dilakukannya modifikasi, kristal silikon yang awalnya berupa pelat berubah menjadi struktur *fibrous* yang halus sehingga meningkatkan kekerasan<sup>[2]</sup>. Kedua efek tersebut menghasilkan struktur dengan nilai kekerasan yang lebih besar. Hal ini sesuai dengan hasil yang didapatkan pada penambahan 0.003 dan 0.018 wt. % Sr. Hasil yang berbeda didapat ketika komposisi Sr ditingkatkan pada level 0.025 wt. % dimana terjadi penurunan kekerasan dibandingkan dengan penambahan sebelumnya.

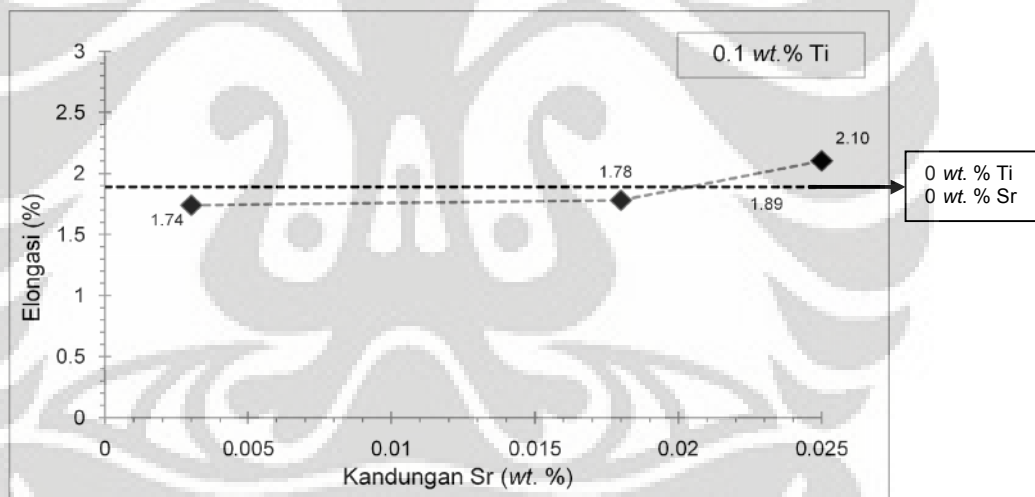
Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa pada kandungan Ti yang sama dengan meningkatnya kandungan Sr akan didapat kekerasan optimum yaitu pada komposisi 0.018 wt. % Sr. Komposisi ini masuk dalam kisaran efektif (0.01-0.02 wt. % Sr) penambahan Sr pada literatur<sup>[13]</sup>. Selanjutnya apabila kandungan Sr ditingkatkan lagi diluar kisaran efektif maka kekerasannya menurun. Penurunan kekerasan pada kandungan 0.025 wt. % Sr kemungkinan disebabkan oleh berlebihnya kadar Sr sehingga tingkat modifikasinya turun dan efek penghalusan butirnya berkurang. Hal ini akan dikonfirmasi dalam pengamatan struktur mikro pada bagian 4.3.6. Selain itu penyebab turunnya kekerasan pada komposisi ini diperkirakan karena peningkatan jumlah porositas. Hal ini akan dikonfirmasi pada pengamatan porositas pada bagian 4.3.4.

Pada semua komposisi, bagian tipis memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada bagian tebal. Hal ini berkaitan dengan kecepatan pembekuan yang terjadi. 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. Pada bagian yang tebal proses pembekuannya lebih lambat sehingga butir yang dihasilkan akan lebih besar sedangkan pada bagian tipis proses pembekuannya lebih cepat sehingga butir yang dihasilkan lebih halus dan kekerasannya lebih tinggi<sup>[41]</sup>.

#### 4.3.2 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Kekuatan Tarik Paduan Aluminium AC4B

Gambar 4.7 memperlihatkan perubahan kekuatan tarik dari paduan aluminium AC4B dengan kandungan 0.1wt. % Ti dan variasi Sr. Pengujian tarik dilakukan pada sampel tanpa penambahan serta pada kandungan 0.1 wt. % Ti dengan variabel penambahan Sr yaitu 0.003, 0.018, dan 0.025 wt. % Sr .

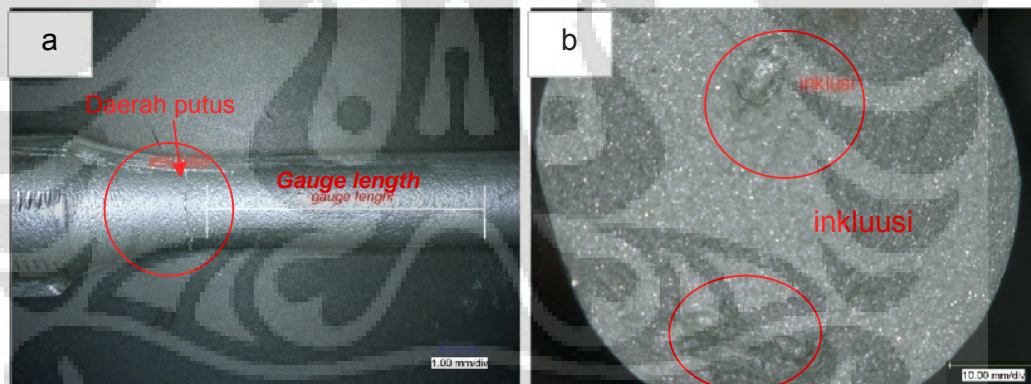


**Gambar 4. 7** Pengaruh komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr terhadap nilai paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan nilai elongasi pada kondisi tanpa penambahan Ti dan Sr.

Pada Gambar 4.7 terlihat perubahan elongasi pada paduan AC4B setelah ditambahkan Ti dan Sr. Elongasi adalah indikasi dari tingkat keuletan suatu logam, dimana semakin besar nilai % elongasi maka material tersebut akan semakin ulet. Seperti terlihat pada Gambar 4.7 pada komposisi 0.1 wt. % Ti, penambahan 0.003 wt. % Sr menurunkan nilai elongasi sebesar 7.9 % dari 1.89 menjadi 1.74 %. Penambahan 0.018 wt. % Sr menaikkan nilai elongasi tidak

signifikan yaitu sebesar 2.29 % dari 1.74 menjadi 1.78 % dibandingkan penambahan sebelumnya. Pada penambahan 0.025 wt. % Sr nilai elongasi meningkat sebesar 17.9 % dari 1.78 % menjadi 2.1 % dari penambahan 0.018 wt. % Sr.

Secara umum, kristal silikon dengan bentuk pelat kasar yang tajam akan menjadi potensi terjadinya konsentrasi tegangan sehingga material dengan struktur ini cenderung getas. Ketika dilakukan penambahan Sr, maka struktur pelat dari kristal silikon akan berubah bentuk menjadi struktur *fibrous* yang lebih halus tergantung dari tingkat modifikasi yang terjadi. Akibatnya keuletan material meningkat<sup>[2]</sup>. Berdasarkan teori ini seharusnya nilai elongasi dari sampel dengan penambahan Sr akan meningkat. Begitu pula dengan penghalusan butir akan meningkatkan elongasi<sup>[20]</sup>. Menurut literatur nilai elongasi paduan aluminium AC4B sebesar 2 % pada keadaan *as-cast*. Namun, pada penelitian ini nilai elongasi paduan aluminium AC4B yang didapat berada dibawah nilai pada literatur kecuali pada sampel komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.025 wt.% Sr.

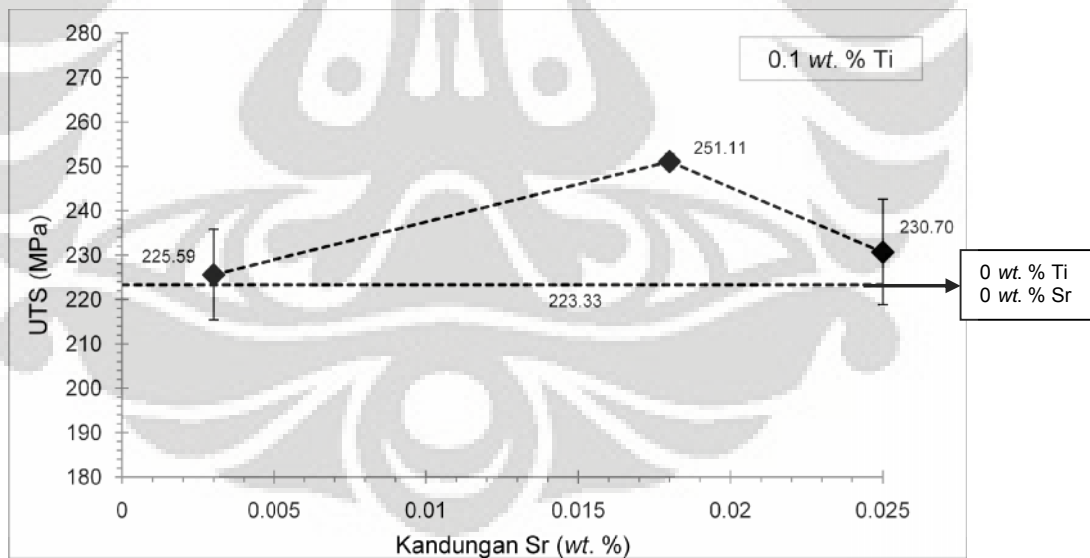


**Gambar 4. 8** Sampel uji tarik komposisi 0.1 wt. % Ti dengan penambahan 0.003 wt. % Sr, (a) Perpatahan diluar gauge length , (b) inklusi pada permukaan patahan sampel uji tarik.

Faktor yang menyebabkan penurunan nilai elongasi kemungkinan disebabkan oleh adanya inklusi pada beberapa sampel uji tarik yang dapat menyebabkan konsentrasi tegangan pada bagian tertentu, sehingga mengakibatkan sampel uji tarik tidak homogen sehingga mengalami perpatahan tidak tepat pada bagian *gauge length*. Adanya inklusi pada sampel uji tarik disebabkan oleh

*fluxing* yang kurang sempurna pada cairan aluminium dalam proses pembuatan sampel uji tarik tersebut. Gambar 4.8b memperlihatkan inklusi pada permukaan patahan salah satu sampel uji tarik yang menyebabkan terjadinya perpatahan diluar *gauge length*. Oleh karena itu nilai elongasi yang didapat dianggap tidak merepresentatifkan keuletan dari paduan aluminium AC4B.

Gambar 4.9 memperlihatkan nilai UTS dari sampel dengan variasi penambahan Sr pada komposisi Ti yang tetap serta nilai UTS pada sampel dengan komposisi normal (tanpa penambahan apapun) sebagai nilai pembandingan. Pada komposisi 0.1 wt. % Ti, penambahan 0.003 wt. % Sr meningkatkan nilai UTS sebesar 3.31 % dari 223.32 MPa menjadi 225.59 MPa. Peningkatan ini kurang signifikan. Peningkatan yang cukup signifikan terjadi pada penambahan 0.018 wt. % Sr yaitu sebesar 11.3 % dari 223.32 MPa menjadi 251.11 MPa dibandingkan dengan penambahan sebelumnya. Sementara pada penambahan 0.025 wt. % Sr nilai UTS menurun cukup signifikan sebesar 8.12 % dari 251.1 MPa menjadi 230.70 MPa. Namun secara keseluruhan sampel dengan penambahan Ti dan Sr memiliki nilai UTS yang lebih tinggi daripada sampel tanpa penambahan Ti dan Sr.



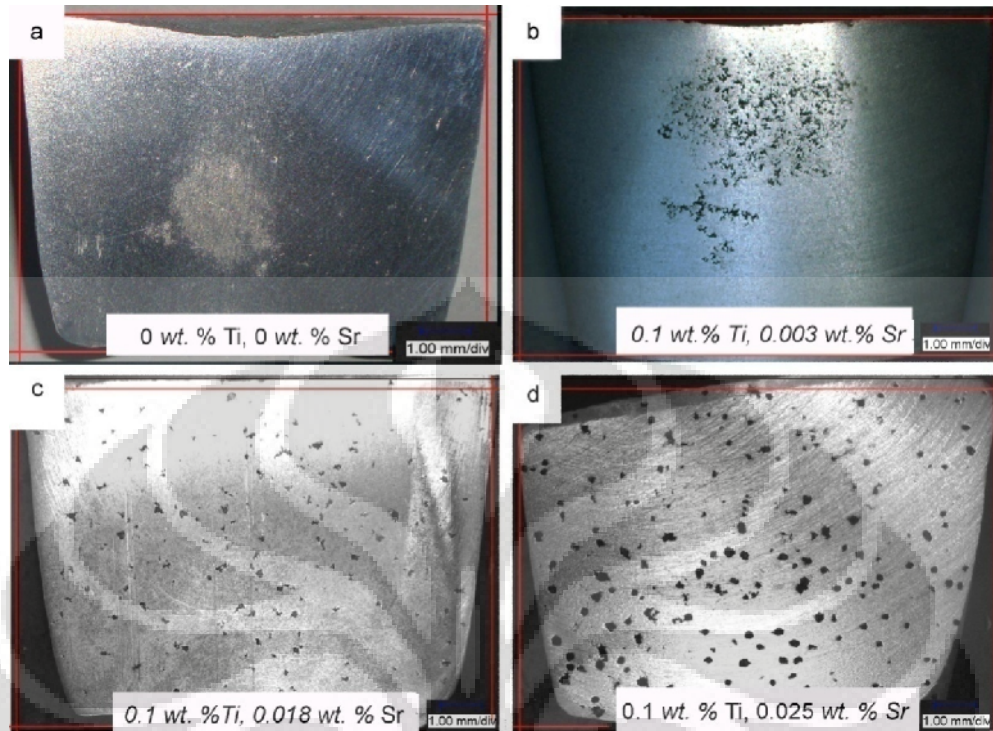
**Gambar 4. 9** Pengaruh komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr terhadap kekuatan tarik paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan kekuatan tarik pada kondisi tanpa penambahan Ti dan Sr.

Dari hasil penelitian ini terlihat bahwa pada komposisi 0.1 wt. % Ti, penambahan 0.018 wt. % Sr memberikan efek yang optimum pada kekuatan tarik. Dan apabila komposisi Sr kemudian ditingkatkan, maka kekuatan tariknya menurun. Fenomena ini sejalan dengan perubahan kekerasan yang terjadi seperti telah dijelaskan dalam bagian 4.3.2. Peningkatan sifat mekanik yang terjadi berhubungan dengan struktur mikro yang terjadi dimana dengan kombinasi penghalusan butir dan modifikasi kristal silikon membuat pembentukan dendrit dan silikon eutektik yang halus melalui kedua perlakuan tersebut. Dengan penambahan Ti yang sama, ternyata penambahan Sr pada kadar yang berbeda akan menghasilkan kehalusan dendrit dan silikon eutektik yang berbeda. Dan dapat dikatakan bahwa peningkatan sifat mekanik optimum dicapai pada sampel dengan komposisi 0.018 wt. % Sr dan 0.1 wt. %Ti dengan struktur mikro yang mengalami penghalusan butir dan modifikasi optimum. Hal ini akan dikonfirmasi pada sub bab pengamatan struktur mikro bagian 4.3.4.

#### **4.3.3 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Kandungan Porositas Paduan Aluminium AC4B**

Gambar 4.10 memperlihatkan foto makro hasil pengujian porositas pada paduan AC4B sebelum dan sesudah dilakukan kombinasi penambahan Ti dan Sr. Dari gambar tersebut dapat dilihat perbedaan distribusi serta visual dari porositas pada paduan aluminium AC4B dengan kombinasi penambahan 0.1 wt. % Ti dan 0.003, 0.018, dan 0.025 wt. % Sr. Selain itu hasil pengujian porositas tanpa penambahan juga disertakan sebagai pembandingan.

Seperti terlihat pada Gambar 4.10 terjadi perubahan pada porositas yang terjadi. Secara kualitatif, terlihat bahwa setelah penambahan 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr terjadi perubahan pada tingkat dan distribusi porositas. Pada sampel dengan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr, porositas yang terjadi terpusat ditengah walaupun sudah lebih tersebar daripada sampel tanpa penambahan. Dengan peningkatan kandungan Sr pada 0.018 wt. % Sr, persebaran porositas lebih menyebar pada seluruh bagian sampel. Sementara pada sampel dengan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.025 wt. % Sr, porositas yang ada menyebar pada seluruh bagian sampel.



**Gambar 4. 10** Penampang potongan sampel uji porositas; (a) tanpa penambahan, (b) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (c) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (d) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr.

Jika dibandingkan dengan Gambar 2.23 sebagai perbandingan tingkat porositas, pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr terjadi peningkatan nilai porositas dari tingkat 3 ke tingkat 4 (sesuai standar ASM). Selanjutnya dengan komposisi Ti yang sama penambahan 0.018 dan 0.025 wt. % Sr meningkatkan nilai porositas masing-masing menjadi tingkat 4 dan 5.

Untuk mengetahui kuantitas dari porositas yang terjadi maka dilakukan analisis secara kuantitatif terhadap sampel uji porositas tersebut dengan menghitung fraksi volume porositas. Tabel 4.3 memperlihatkan hasil penghitungan fraksi volume porositas pada sampel hasil uji porositas. Seperti terlihat pada Tabel 4.4 pada sampel dengan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr terjadi peningkatan fraksi volume porositas sebesar 66.00 % dari 3 menjadi 5 % dibandingkan dengan sampel tanpa penambahan. Sementara itu, pada sampel dengan kandungan Ti yang sama dan 0.018 wt. % Sr, fraksi volume porositas meningkat sebesar 30 % dari 5.0 menjadi 6.5 dari komposisi sebelumnya. Pada sampel dengan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.025 wt. % Sr terjadi peningkatan



fraksi volume porositas sebesar 38.46 % dari 6.5 menjadi 9 % dari komposisi sebelumnya.

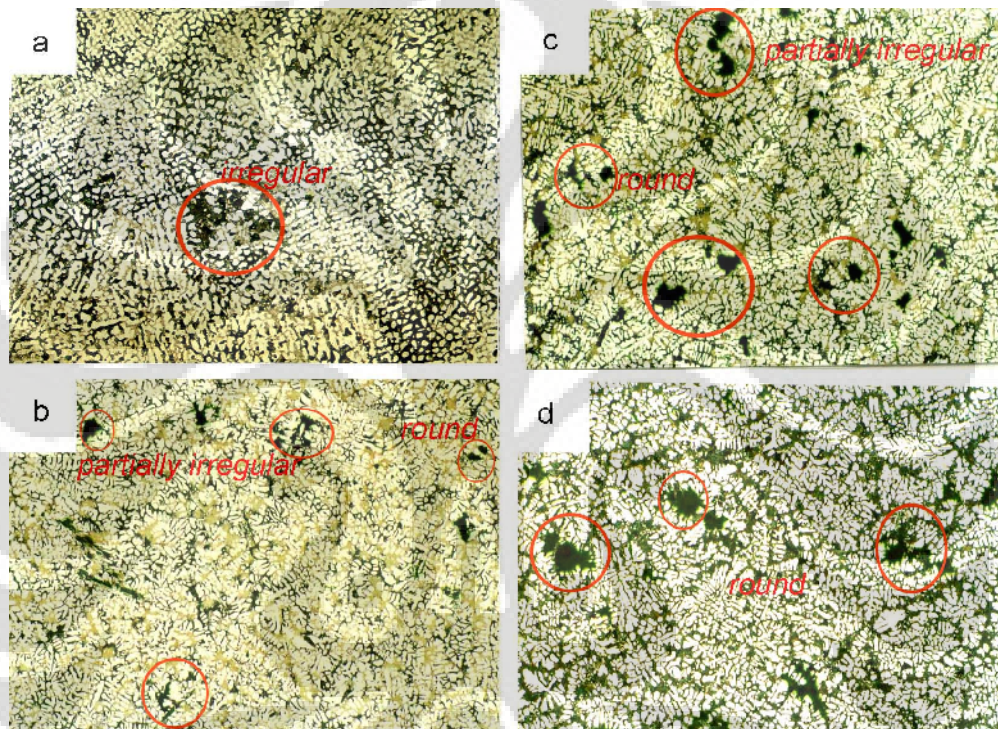
**Tabel 4. 4** Hasil penghitungan fraksi volume porositas dengan metode grid (ASTM E562)

wt. %Ti	wt. % Sr	Fraksi volume porositas (%)
0	0	3.0
0.1	0.003	5.0
0.1	0.018	6.5
0.1	0.025	9.0

Peningkatan porositas yang terjadi sebanding dengan peningkatan kandungan Sr dimana sampel dengan kandungan 0.025 wt. % Sr memiliki kandungan porositas. Pada beberapa penelitian menunjukkan bahwa dengan penambahan Sr pada paduan aluminium silikon hipoeutektik meningkatkan jumlah porositas makro (meskipun tetap terdispersi merata)<sup>[28]</sup>. Pada penelitian ini meningkatnya kandungan porositas dapat disebabkan oleh banyaknya kontak langsung antara aluminium cair dengan udara luar baik pada saat penambahan dan saat pengambilan spesimen uji. Selain itu penambahan Sr menyebabkan turunnya tegangan permukaan aluminium cair sehingga membuat permukaan lebih encer dan juga terbentuknya lapisan SrO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada aluminium cair yang tidak bersifat protektif mengakibatkan gas hidrogen mudah masuk ke dalam aluminium cair<sup>[29]</sup>.

Gambar 4.11 memperlihatkan foto mikro dari paduan aluminium AC4B yang diambil dari sampel uji fluiditas. Dari gambar tersebut dapat dilihat perubahan morfologi mikro porositas yang tadinya *irregular* (tidak beraturan) menjadi bulat dan *irregular* sebagian. Pada sampel tanpa penambahan mikro porositas yang terjadi berbentuk *irregular*. Setelah dilakukan kombinasi penambahan 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr porositas berubah menjadi campuran dari *irregular* sebagian dan bulat. Pada paduan aluminium tanpa penambahan Sr porositas muncul pada bagian interdendritik sehingga pertumbuhan porositas dipengaruhi bentuk dendrit dan fasa eutektik. Hal tersebut membuat pertumbuhan sel eutektik memiliki daerah antarmuka padat-cair yang tidak beraturan sehingga porositas yang terbentuk mengikuti permukaan sel eutektik ini menjadi *irregular*

dan bercabang. Sedangkan dengan penambahan Sr pertumbuhan porositas yang berbentuk bulat dimulai sebelum solidifikasi eutektik. Selanjutnya fasa eutektik akan tumbuh bukan pada bagian interdendritik dengan antarmuka padat-cair 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>[35]</sup>.

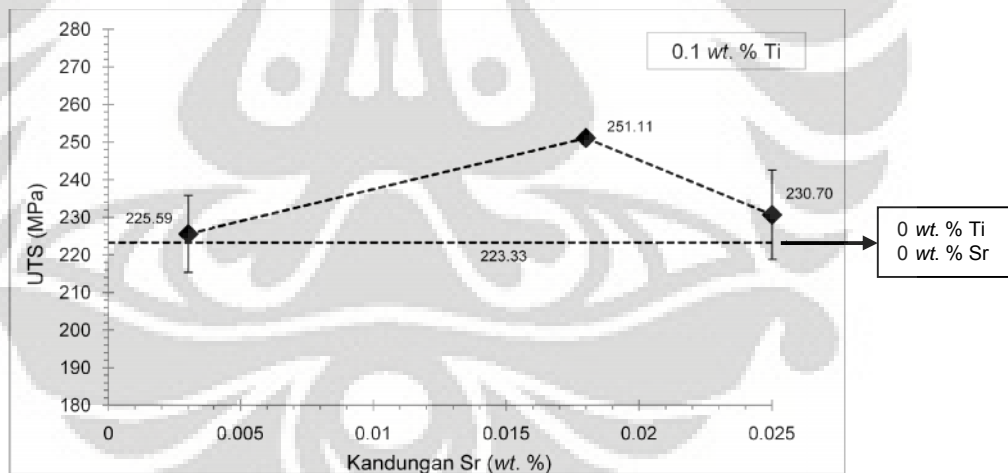


**Gambar 4. 11** Perbandingan morfologi porositas mikro pada sampel fluiditas ; (a) tanpa penambahan, (b) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (c) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (d) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kombinasi penambahan Ti dan Sr meningkatkan porositas. Dimana peningkatan ini sebanding dengan peningkatan Sr yang ditambahkan. 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.

#### 4.3.4 Pengaruh Komposisi 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr Terhadap Karakteristik Fluiditas Paduan Aluminium AC4B

Gambar 4.12 memperlihatkan perubahan karakteristik fluiditas pada paduan aluminium AC4B setelah penambahan Ti dan Sr. Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai fluiditas setelah penambahan Ti dan Sr. Pada komposisi 0.1 wt. % Ti, penambahan 0.003 wt. % Sr meningkatkan nilai fluiditas sebesar 47.13 % dari 40.1 cm menjadi 59.0 cm. Penambahan Sr pada komposisi 0.018 wt. % Sr meningkatkan nilai fluiditas sebesar 7.45 % dari 59.0 cm menjadi 63.4 cm dibandingkan dengan penambahan Sr sebelumnya. Sedangkan penambahan 0.025 wt. % Sr menurunkan nilai fluiditas sebesar 20.80 % dari 63.4 cm menjadi 50.2 cm dibandingkan dengan penambahan 0.018 wt. % Sr. Nilai fluiditas ini juga lebih rendah apabila dibandingkan dengan nilai fluiditas pada penambahan 0.003 wt. % Sr. Namun secara umum terlihat bahwa pada semua variabel penambahan Sr dengan komposisi Ti yang digunakan dalam penelitian ini dan fluiditas terbaik diperlihatkan pada level penambahan 0.018 wt. % Sr.

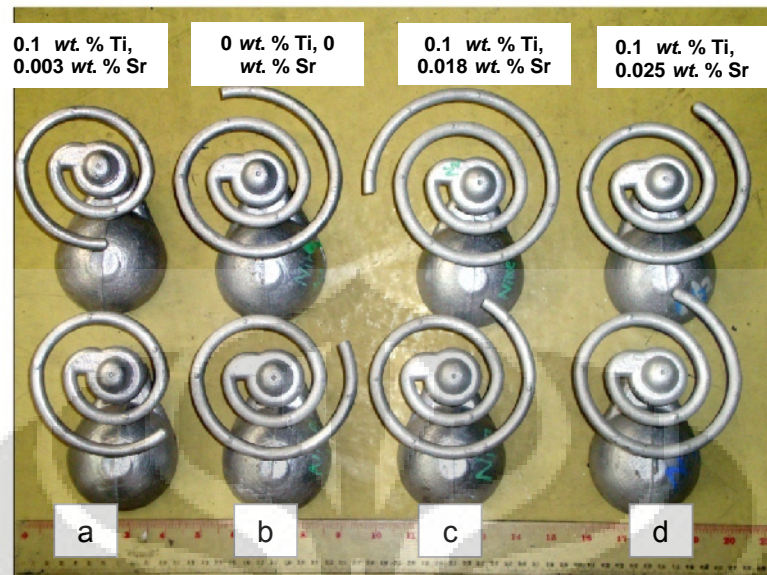


**Gambar 4. 12** Perubahan komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr terhadap karakteristik fluiditas paduan aluminium AC4B dibandingkan dengan tanpa penambahan Ti dan Sr.

Fluiditas logam cair memegang peranan penting dalam menentukan kualitas dari benda cor yang dihasilkan khususnya berkaitan dengan cacat yang sering terjadi pada benda cor seperti *misrun*. Fluiditas adalah sifat mampu alir

logam cair yang merupakan kemampuan logam cair untuk mengisi rongga-rongga cetakan dalam proses pengecoran logam<sup>[30]</sup>. Kandungan stronsium memegang peranan cukup penting dalam menentukan nilai fluiditas dimana stronsium sebagai *modifier* yang berperan menurunkan temperatur eutektik nukleasi dan pertumbuhan sehingga kisaran pembekuan menjadi lebih pendek dan diperoleh peningkatan fluiditas. Selain itu stronsium berperan menurunkan tegangan permukaan dari aluminium cair yang menghasilkan karakteristik mampu alir yang lebih baik<sup>[13]</sup>. Dengan kombinasi Ti dan Sr dapat menunda titik koherensi dendrit sehingga membuat jarak partikel antara -Al menjadi lebih kecil sehingga mampu alir menjadi lebih baik<sup>[42]</sup>.

Pada penelitian ini level penambahan Ti yang digunakan sama sehingga yang berperan mempengaruhi karakteristik fluiditas adalah Sr. Apabila mengacu pada literatur diatas, seharusnya dengan level penambahan Sr yang semakin tinggi akan menghasilkan nilai fluiditas yang semakin baik. Tetapi dalam penelitian ini, penambahan 0.025 wt. % Sr menunjukkan penurunan nilai fluiditas jika dibandingkan dengan penambahan 0.018 wt. % Sr dan nilai fluiditasnya lebih rendah daripada penambahan Sr dalam jumlah yang sangat kecil yaitu 0.003 wt. % Sr. Berdasarkan banyak penelitian diketahui bahwa kadar stronsium yang efektif dalam memodifikasi paduan Al-Si adalah antara 0.01-0.02 wt. % Sr<sup>[13]</sup>. Dari hasil penelitian ini ternyata pada komposisi 0.1 wt. % Ti, penambahan Sr diluar kadar tersebut akan mengurangi efektifitas dalam memperbaiki karakteristik fluiditas. Selain hal – hal diatas, penambahan Ti dan Sr juga menghasilkan suatu perubahan secara fisik, dimana penampakan permukaan dari komponen paduan AC4B menjadi berwarna keputihan seperti tampak pada Gambar 4.13.

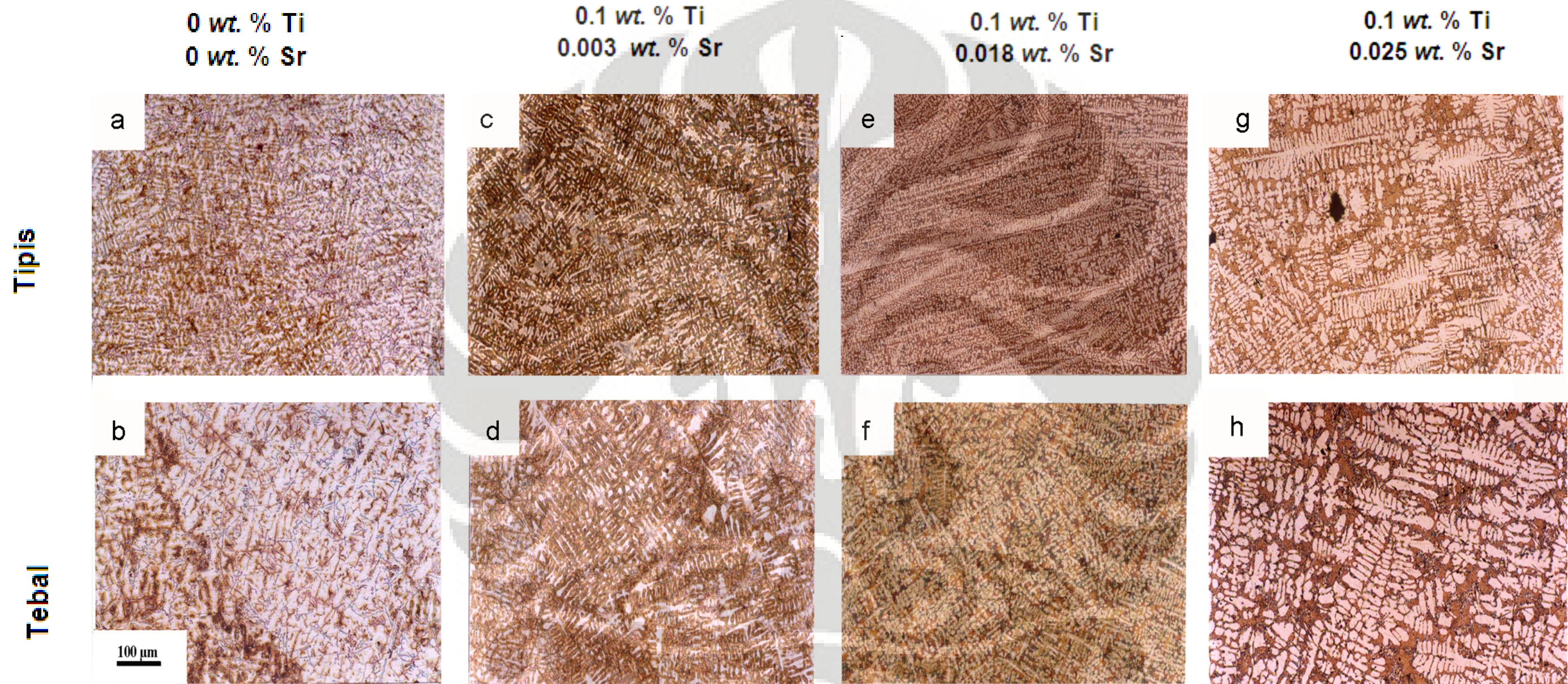


**Gambar 4. 13** Perbandingan visual fluiditas.(a) komposisi tanpa penambahan (0 wt. % Ti, 0 wt. % Sr), (b) 0.1 wt.% Ti + 0.003 wt.% Sr, (c) 0.1 wt.% Ti + 0.018 wt.% Sr, (d) 0.1 wt.% Ti + 0.025 wt.% Sr.

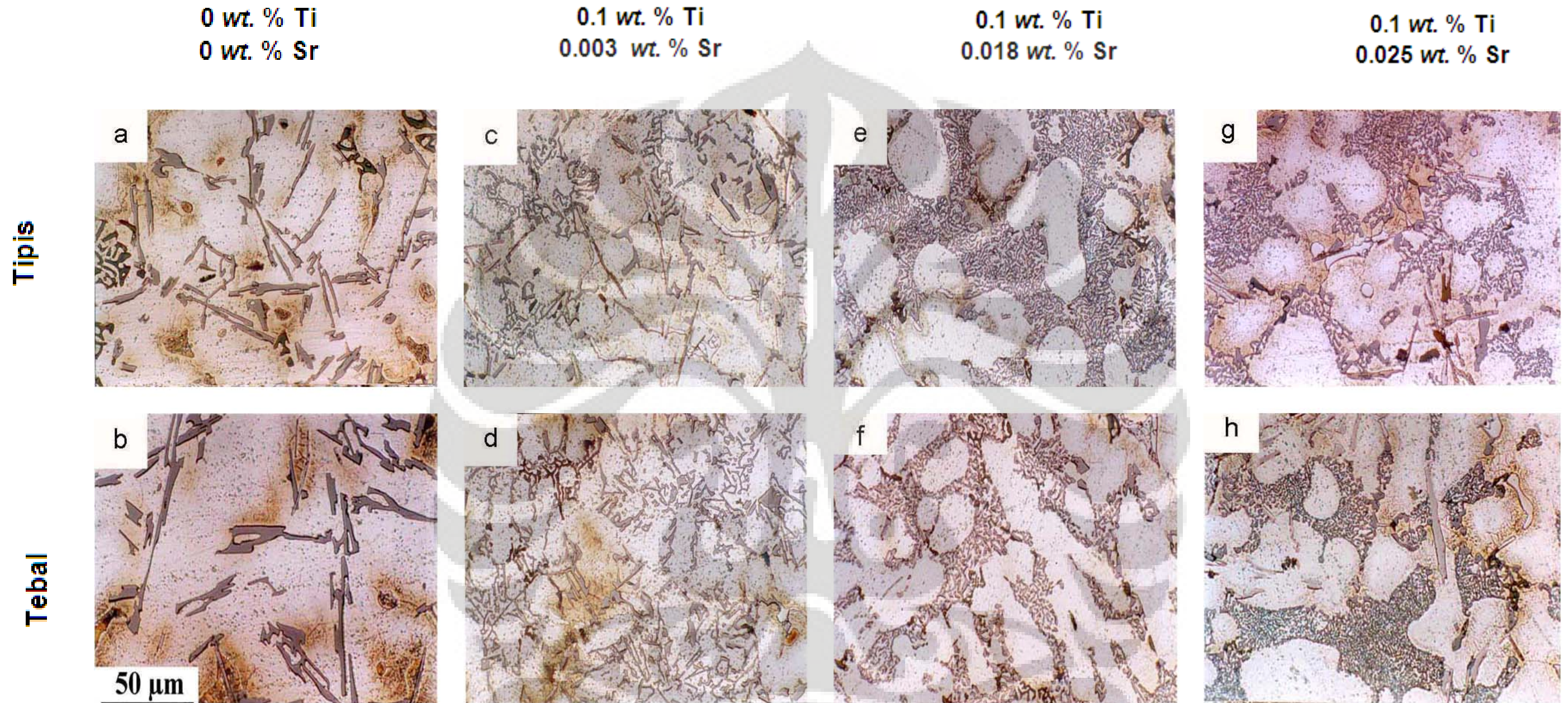
#### 4.3.6 Perubahan Struktur Mikro Paduan Aluminium AC4B Setelah Penambahan 0.1 wt. % Ti dan Variasi Sr

Pada Gambar 4.14 dan 4.15 diperlihatkan perubahan struktur mikro komponen *cylinder head* setelah dilakukan kombinasi penambahan Ti dan Sr. Pengamatan struktur mikro dilakukan pada sampel normal (tanpa penambahan apapun), serta pada komposisi 0.1 wt. % Ti dengan variabel penambahan Sr yaitu 0.003, 0.018, dan 0.025 wt. % Sr. Pada penelitian ini sampel untuk pengamatan struktur mikro diambil pada bagian tebal dan tipis.

Struktur mikro akan mempengaruhi sifat-sifat yang dimiliki oleh material. Pada paduan aluminium tuang komponen dari struktur mikro yang mempengaruhi sifat mekanis adalah ukuran, bentuk dan distribusi fasa intermetalik, ukuran dan bentuk butir, nilai DAS (*Dendrite Arm Spacing*), serta modifikasi eutektik<sup>[15]</sup>. Secara umum morfologi yang terdapat pada struktur mikro paduan aluminium AC4B adalah struktur dendrit yang merupakan fasa aluminium primer ( -Al) dan dan fasa silikon eutektik yang berupa pelat-pelat tajam kasar yang berwarna gelap dan fasa intermetalik pada daerah interdendritiknya.

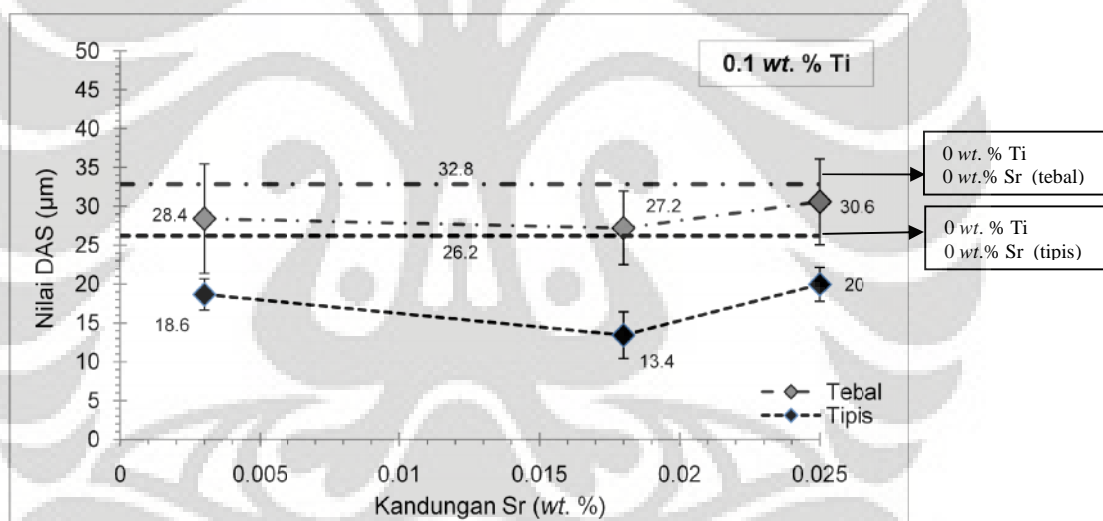


**Gambar 4. 14** Perubahan struktur mikro pada paduan aluminium AC4B setelah ditambahkan Ti dan Sr , (a-b) tanpa penambahan , (c-d) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (e-f) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (g-h) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr yang memperlihatkan perubahan DAS.



**Gambar 4. 15** Perubahan struktur mikro pada paduan aluminium AC4B setelah ditambahkan Ti dan Sr , (a-b) tanpa penambahan , (c-d) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (e-f) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (g-h) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr yang memperlihatkan perubahan morfologi silikon.

Pada Gambar 4.16 diperlihatkan perubahan nilai DAS pada paduan aluminium AC4B setelah dilakukan penambahan Ti dan Sr. DAS adalah jarak antar lengan dendrit yang akan mempengaruhi sifat mekanis paduan aluminium. Kecepatan proses pembekuan akan mempengaruhi nilai DAS. Pada bagian tipis, nilai DAS pada komposisi 0.1 wt. % Ti dengan penambahan 0.003 wt. % Sr menurun sebesar 29 % yaitu dari 26.2  $\mu\text{m}$  menjadi 18.6  $\mu\text{m}$ . Pada penambahan 0.018 wt. % Sr nilai DAS menurun sebesar secara signifikan sebesar 28 % yaitu dari 18.6  $\mu\text{m}$  menjadi 13.4  $\mu\text{m}$  dibandingkan pada penambahan sebelumnya. Penurunan ini cukup signifikan. Sementara itu pada penambahan 0.025 wt. % Sr terjadi peningkatan nilai DAS sebesar 49 % dari 13.4  $\mu\text{m}$  menjadi 20  $\mu\text{m}$  dibandingkan dengan nilai DAS pada penambahan 0.018 wt. % Sr.



**Gambar 4. 16** Perubahan nilai DAS pada paduan aluminium AC4B setelah penambahan 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr dibandingkan dengan tanpa penambahan Ti dan Sr.

Sedangkan pada bagian tebal pada komposisi 0.1 wt. % Ti penambahan 0.003 wt. % Sr menurunkan nilai DAS sebesar 13 % dari 32.8  $\mu\text{m}$  menjadi 28.4  $\mu\text{m}$ . Sementara penambahan 0.018 wt. % Sr menurunkan nilai DAS 4.2 % dari 28.4  $\mu\text{m}$  menjadi 27.2  $\mu\text{m}$  dibandingkan dengan penambahan sebelumnya. Pada penambahan 0.025 wt. % Sr terjadi peningkatan nilai DAS sebesar 12.5 % dari 27.2  $\mu\text{m}$  menjadi 30.6  $\mu\text{m}$  dibandingkan dengan penambahan 0.018 wt. % Sr.



Secara keseluruhan terlihat bahwa nilai DAS menjadi lebih rendah setelah penambahan Ti dan Sr baik pada bagian tipis maupun bagian tebal. Serta dapat terlihat bahwa bagian tipis memiliki nilai DAS yang lebih rendah daripada bagian tebal. Peningkatan nilai DAS ini sesuai studi yang dilakukan A.K Prasada Rao *et al*<sup>[36]</sup> dimana pada paduan Al-7Si diberikan kombinasi penambahan penghalus butir dan *modifier*. Dari hasil penelitian tersebut didapat bahwa dengan kombinasi penambahan tersebut nilai DAS yang diperoleh menjadi lebih rendah dibandingkan dengan penambahan penghalus butir saja atau modifikasi saja serta tanpa penambahan apapun.

Dari hasil penelitian ini, ternyata pada level penambahan Ti yang sama, penambahan Sr pada level yang berbeda akan mempengaruhi nilai DAS yang didapat. Dengan kata lain bukan hanya Ti yang mempengaruhi penghalusan dendrit tetapi kandungan Sr juga mempengaruhi penghalusan dendrit yang terjadi. Menurut studi yang dilakukan mengenai hubungan antara modifikasi dengan kecepatan pembekuan, diketahui bahwa modifikasi menurunkan nilai DAS hingga  $20 \mu\text{m}^{[21]}$ . Seiring dengan penambahan kadar Sr maka DAS yang didapat menjadi semakin rendah dan optimum pada level penambahan 0.018 wt. % Sr. Sedangkan penambahan pada level 0.025 wt. % Sr kembali menaikkan nilai DAS yang artinya efek penghalusan butirnya berkurang.

Selain informasi mengenai DAS, dalam pengamatan struktur mikro juga diamati perubahan pada kristal silikon akibat perlakuan modifikasi Sr. Melalui pengamatan ini akan diketahui pengaruh kehadiran Ti terhadap modifikasi pada beberapa level penambahan Sr. Tingkat modifikasi yang terjadi kemudian dicocokkan ke dalam tingkatan modifikasi menurut ASM standar (Gambar 2.19). Gambar 4.15 memperlihatkan visual dari kristal silikon eutektik paduan aluminium AC4B setelah penambahan Ti dan Sr. Sesuai dengan literatur yang ada, terlihat terjadi perubahan pada struktur silikon eutektik yang semula berbentuk pelat – pelat yang tajam menjadi *fibrous* yang halus<sup>[1]</sup>. Pada keadaan normal ditingkat modifikasinya adalah kelas A atau tidak termodifikasi. Sedangkan pada komposisi 0.1 wt. % Ti, tingkat modifikasi pada penambahan 0.003 wt. % Sr adalah kelas B dengan struktur lamelar. Penambahan 0.0018 wt. % Sr tingkat modifikasinya adalah kelas E dengan struktur silikon *fibrous*. Pada

0.025 wt. % Sr tingkat modifikasinya dikategorikan kelas D struktur *fibrous* bercampur lamelar. Hal disebabkan oleh adanya kristal silikon yang berbentuk lamelar pada beberapa bagian. Namun hal yang menarik adalah struktur *fibrous* pada penambahan 0.025 wt. % Sr lebih halus dari pada struktur *fibrous* dari silikon yang terbentuk pada penambahan 0.018 wt.% Sr.

Secara keseluruhan dapat dikatakan bahwa struktur yang termodifikasi paling baik dicapai pada komposisi 0.1 wt. % Ti dengan penambahan 0.018 wt. % Sr. Dan pada komposisi Ti yang sama penambahan Sr pada komposisi yang lebih tinggi akan menyebabkan turunnya tingkat modifikasi. Hal ini kemungkinan dapat disebabkan oleh dua hal. Yang pertama adalah mulai terjadinya peristiwa overmodifikasi pada penambahan 0.025 wt. % Sr. Menurut literatur peristiwa overmodifikasi akhirnya akan menghasilkan terbentuknya silikon yang kasar pada beberapa bagian dan silikon yang lebih halus pada bagian yang lain karena adanya adsorpsi Sr yang tinggi pada permukaan silikon tertentu sehingga pada bagian lainnya pertumbuhan facet tetap berlangsung (tidak terjadi modifikasi). Selain itu terbentuknya senyawa  $Al_4SiSr$  juga menyebabkan tubuhnya silikon primer kasar yang saling terhubung. Untuk itu perlu dibuktikan adanya fasa intermetalik ini. Hal lain yang mempengaruhi adalah besar GRF yang menurun dibandingkan pada penambahan 0.018 wt. % Sr. Namun penurunan ini tidak begitu signifikan sehingga pengaruh penurunan sifat ini dapat dikatakan lebih dipengaruhi oleh Sr. Yang kedua adalah terjadinya penurunan kandungan Sr efektif untuk memodifikasi kristal silikon dan Ti efektif yang berkurang sehingga kemampuan untuk menghambat laju pertumbuhan butir berkurang. Hal ini dapat disebabkan karena adanya interaksi antara Ti dan Sr. Beberapa penelitian dilakukan untuk mempelajari kemungkinan adanya efek poisoning yang diduga akibat adanya interaksi antara penghalus butir dan *modifier* yang menyebabkan tereduksinya efek masing-masing. Tetapi hal ini harus dibuktikan dengan adanya sesuatu yang menandakan terjadinya interaksi antara Sr-Ti. Oleh karena itu dilakukan pengamatan melalui SEM-EDAX untuk menemukan kemungkinan penyebab penurunan sifat mekanis ini. Pengamatan melalui SEM-EDAX akan dikonfirmasi pada bagian 4.3.

Apabila dikaitkan antara tingkat modifikasi dengan nilai DAS yang didapat terlihat pola yang sama yaitu penambahan Ti dan Sr akan meningkatkan kualitas dari paduan aluminium silikon yaitu dengan adanya mekanisme penghalusan butir dan modifikasi silikon eutektik. Pada komposisi Ti yang sama, perbedaan level penambahan Sr akan mempengaruhi struktur mikro yang didapat. Seiring dengan meningkatnya penambahan Sr terjadi penghalusan butir dan modifikasi yang semakin baik dan optimum pada level penambahan yang ke dua yaitu 0.018 wt. % Sr. Sedangkan apabila komposisi Sr ditingkatkan pada level 0.025 wt. % Sr akan terjadi penurunan baik pada efek penghalusan butir dan modifikasi. Hal ini tentunya akan mempengaruhi sifat mekanik dari paduan aluminium AC4B. Seperti telah dibahas pada bagian 4.3.1 dan 4.3.2 mengenai pengaruh penambahan penghalus butir Ti dan *modifier* Sr terhadap kekerasan dan kekuatan tarik, terlihat pola yang sesuai yaitu peningkatan optimum dari kedua sifat tersebut didapat pada komposisi 0.1 wt. % Ti dengan level penambahan 0.018 wt. % Sr. Pengamatan struktur mikro ini mengkonfirmasi peningkatan sifat mekanik yang didapat. Tabel 4.5 menampilkan perbandingan karakteristik paduan aluminium AC4B terhadap nilai *growth restricting factor* (GRF).

**Tabel 4. 5** Perbandingan karakteristik paduan aluminium AC4B terhadap GRF

% Ti	% Sr	UTS (%)	elongasi (%)	Kekerasan (%)		DAS (%)		GRF
				Tebal	Tipis	Tebal	Tipis	
0.1	0.003	+3.31	-7.9	+11.34	+11.15	-29	-13	84.162
0.1	0.018	+11.3	-2.29	+6.27	+5.49	-28	-4.2	89.953
0.1	0.025	-8.12	+17.18	- 2.95	- 4.25	+49	+ 12.5	88.687

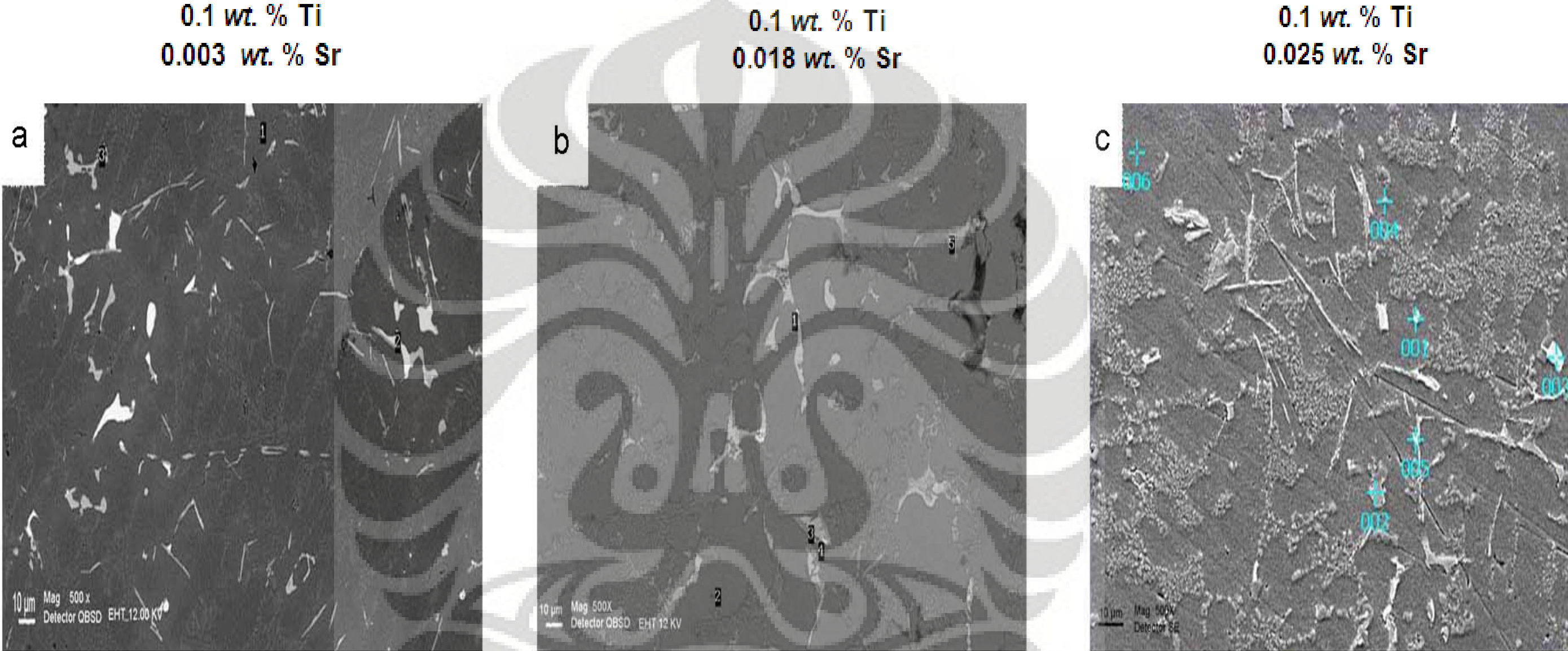
#### 4.4 Pengamatan Struktur Mikro Dengan SEM dan EDAX

Hasil pengujian SEM pada sampel dengan kombinasi penambahan 0.1 wt. % Ti dengan 0.003, 0.018 dan 0.025 wt. % Sr diperlihatkan pada Gambar 4.17. Hasil pengamatan dengan SEM dapat dibedakan dari bentuk (morfologi), warna, serta komposisi kimia fasa-fasa yang ada. Proses identifikasi fasa – fasa tersebut dilakukan menggunakan EDAX. Dilakukan perbandingan dengan literatur untuk mengetahui jenis fasa yang ada dengan memperhatikan komposisi mayoritas

pembentuk fasa tersebut. Hasil analisis komposisi mikro menggunakan EDAX pada setiap titik di Gambar 4.17 ditabulasi pada Tabel 4.4.

Seperti terlihat pada Gambar 4.17 a pada sampel dengan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr terdapat 3 titik identifikasi dengan EDAX yang hasilnya diperlihatkan Tabel 4.5 dimana ditemukan kandungan Ti pada titik nomor 1. Penemuan Ti ini penting karena Ti berperan sebagai pembentuk inti selain berperan sebagai unsur terlarut yang tersegregasi sehingga menghalangi pertumbuhan butir. Melalui analisa komposisi diketahui bahwa unsur Ti pada titik 1 terdapat pada fasa  $Al_2Cu$  dan fasa kaya Al. Pada titik lainnya ditemukan fasa intermetalik antara lain fasa  $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ ,  $Al_2Cu^{[13]}$  serta kemungkinan segregasi Si dan Fe<sup>[26]</sup>. Namun, tidak ditemukan kandungan Sr pada komposisi ini. Hal ini kemungkinan disebabkan terlalu kecilnya persentase penambahan Sr sehingga Sr larut.

Pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr ditemukan kandungan Ti pada titik nomor 1 (Gambar 4.17b). Selain unsur tadi juga diidentifikasi fasa intermetalik yang ada antara lain fasa  $Al_2Cu$ ,  $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2^{[13]}$  dan kemungkinan segregasi Si<sup>[26]</sup>.



Gambar 4. 17 Struktur mikro (SEM) pada paduan aluminium AC4B setelah ditambahkan Ti dan Sr , (a) 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (b) 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (c) 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr.

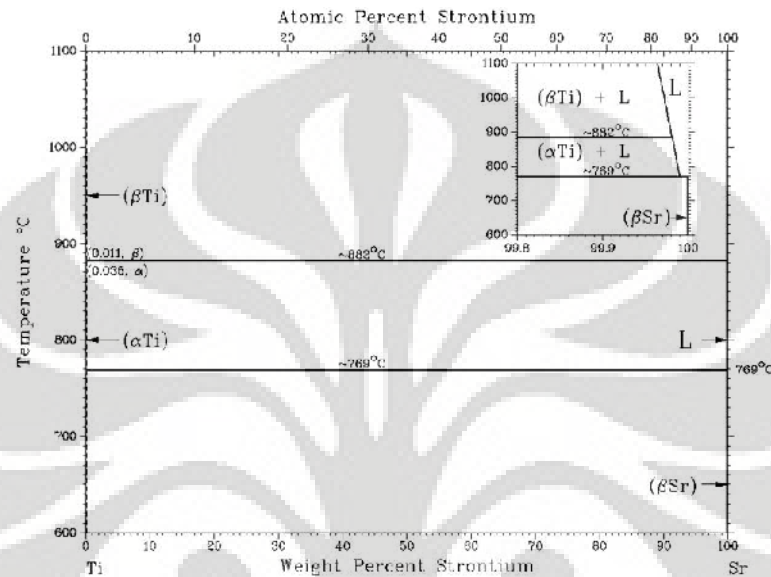
**Tabel 4. 6** Hasil analisis komposisi paduan aluminium AC4B pada Gambar 4.17 (a) komposisi 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr, (b) komposisi 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr, (c) komposisi 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr.

Sr (wt. %)	No. Foto	No. Titik	Unsur (wt. %)							Elemen lain	Warna	Fasa yang mungkin
			Al	Si	Ti	Sr	Cu	Fe	Mn			
0.003	a	1	81.45	1.39	4.36	-	9.22	-	-	Sisa	abu-abu	TiAl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> Cu, Al <sup>[13]</sup> , segregasi Si
		2	37.69	0.63	-	-	59.61	-	-	Sisa	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu Al <sub>15</sub> (Mn,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> <sup>[13]</sup> , Al, segregasi Fe
		3	67.72	4.26	-	-	-	17.45	5.18	Sisa	abu-abu	
0.018	c	1	28.9	9.94	3.4	-	73.26	37.91	-	Sisa	abu-abu	TiAl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> Cu, AlSi <sup>[13]</sup>
		2	88.27	8.99	-	-	-	-	-	Sisa	abu-abu	Al-Si
		3	26.17	0.68	-	-	70.61	-	-	Sisa	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu <sup>[13]</sup> , segregasi Si
		4	78.31	1.29	-	-	13.1	-	-	Sisa	putih	Al <sub>2</sub> Cu, Al, segregasi Si
		5	45.7	5.78	-	-	12.55	22.67	5.9	Sisa	abu-abu	Al <sub>15</sub> (Mn,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> Cu
0.025	e	1	20.48	9.27	0.09	1.06	29.94	0.24	-	Sisa	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu <sup>[13]</sup> , segregasi Ti, Sr, Fe Al <sub>15</sub> (Mn,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> Cu <sup>[13]</sup> , segregasi Sr
		2	32.45	5.07	-	0.82	4.64	10.7	5.19	Sisa	putih	
		3	25.62	0.42	0.02	0.41	36.31	0.09	-	Sisa	abu-abu	Al <sub>2</sub> Cu <sup>[13]</sup> , segregasi Si, Ti, Sr, Fe
		4	17.27	30.3	0.09	1.87	-	0.06	-	Sisa	abu-abu	Al-Si, segregasi Ti, Sr, Fe Al <sub>2</sub> Cu <sup>[13]</sup> , segregasi Si, Ti, Sr, Fe, Mn
		5	27.55	1.25	0.07	0.39	33.31	0.75	0.26	Sisa	putih	

Sementara itu pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.025 wt. % Sr hampir pada semua titik ditemukan kandungan Ti dan Sr. Kedua unsur ini ditemukan bersama dengan fasa intermetalik yang mengandung Al<sub>2</sub>Cu atau Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> serta kemungkinan unsur Fe, Si, Mn yang mengalami segregasi terpisah. Seperti telah dijelaskan sebelumnya pada bagian 4.3 bahwa terjadi penurunan sifat mekanik pada paduan aluminium komposisi ini. Dimana dicurigai terjadinya interaksi antara Ti dan Sr. Bentuk interaksi yang dapat diamati adalah bentuk persenyawaan diantara unsur Ti dan Sr. Namun, apabila merujuk pada diagram fasa Sr-Ti seperti ditunjukkan Gambar 4.18 maka tidak mungkin terjadi persenyawaan antara Ti dan Sr pada kisaran temperatur penelitian ini. Pada penelitian ini rentang temperatur aluminium cair dijaga pada 710 ± 10 °C dan pada temperatur inilah penambahan Ti dan Sr dilakukan. Menurut diagram fasa Ti-Sr kemungkinan terjadinya persenyawaan Ti-Sr adalah pada temperatur diatas 769 °C. Sehingga kemungkinan terbesar adalah Sr dan Ti mengalami segregasi terpisah. Ti dapat bersegregasi sendiri sebagai unsur terlarut dan/atau membentuk

Universitas Indonesia

fasa  $TiAl_3$  sebagai pembentuk inti. Sedangkan Sr dapat berikatan dengan Al dan Si membentuk senyawa  $Al_4SrSi$  atau  $Al_2Si_2Sr$  yang menandakan terjadinya peristiwa overmodifikasi<sup>[1]</sup>. Oleh karena itu dapat disimpulkan tidak ditemukan bentuk interaksi antara Ti dan Sr dalam penelitian ini. Unsur – unsur yang tersegregasi akan mempengaruhi besarnya GRF pada saat proses pembekuan.

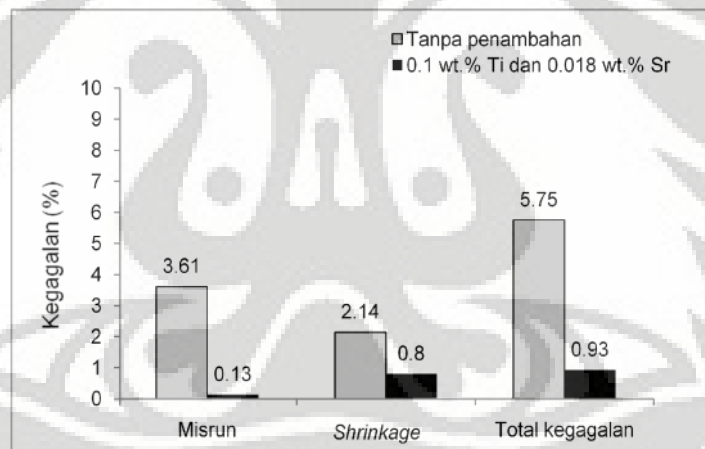


Gambar 4. 18 Diagram fasa Ti-Sr<sup>[45]</sup>.

Dikarenakan tidak terjadi interaksi antara Ti dan Sr pada penelitian ini, maka penyebab turunnya sifat mekanis paduan aluminium AC4B pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.025 wt.% Sr kemungkinan disebabkan oleh peristiwa overmodifikasi yang diperkuat dengan adanya Sr yang tersegregasi yang kemungkinan berikatan dengan Al dan Si dalam bentuk  $Al_4SrSi$  akibatnya Sr terkonsentrasi pada fasa ini sehingga tidak cukup memodifikasi beberapa bagian pada paduan aluminium AC4B. Hal ini menyebabkan munculnya kembali kristal silikon yang berbentuk lamelar. Selain itu yang juga dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik pada komposisi ini adalah dengan berkurangnya nilai GRF karena pengaruh unsur terlarut pada paduan aluminium AC4B. Secara keseluruhan unsur Ti ditemukan pada fasa intermetalik yang mengandung Cu dan/ atau Fe. Hal ini kemungkinan disebabkan Ti bertindak juga sebagai pembentuk inti dari fasa intermetalik tersebut.

#### 4.5 Pengaruh Penambahan Ti Dan Sr Terhadap Kegagalan Komponen *Cylinder Head* Hasil LPDC

Salah satu masalah yang melatarbelakangi penelitian ini adalah besarnya angka kegagalan dari komponen *cylinder head* hasil LPDC yang disebabkan oleh adanya cacat. Cacat yang sering muncul pada komponen *cylinder head* antara lain seperti misrun, *shrinkage*, porositas serta bocor. Kegagalan ini memberikan kerugian dimana komponen yang gagal ini tidak dapat masuk ke dalam produksi serta kerugian dari sisi materi. Pada Gambar 4.19 diperlihatkan perbandingan persentasi kegagalan akibat cacat pada kondisi *as-cast* komponen *cylinder head* tanpa penambahan dan setelah dilakukan kombinasi penambahan 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr dengan jumlah masing-masing 764 komponen. Alasan pemilihan komposisi ini sebagai *trial* pada kondisi produksi komponen *cylinder head* dikarenakan pada komposisi ini terjadi peningkatan sifat mekanik yang optimum seperti yang telah dibahas dalam sub bab 4.3.

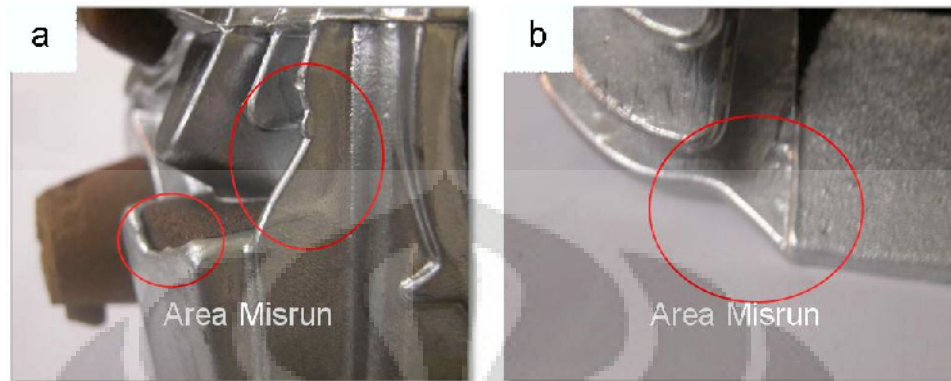


**Gambar 4. 19** Perbandingan presentasi kegagalan akibat misrun dan *shrinkage* pada paduan aluminium AC4B tanpa penambahan dan pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.

Seperti terlihat pada Gambar 4.19 dengan penambahan 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terjadi penurunan kegagalan akibat misrun dari 3.61 % menjadi 0.13%. Selain itu juga terjadi penurunan kegagalan akibat *shrinkage* dari 2.14 % menjadi 0.8 %. Secara keseluruhan total kegagalan pada komponen *cylinder head* *as-cast* mengalami penurunan sebesar 83.8 % dari 5.75 menjadi 0.93 %. Gambar 4.20

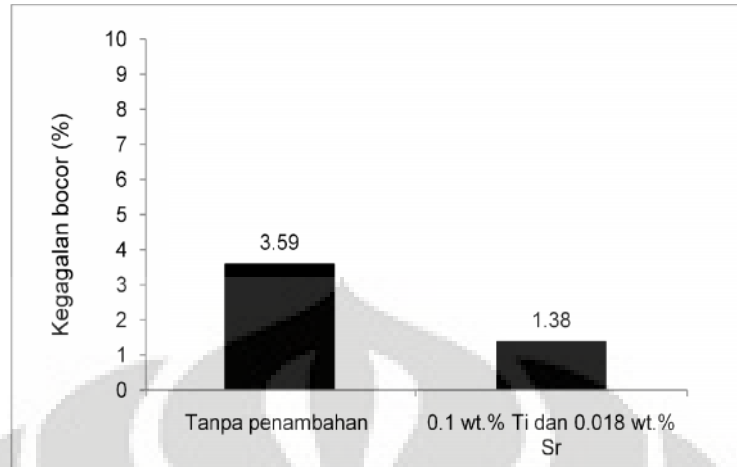


menunjukkan visual cacat misrun pada komponen *cylinder head* pada komponen tanpa penambahan Ti dan Sr.



**Gambar 4. 20** Cacat pada komponen *cylinder head* tanpa penambahan (a)(b) misrun.

Untuk uji bocor harus dilakukan untuk mengetahui kelayakan dari *cylinder head* tersebut sehingga tidak terjadi kebocoran saat digunakan. Kebocoran ini tidak dapat terlihat dengan mata karena kebocoran ini dapat terjadi pada bagian dalam *cylinder head*. Kebocoran ini dapat terjadi karena adanya porositas ataupun mikro *shrinkage* 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 4.21 menampilkan perbandingan persentase kegagalan akibat kebocoran komponen *cylinder head* tanpa penambahan dan pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terjadi penurunan kegagalan akibat bocor sebesar 61.5 % dari 3.59 menjadi 1.38 %.



**Gambar 4. 21** Perbandingan persentase kegagalan akibat bocor pada komponen *cylinder head* tanpa penambahan dan pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 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>[20]</sup>. Penurunan *shrinkage* pada komponen dengan penambahan Ti dan Sr berhubungan dengan meningkatnya kemampuan *feeding* paduan aluminium. Selama proses pembekuan, sangatlah penting untuk menyeimbangkan volume dari aluminium yang menyusut dengan memasok aluminium yang masih cair atau yang disebut juga *feeding*. Dengan ukuran dendrit yang besar pada aluminium, tahanan terhadap mekanisme *feeding* akan terjadi lebih awal. Apabila mekanisme *feeding* terhalang maka akan terjadi penyusutan. Dengan penambahan Ti dan Sr, ukuran dendrit menjadi lebih halus sehingga *feeding* dapat berlangsung lebih lama<sup>[7]</sup>.

Kegagalan bocor merupakan kegagalan akibat adanya *shrinkage* dan porositas pada bagian dalam yang menembus hingga ke bagian luar *cylinder head*. Dengan menurunnya persentase *shrinkage* maka kemungkinan terjadi bocor semakin rendah. Peningkatan jumlah porositas makro seperti yang dibahas dalam bagian 4.3.4 ternyata tidak menyebabkan kegagalan bocor meningkat melainkan terjadi penurunan persentase kegagalan. Hal ini kemungkinan disebabkan karena

porositas mikro yang terjadi telah terdispersi. Sehingga porositas tidak terpusat hingga menyebabkan kebocoran.

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 0.1 wt. % Ti dan 0.018 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 aluminium cair, 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

Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Kombinasi komposisi 0.1 wt. % Ti dan variasi Sr meningkatkan sifat mekanik, porositas, karakteristik fluiditas dan tingkat modifikasi serta menurunkan DAS (*dendrite arm spacing*).
- 2) Kekerasan optimum dicapai pada 0.1 wt.% Ti dan 0.018 wt.% Sr yaitu sebesar 52.48 HRB pada bagian tipis dan 51.30 HRB bagian tebal.
- 3) Nilai UTS optimum dicapai pada 0.1 wt.% Ti dan 0.018 wt.% Sr yaitu sebesar 251.1 MPa sedangkan nilai elongasi optimum pada 0.1 wt.% Ti dan 0.025 wt.% Sr sebesar 2.1 %. Namun, nilai elongasi yang didapat dalam penelitian ini dianggap tidak merepresentasikan keuletan paduan aluminium AC4B.
- 4) Nilai fluiditas optimum dicapai komposisi 0.1 wt. % Ti, 0.018 wt. % Sr sebesar 63.4 cm.
- 5) Kombinasi penambahan Ti dan Sr meningkatkan kuantitas dan kualitas porositas. Dimana peningkatan ini sebanding dengan peningkatan Sr yang ditambahkan. 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.
- 6) Nilai DAS terendah dicapai pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr yaitu sebesar 13.4  $\mu\text{m}$  pada bagian tipis dan 27.2  $\mu\text{m}$  pada bagian tebal.
- 7) Pada komposisi 0.1 wt. % Ti, derajat modifikasi pada penambahan 0.003 wt. % Sr adalah kelas B dengan struktur lamelar. Penambahan 0.0018 wt. % Sr derajat modifikasinya adalah kelas E dengan struktur silikon *fibrous*. Pada 0.025 wt. % Sr derajat modifikasinya dikategorikan kelas D struktur *fibrous* bercampur lamelar.

- 8) Penghalusan butir terjadi akibat adanya unsur terlarut yang memiliki GRF (*growth limiting factor*) dimana unsur yang memiliki kemampuan segregasi untuk menghambat pertumbuhan butir adalah Ti. Pada komposisi Ti yang sama, perbedaan kandungan Sr mempengaruhi kemampuan penghambatan pertumbuhan butir.
- 9) Penggabungan proses modifikasi dan penghalusan butir akan menghasilkan struktur kristal yang termodifikasi menjadi struktur *fibrous* dan dendrit yang halus dengan hasil optimum pada 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr serta terjadi peristiwa overmodifikasi pada level 0.025 wt. % Sr.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan :

- 1) Penggunaan cetakan uji fluiditas metode spiral tanpa dilengkapi *thermocouple* yang tersambung dengan sistem pemanas memiliki banyak kelemahan, terutama berkaitan dengan karakteristik fluiditas yang dipengaruhi temperatur. Sebaiknya cetakan uji fluiditas terhubung dengan sistem pemanas dan *termocouple* secara otomatis.
- 2) Dalam pengambilan sampel uji tarik dan uji fluiditas sebaiknya menggunakan aluminium cair yang sama dengan aluminium cair untuk injeksi LPDC agar hasil pengujian yang didapat lebih representatif.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Gruzleski, John E, Closset, Bernard M. (1990). *The Treatment of Liquid Aluminum Silicon Alloys*. Illinois : American Foundrymen's Society Inc.
- [2] Haque M.M., Maleque, M.A. (1988). *Effect of process variables on structure and properties of aluminum-silicon piston alloy*. Journal of Material Processing Technology. 77, 122-28.
- [3] Harion, M. Husni. (2008). *Studi pengaruh penambahan 0.019 wt % T dan 0.029 wt % Ti terhadap karakteristik material paduan aluminium AC4B dengan proses low pressure die casting*. Depok. Universitas Indonesia.
- [4] Parapat, Thomas M. (2006). *Studi pengaruh penambahan 0.0015 wt. % Sr terhadap karakteristik paduan AC4B hasil low pressure die casting*. Depok, Universitas Indonesia.
- [5] Jorstad, John.L, Rasmussen, Wayne.M. (1993). *Aluminum Casting Technology-2nd edition*. Illinois: The American Foundry Society.
- [6] Easton, Mark & StJohn, David. (1999). *Grain Refinement of Aluminum Alloys: Part I. The Nucleant and Solute Paradigms—A Review of the Literature*. Australia: University of Queensland.
- [7] Metallurg Aluminum. (1998). *Grain Refinement of Al-Si Foundry Alloys*. (n.d). London and Scandinavian Metallurgical.
- [8] [http://id.wikipedia.org/wiki/Cylinder\\_head/](http://id.wikipedia.org/wiki/Cylinder_head/) diakses pukul 16.00/ 23 Mei 2009
- [9] ASM International. (1988). *ASM Handbook volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Metal Park, Ohio: ASM International.
- [10] Polmear, I.J. (2006). *Light Alloys : Metallurgy of the Light Metals. Fourth Edition*. Oxford : Butterworth-Heinemann.
- [11] Metallurg Aluminum. (1998). *A Guide to Melt Treatment in the Aluminum Foundry*. (n.d). London and Scandinavian Metallurgical.


- [12] ASM International. (1993). *ASM Specialty Handbook : Aluminum and Aluminum Alloys*. Ohio: American Society for Metals.
- [13] Backerud, Lennart *et al.* (1996). *Foundry Alloy Volume 2 : Solidification of Aluminum Alloy*. Sweden: Department of Structural Chemistry University of Stockholm.
- [14] Mondolfo, L.F.(1979). *Aluminum Alloys : Structure and Properties*.
- [15] Kaufman, J. Gilbert, Rooy, Elwin L. (2005) . *Aluminum Casting Alloy: Properties, Process, and Applications*. American Foundry's Society.
- [16] JIS Handbook. (1977). *Non Ferrous Metals & Metallurgy*. Tokyo: Japanese Standard Association.
- [17] Bringas, John E. (2003). *Nonferrous Metals 4th Edition*. Kanada: CASTI Publishing.
- [18] Davis, J.R. (2001). *Alloying: Understanding The Basic*. Ohio: ASM International.
- [19] ASM International. (1988). *ASM Handbook volume 15: Casting*. Metal Park, Ohio: ASM International.
- [20] Suharno, Bambang. (2007). *Slide Kuliah: Pengecoran Logam*. Depok: Departemen Metalurgi dan Material UI.
- [21] Key to Metals. (n.d). *Aluminum and Aluminum Alloys Casting Problems*. Oktober 10, 2008. <http://www.key-to-nonferrous.com>
- [22] Metallurg Aluminum. (1998). *Modification of Aluminium Silicon Foundry Alloys*. (n.d). London and Scandinavian Metallurgical.
- [23] Porter, K.E. Easterling. (1987). *Phase Transformations in Metals and Alloys*. England: Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd.
- [24] Askeland, Ronald R. & Phule, Pradeep P. *The Science and Engineering of Materials 4th edition: Principles of Solidification*. (n.d). (n.d)

- [25] Zhang, B., M. Garro *et al.* (2003). *Dendrite arm spacing in aluminum alloy cylinder heads produced by gravity semi-permanent mold*. *Metalurgical Science and Technology A journal* Published by Teksid Aluminum, Vol 21,01.
- [26] M. Johnsson. (1993). Ph.D. Thesis, Stockholm: Stockholm University.
- [27] 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.
- [28] Beeley P.R, B.Met, Ph.D, (1972). *Foundry technology*. London:Butter Worth.
- [29] Fuoco, R. , 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 Divison Sao Pauli-Brazil.
- [30] Banga, T.R. (1981). *Foundry Engineering*, Dehli: Khanna Publisher.
- [31] Campbell, Jihn. (1994). *The Fluidity of Molten metals*. TALAT Lecture 205.
- [32] Golbahar, Behnam. (2008). *Effect of grain refiner-modifier interaction on the performance of A356.2 alloy*.
- [33] Lu, L., A.K. Dahle. (2006). *Effects of combined additions of Sr and AlTiB grain refiners in hypoeutectic Al-Si foundry alloys*.
- [34] 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 stronsium*. *Journal of Material Science*, Vol. 37,pp. 3489-3495.
- [35] 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.
- [36] Rao, A. K. Prasada *et al.* (2005). *Improvement in tensile strength and load bearing capacity during dry wear pf Al-7Si alloy by combined grain refiner and modification*. *Journal of Material Science and Engineering A* 395.



- [37] Shivkumar, S., L. Wang, D. Apelian. (1991). *Molten metal processing of advanced cast aluminum alloys*. Journal of Metal, p. 26-32.
- [38] Surdia, T. Chijiwa K. (1991). *Teknik Pengecoran Logam*, Jakarta: Pradnya Paramita.
- [39] Anberg L, M Di Sabatino. (n.d). *The Review of Fluidity of Al Based Alloy*. Norwegia: Norwegian University of Science and Technology.
- [40] ASM International. (1988). *ASM Handbook volume 3: Alloy phase diagrams*. Metal Park, Ohio: ASM International.
- [41] Hatch, John E. (1995). *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*. Metal Parks, Ohio : American Society for Metals.
- [42] Nafisi, Shahrooz. (2006). *Effect of grain refining modification on the microstructural evolution of semisolid 356 alloy*. University of quebec at chicoutimi.
- [43] Carbajal, J.L. (1992). *Study of the relationship between strontium and solidification rate in the modification of a 319 type aluminum alloy using a directional solidification technique*. Mexico : Corporacing Mexican de Investigation en Materials.
- [44] Madelung, O .(2006). *Phase Equilibria, Crystallographic and Thermodynamic Data of Binary Alloys' of Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry*. Journal of physics and astronomy.
- [45] Birol, Yucel. (2009). *Al-Ti-B grain refiners via powder metallurgy processing of Al/K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>?KBF<sub>4</sub> powder blands*. Journal of Alloys and Compounds, p 311-314.

## Lampiran 1 : Hasil Pengujian Komposisi Kimia

 PT Astra Honda Motor Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Department			
LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA			
NAMA PART	: SAMPLE MELTING	TGL PENGUJIAN	: 02-Mar-09 7:52:05
NO PART / TYPE	: SAMPLESBLM(LPDC 02/03/09	STANDARD UJI	: JIS H 5202
MATERIAL	: AC4B (2008)	MESIN UJI	: SPECTRO SHIMADZHU
SEKSI / SUB CON	: LPDC	KETERANGAN	: SHIFT 1
TEST KE	: 1		
MELTING AC4B			
ACTUAL		STANDARD QA AHM	
SI	: 7.561	SI	: 7.00 ~ 10.00
CU	: 2.108	CU	: 2.00 ~ 4.00
MG	: 0.201	MG	: 0.50 MAX
FE	: 0.783	FE	: 0.80 MAX
MN	: 0.274	MN	: 0.50 MAX
NI	: 0.062	NI	: 0.35 MAX
TI	: 0.040	TI	: 0.20 MAX
PB	: 0.054	PB	: 0.20 MAX
SN	: 0.030	SN	: 0.10 MAX
CR	: 0.028	CR	: 0.20 MAX
ZN	: 0.579	ZN	: 1.00 MAX
SR	: 0.000	SR	:
NOTE		KETERANGAN	
- HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG			
- LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG			
		OK	
		DIBUAT	
		DIDIS	

②

**AHM**  
PT Astra Honda Motor  
Measurement & Laboratory Section  
Quality Assurance Support Department

**LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA**

NAMA PART : SAMPLE MELTING	TGL.PENGUJIAN : 02-Mar-09 9:19:51
NO PART / TYPE : SAMPLE: STLH ICHI(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	

ichi OK

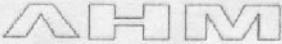
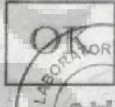
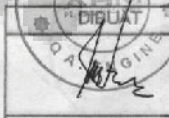

**MELTING AC4B**

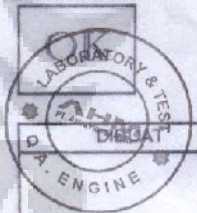
ACTUAL	STANDARD QA AHM
SI : 7.883	SI : 7.00 ~ 10.00
CU : 2.336	CU : 2.00 ~ 4.00
MG : 0.174	MG : 0.50 MAX
FE : 0.925	FE : 0.80 MAX
MN : 0.286	MN : 0.50 MAX
NI : 0.071	NI : 0.35 MAX
TI : 0.123	TI : 0.20 MAX
PB : 0.062	PB : 0.20 MAX
SN : 0.041	SN : 0.10 MAX
CR : 0.036	CR : 0.20 MAX
ZN : 0.608	ZN : 1.00 MAX
SR : 0.003	SR :

**NOTE**  
- HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG  
- LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG

**KETERANGAN**  
 OK

DIBUAT
DIDI S

 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	: SAMPLNIKE 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 MELTING AC4B			
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	:
NOTE - HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG - LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG		KETERANGAN   	

AHM		PT Astra Honda Motor	
Measurement & Laboratory Section		Quality Assurance Support Department	
LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA			
NAMA PART	: SAMPLE MELTING	TGL.PENGUJIAN	: 27-Feb-09 20:00:58
NO PART / TYPE	: SAMPLE:(LPDC AZ) 27/02/09 5	STANDARD UJI	: HES C-101-99
MATERIAL	: AC4B (2008)	MESIN UJI	: SPECTRO SHIMADZHU
SEKSI / SUB CON	: LPDC	KETERANGAN	: SHIFT 2
TEST KE	: 1		
<b>Nike Kompo 3</b>			
<u>ACTUAL</u>		<u>STANDARD QA AHM</u>	
SI	: 8.852	SI	: 7.00 ~ 10.00
CU	: 2.191	CU	: 2.00 ~ 4.00
MG	: 0.211	MG	: 0.50 MAX
FE	: 0.766	FE	: 1.00 MAX
MN	: 0.255	MN	: 1.00 MAX
NI	: 0.058	NI	: 0.50 MAX
TI	: <u>0.103</u>	TI	: 0.35 MAX
PB	: 0.056	PB	: 0.20 MAX
SN	: 0.027	SN	: 0.20 MAX
CR	: 0.032	CR	: 0.10 MAX
CA	: 0.000	CA	: 0.20 MAX
SR	: <u>0.025</u>		
<u>NOTE</u>			
- HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG			
- LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG			
		<u>KETERANGAN</u>	
			
		ANDRI	

### Lampiran 2 : Hasil Pengujian Kekerasan

	Komposisi		kekerasan titik ke - (HRB)				Rata-rata	Standar Deviasi
	wt.% Ti	wt. % Sr	1	2	3	4		
TIPIS	0	0	44.3	44.8	43	45.3	44.35	0.9882645
	0.1	0.003	49.8	50.5	49.8	47.4	49.375	1.3573872
	0.1	0.018	52	52.9	52.4	52.6	52.475	0.3774917
	0.1	0.025	49.9	48.7	53.3	51.8	50.925	2.0336748
TEBAL	0	0	42.8	44.9	43.3	44.8	43.95	1.0598742
	0.1	0.003	48.3	47.5	49.3	49.4	48.625	0.8995369
	0.1	0.018	53	51.4	51.2	49.6	51.3	1.3904436
	0.1	0.025	50.4	49.6	47.3	49.6	49.225	1.3375973

## Lampiran 3 : Hasil Pengujian Tarik

Komposisi		Tensile strength ke - (Mpa)			Rata-rata	SD	% SD
% Ti	% wt Sr	1	2	3			
0	<b>1</b>	227.791	215.431	226.765	223.329	6.85908	3.071289
0.1	<b>0.003</b>	237.249	221.256	218.277	225.594	10.20284	4.522654
0.1	<b>0.018</b>	253.054	250.099	250.162	251.105	1.688177	0.672299
0.1	<b>0.025</b>	217	237	238.105	230.7017	11.87885	5.149008

Komposisi		Elongasi sampel ke - (%)			Rata-rata	SD	% SD
% Ti	% wt Sr	1	2	3			
0	<b>1</b>	2.18	0*	1.6	1.89	0.410122	21.69957
0.1	<b>0.003</b>	1.84	1.64	0*	1.74	0.141421	8.127664
0.1	<b>0.018</b>	3.16	0.4	0*	1.78	1.951615	109.6413
0.1	<b>0.025</b>	2.06	2.08	2.17	2.103333	0.058595	2.7858

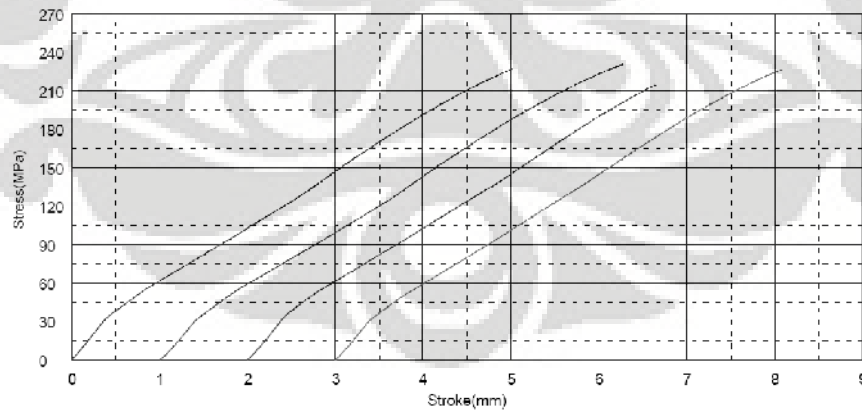
\*tidak diikutsertakan dalam perhitungan

Shape: Rod

Units	Diameter mm	Gauge Length mm
Awal - 1	14.0000	50.0000
Awal - 2	14.0600	50.0000
Awal - 3	13.9500	50.0000
Awal - 4	14.0000	50.0000

( 0 wt. % Ti, 0 wt. %

Name	Max Force N	Elongation %	Max Stress MPa
Awal - 1	35065.6	2.18000	227.791
Awal - 2	35873.4	2.26000	231.053
Awal - 3	32926.8	1.66000	215.431
Awal - 4	34907.8	0.00000	226.765

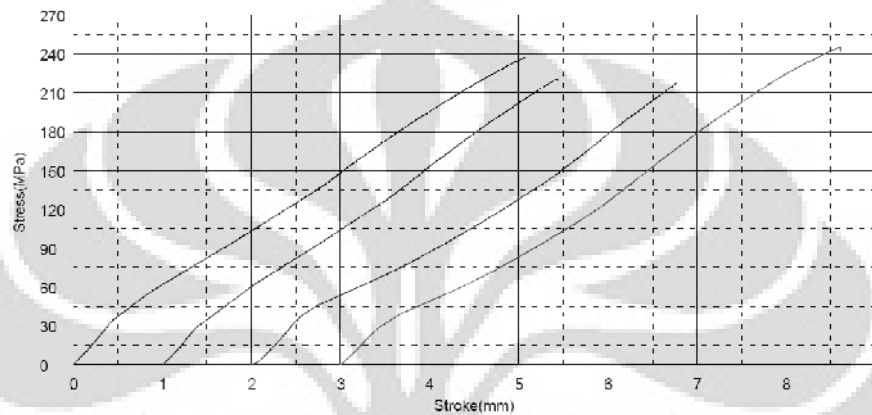


Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.1000	50.0000
2 - 1	14.0400	50.0000
3 - 1	14.1400	50.0000
4 - 1	14.3400	50.0000

( 0.1 wt. % Ti, 0.003 wt. % Sr)

Name	Max_Force	Elongation	Max_Stress
Units	N	%	MPa
1 - 1	37045.3	1.84000	237.249
2 - 1	34254.7	1.64000	221.256
3 - 1	34278.6	0.00000	218.277
4 - 1	39646.9	2.26000	245.483

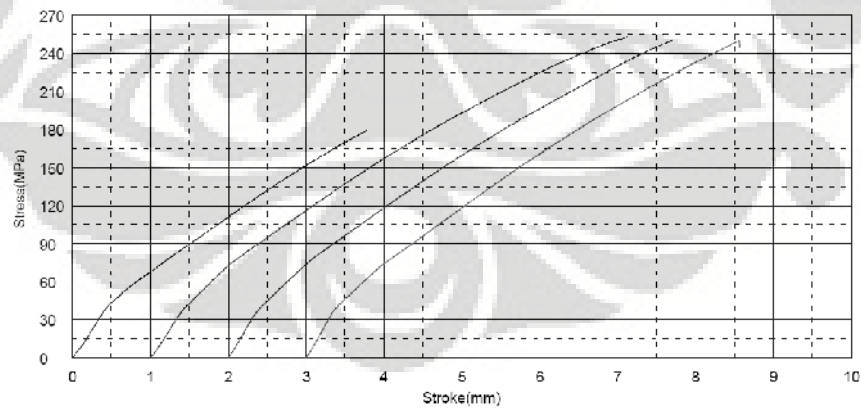


Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.1900	50.0000
1 - 2	14.0000	50.0000
1 - 3	14.0100	50.0000
1 - 4	14.0000	50.0000

( 0.1 wt. % Ti, 0.018 wt. % Sr)

Name	Max_Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	MPa	%
1 - 1	28278.1	178.812	0.00000
1 - 2	38954.7	253.054	3.16000
1 - 3	38554.7	250.099	0.40000
1 - 4	38509.4	250.162	0.00000



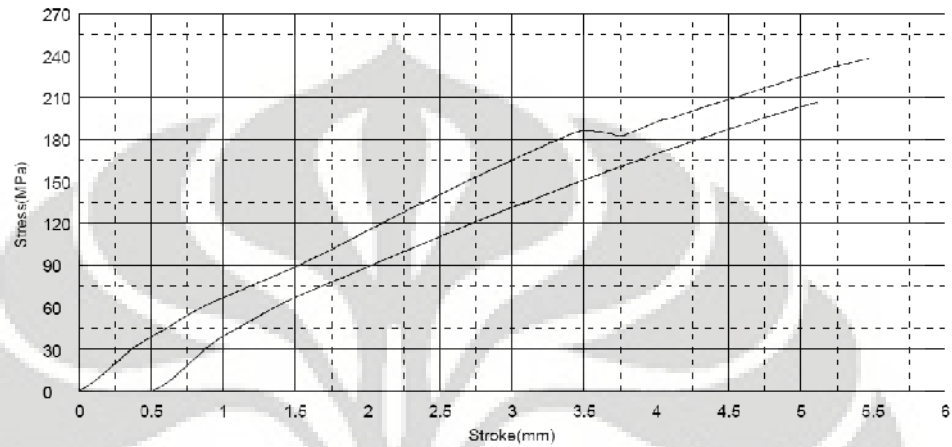


Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0800	50.0000
1 - 2	14.0200	50.0000

( 0.1 wt. % Ti, 0.025 wt. % Sr)

Name	Max Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	MPa	%
1 - 1	37073.4	238.105	2.06000
1 - 2	31867.2	206.423	2.08000



**Lampiran 4 : Hasil Pengukuran DAS**

Paduan AC4B tanpa penambahan (0 wt. % Ti , 0 wt. % Sr)

Bagian Tipis

Sampel	Panjang DAS dari dendrit ke - (mm)				
	I	II	III	IV	V
TIPIS	31.034484	27.1551735	27.1551735	27.1551735	31.034484
	34.9137945	27.1551735	23.275863	27.1551735	23.275863
	23.275863	23.275863	31.034484	31.034484	19.3965525
	23.275863	27.1551735	34.9137945	31.034484	31.034484
	23.275863	23.275863	31.034484	27.1551735	23.275863
	23.275863	23.275863	27.1551735	23.275863	23.275863
Rata-rata	26.50862175	25.21551825	29.09482875	27.80172525	25.21551825

Bagian Tebal

Sampel	Panjang DAS dari dendrit ke - (mm)				
	I	II	III	IV	V
TEBAL	31.034484	34.9137945	31.034484	31.034484	31.034484
	31.034484	31.034484	27.1551735	38.793105	38.793105
	27.1551735	34.9137945	27.1551735	31.034484	38.793105
	23.275863	31.034484	34.9137945	31.034484	34.9137945
	23.275863	31.034484	27.1551735	27.1551735	31.034484
	31.034484	31.034484	38.793105	38.793105	34.9137945
Rata-rata	27.80172525	32.3275875	31.034484	32.97413925	34.9137945

Paduan AC4B dengan 0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr

Bagian Tipis

Sampel tipis	Panjang DAS dari dendrit ke - ( $\mu\text{m}$ )				
	I	II	III	IV	V
A	20.610687	20.610687	20.610687	13.740458	17.1755725
	13.740458	20.610687	20.610687	13.740458	13.740458
	17.1755725	20.610687	20.610687	20.610687	17.1755725
	17.1755725	17.1755725	20.610687	19.2366412	13.740458
	13.740458	13.740458	20.610687	13.740458	20.610687
	20.610687	13.740458	20.610687	20.610687	20.610687

Universitas Indonesia

Rata-rata	17.1755725	17.7480915	20.610687	16.9465648	17.1755725
B	17.1755725	17.1755725	13.740458	17.1755725	24.0458015
	20.610687	13.740458	17.1755725	20.610687	13.740458
	17.1755725	13.740458	17.1755725	20.610687	34.351145
	17.1755725	34.351145	20.610687	13.740458	24.0458015
	13.740458	17.1755725	17.1755725	20.610687	27.480916
	20.610687	20.610687	24.0458015	17.1755725	13.740458
Rata-rata	17.7480915	19.4656488	18.3206106	18.3206106	22.9007633
Rata-rata	8	3	7	7	3

### Bagian Tebal

Sampel tebal	Panjang DAS dari dendrit ke - ( $\mu\text{m}$ )				
	I	II	III	IV	V
A	20.610687	13.740458	34.351145	20.610687	34.351145
	20.610687	13.740458	48.091603	34.351145	20.610687
	34.351145	34.351145	51.5267175	20.610687	51.5267175
	24.0458015	34.351145	34.351145	20.610687	27.480916
	44.6564885	20.610687	44.6564885	34.351145	34.351145
	48.091603	34.351145	44.6564885	30.9160305	48.091603
Rata-rata	32.06106867	25.19083967	42.93893125	26.90839692	36.06870225
B	24.0458015	20.610687	20.610687	27.480916	34.351145
	20.610687	13.740458	34.351145	30.9160305	34.351145
	27.480916	20.610687	20.610687	24.0458015	41.221374
	17.1755725	13.740458	27.480916	24.0458015	27.480916
	20.610687	20.610687	27.480916	24.0458015	27.480916
	20.610687	27.480916	17.1755725	20.610687	13.740458
Rata-rata	21.75572517	19.46564883	24.61832058	25.19083967	29.77099233

Paduan AC4B dengan 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr

### Bagian Tipis

Sampel tipis	Panjang DAS dari dendrit ke - ( $\mu\text{m}$ )				
	I	II	III	IV	V
A	13.740458	6.870229	6.870229	6.870229	6.870229
	20.610687	13.740458	6.870229	13.740458	6.870229
	6.870229	6.870229	13.740458	13.740458	13.740458
	13.740458	6.870229	6.870229	13.740458	13.740458
	13.740458	20.610687	13.740458	13.740458	10.3053435
	13.740458	13.740458	6.870229	13.740458	13.740458
Rata-rata	13.740458	11.45038167	9.160305333	12.59541983	10.87786258

	13.740458	13.740458	27.480916	10.3053435	6.870229
	27.480916	13.740458	13.740458	13.740458	6.870229
	13.740458	13.740458	13.740458	13.740458	20.610687
	20.610687	13.740458	13.740458	20.610687	6.870229
	13.740458	13.740458	13.740458	20.610687	13.740458
Rata-rata	19.46564883	13.740458	16.03053433	15.45801525	11.45038167

### Bagian Tebal

Sampel tebal	Panjang DAS dari dendrit ke - ( $\mu\text{m}$ )				
	I	II	III	IV	V
A	20.610687	13.740458	27.480916	27.480916	20.610687
	17.1755725	20.610687	20.610687	24.0458015	27.480916
	13.740458	20.610687	34.351145	20.610687	20.610687
	17.1755725	34.351145	20.610687	27.480916	20.610687
	13.740458	20.610687	20.610687	27.480916	34.351145
	17.1755725	27.480916	51.5267175	27.480916	30.9160305
Rata-rata	16.60305342	22.90076333	29.19847325	25.76335875	25.76335875
B (200x)	30.625	19.140625	22.96875	15.3125	19.140625
	41.221374	51.5267175	34.351145	41.221374	41.221374
	41.221374	34.351145	34.351145	20.610687	34.351145
	20.610687	34.351145	27.480916	20.610687	34.351145
	20.610687	20.610687	41.221374	34.351145	30.9160305
	20.610687	27.480916	30.9160305	34.351145	30.9160305
Rata-rata	29.14996817	31.24353925	31.88156008	27.742923	31.81605833

Paduan AC4B dengan 0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr

### Bagian Tipis

Sampel tipis	Panjang DAS dari dendrit ke - ( $\mu\text{m}$ )				
	I	II	III	IV	V
A	13.740458	13.740458	20.610687	24.0458015	17.1755725
	13.740458	20.610687	20.610687	17.1755725	20.610687
	13.740458	13.740458	20.610687	27.480916	13.740458
	20.610687	13.740458	20.610687	27.480916	20.610687
	13.740458	13.740458	20.610687	24.0458015	13.740458
	6.870229	13.740458	20.610687	13.740458	20.610687
Rata-rata	13.740458	14.88549617	20.610687	22.32824425	17.74809158

	27.480916	13.740458	20.610687	20.610687	17.1755725
	13.740458	13.740458	20.610687	27.480916	13.740458
B	20.610687	20.610687	27.480916	24.0458015	13.740458
	6.870229	20.610687	27.480916	13.740458	17.1755725
	20.610687	6.870229	17.1755725	20.610687	20.610687
	20.610687	6.870229	13.740458	27.480916	20.610687
Rata-rata	18.32061067	13.740458	21.18320608	22.32824425	17.1755725

## Bagian Tebal

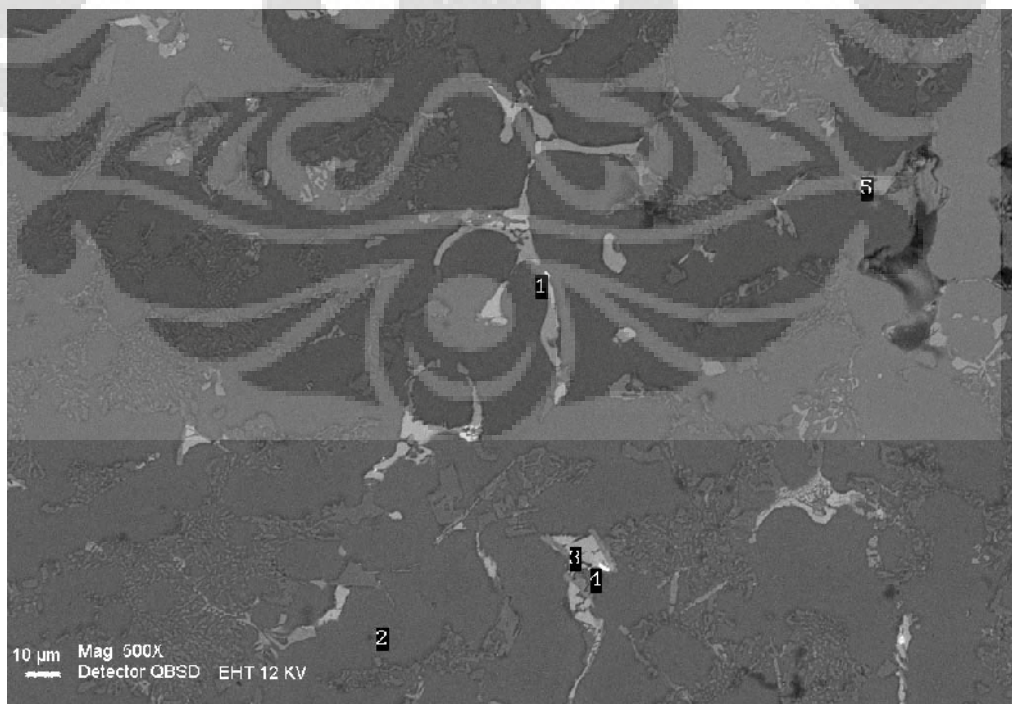
Sampel tebal	Panjang DAS dari dendrit ke - ( $\mu\text{m}$ )				
	I	II	III	IV	V
	20.610687	13.740458	34.351145	20.610687	34.351145
	20.610687	13.740458	48.091603	34.351145	20.610687
A	34.351145	34.351145	51.5267175	20.610687	51.5267175
	24.0458015	34.351145	34.351145	20.610687	27.480916
	44.6564885	20.610687	44.6564885	34.351145	34.351145
	48.091603	34.351145	44.6564885	30.9160305	48.091603
Rata-rata	32.06106867	25.19083967	42.93893125	26.90839692	36.06870225
	27.480916	13.740458	27.480916	27.480916	30.9160305
	20.610687	27.480916	17.1755725	27.480916	30.9160305
B	34.351145	30.9160305	48.091603	24.0458015	20.610687
	27.480916	34.351145	51.5267175	27.480916	27.480916
	20.610687	41.221374	20.610687	27.480916	30.9160305
	20.610687	41.221374	13.740458	27.480916	34.351145
Rata-rata	25.19083967	31.48854958	29.77099233	26.90839692	29.19847325

## Lampiran 5 : Hasil SEM dan EDAX

0.1 wt. % Ti + 0.003 wt. % Sr

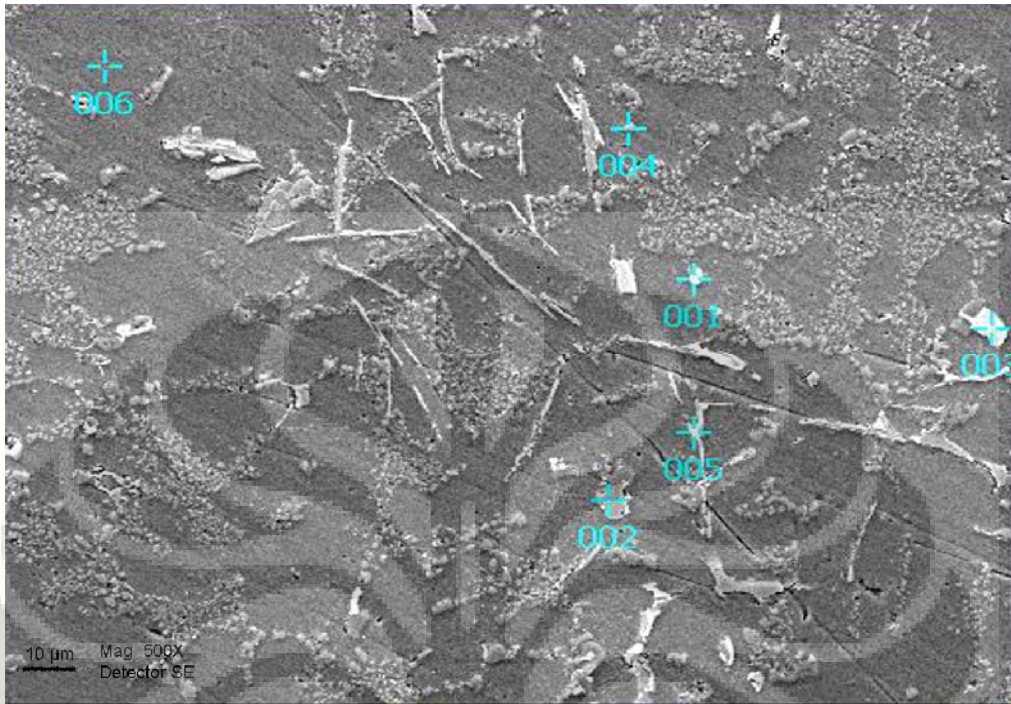


0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr



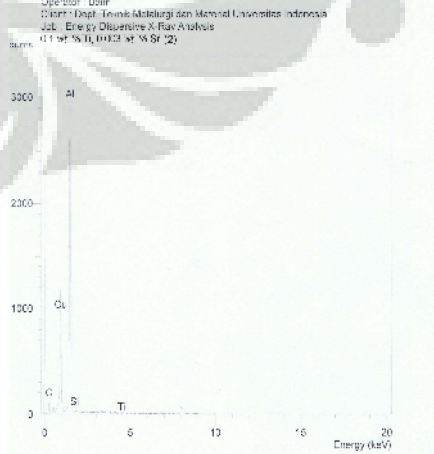
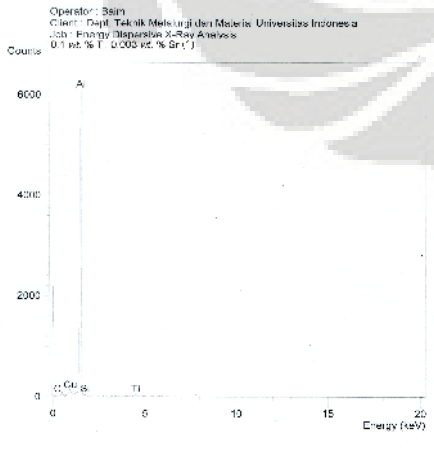
Universitas Indonesia

0.1 wt. % Ti + 0.025 wt. % Sr

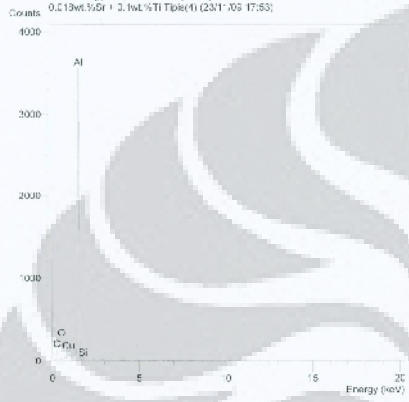


EDSQuant results. Listed at 15:07:48 on 06/11/08  
 Sample Name  
 Client: Dept. Teknik Material dan Metalurgi Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Specimen Label: 0.1 wt. % Ti, 0.025 wt. % Sr (2)  
 System Probe: In - 60 eV  
 Qualitative method: LMA (3 iterations).  
 Analyzed all elements and reported results.  
 Standards:  
 C K Carbon Low 11/09/06  
 Al K Alum 17/11/09  
 Si K Low Alum Steel 11/01/06  
 S K Zircon sulfide 15/05/08  
 Cu K Copper 22/01/06  
 Element Name Atomic  
 C K 100 3.88 8.29  
 Al K 148 92.42 87.93  
 Si K 81 1.32 1.37  
 Ti K 30 4.16 2.22  
 Cu K 70 1.22 0.88  
 Total 126.00 130.66

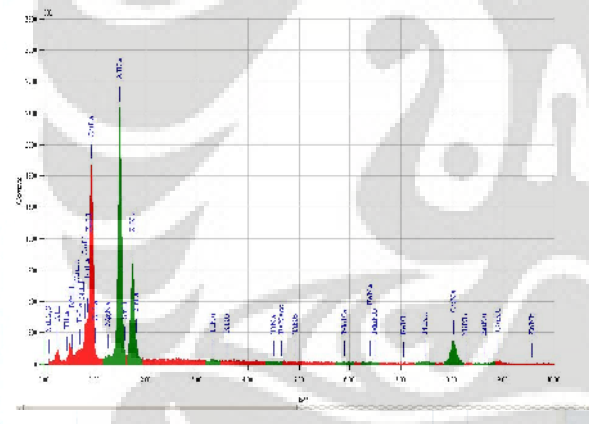
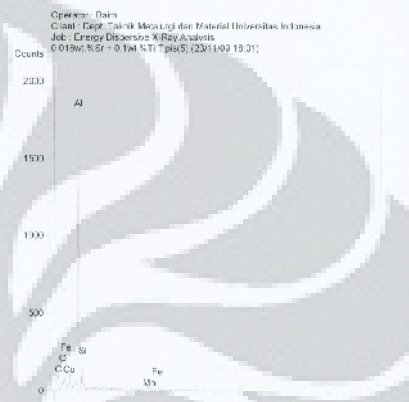
EDSQuant results. Listed at 15:26:11 on 06/11/08  
 Sample Name  
 Client: Dept. Teknik Material dan Metalurgi Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Specimen Label: 0.1 wt. % Ti, 0.025 wt. % Sr (2)  
 System Probe: In - 60 eV  
 Qualitative method: LMA (3 iterations).  
 Analyzed all elements and reported results.  
 Standards:  
 Ti K Titanium Low 12/09/08  
 Al K Alum 17/11/09  
 Si K Low Alum Steel 11/01/06  
 Cu K Copper 22/01/06  
 Element Name Atomic  
 Ti K 20 2.07 8.51  
 Al K 80 37.88 58.22  
 Si K 15 0.63 0.88  
 Cu K 10 0.51 37.08  
 Total 100.00 100.00



Operator: Darn  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 0.19wt%Si + 3.1wt%Ti Tipe41 (231109 17:53)



Operator: Darn  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 0.19wt%Si + 3.1wt%Ti Tipe41 (231109 18:01)



Quantitative Method:  Peak  
 Net Area

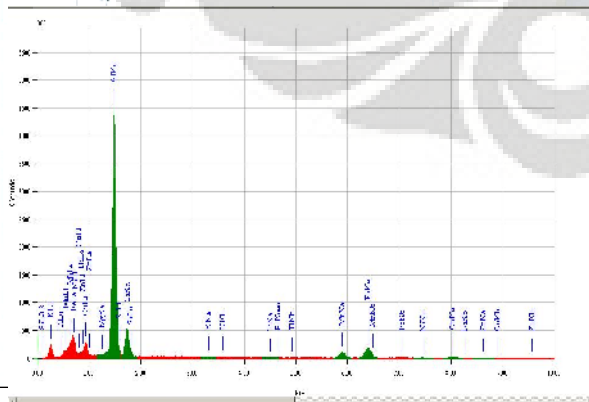
Quantitative Method:  Peak  
 Net Area

Number of Channels: 24

EDS Method: Standardless Quantitative Analysis (ZAF) Correction: Cliff-Orlick

Accumulation Parameters:

Element	Abso.	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
Al	1.54	1.2	111	1.0	89.1	1.8	115	129.4	
Si	1.74	20.0	31	20.77	200	20.7	201	275.23	
Fe	6.4	50.0	317	46.5	5.0	5.0	541	129.85	
Ti	4.5	0.0	322	0.18	1.22	0.18	0.0	3175	
Mn	5.89	0.04	335	0.3	0.0	0.3	0.04	3288	
Ni	7.47	1.07	344	2.3	0.0	2.3	0.0	2003	
Cr	5.91	0.44	347	0.4	0.41	0.4	0.4	47.01	
Co	1.00	1.0	323	0.0	0.0	0.0	0.0	531	
Sum		11.1		11.1		11.1		188	



Quantitative Method:  Peak  
 Net Area

Quantitative Method:  Peak  
 Net Area

Number of Channels: 24

EDS Method: Standardless Quantitative Analysis (ZAF) Correction: Cliff-Orlick


Accumulation Parameters:

Element	Abso.	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
Al	1.54	1.2	111	1.0	89.1	1.8	115	129.4	
Si	1.74	20.0	31	20.77	200	20.7	201	275.23	
Fe	6.4	50.0	317	46.5	5.0	5.0	541	129.85	
Ti	4.5	0.0	322	0.18	1.22	0.18	0.0	3175	
Mn	5.89	0.04	335	0.3	0.0	0.3	0.04	3288	
Ni	7.47	1.07	344	2.3	0.0	2.3	0.0	2003	
Cr	5.91	0.44	347	0.4	0.41	0.4	0.4	47.01	
Co	1.00	1.0	323	0.0	0.0	0.0	0.0	531	
Sum		11.1		11.1		11.1		188	





## Lampiran 6 : Komposisi Penghalus Butir Coveral GR 2815®



---

Edition 01/05      Technical Data Sheet

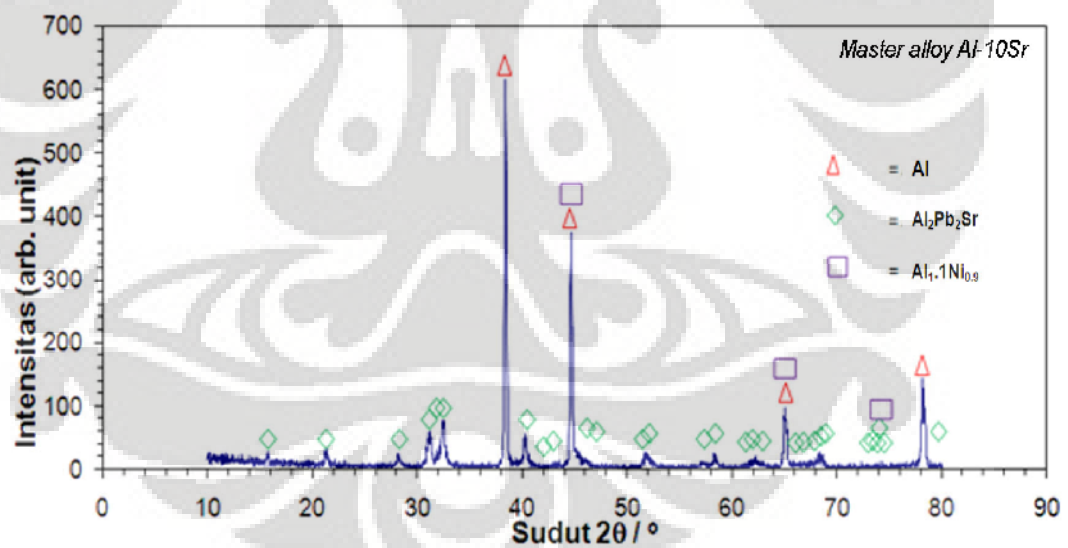
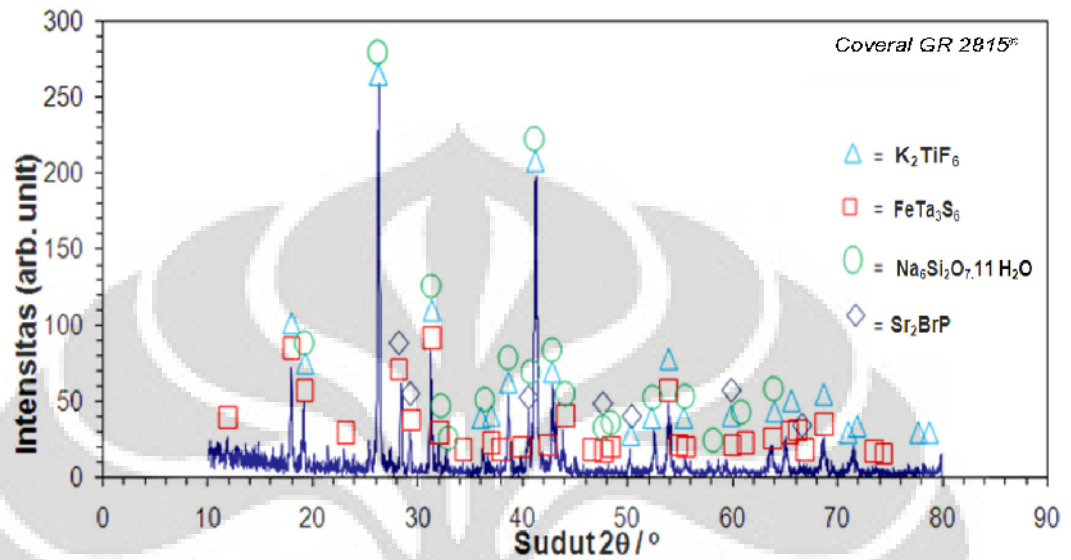
# COVERAL\* GR 2815

**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 diboride 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 crossed 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 7 : Hasil Pengujian XRD



**Lampiran 8 : Sheet Trial Komponen *Cylinder Head* hasil LPDC di PT AHM**

Komposisi 0 wt. % Ti , 0 wt. % Sr

No. Shot	No. Dies	Temp. Dies (oC)		Temp.LPDC		Tekanan Mesin (KPa)	Jenis Cacat LPDC	Ket.
		Upper	Lower	Molten	Atmosfer			
1	FI. 1							
	FI. 2							
2	FI. 1							
	FI. 2							
3	FI. 1						MS	trial
	FI. 2							
4	FI. 1	134	335	711	736	250		
	FI. 2		331					
5	FI. 1		342	710	740	250	MS	
	FI. 2		347					
6	FI. 1		349	710	742	250	MS	
	FI. 2		355					
7	FI. 1	219	356	711	744	250	MS	
	FI. 2	204	362					
8	FI. 1	254	364	711	741	250		
	FI. 2	260	374					
9	FI. 1	240	352	712	751	250		
	FI. 2	222	365					
10	FI. 1	259	355	712	741	250		
	FI. 2	233	369					
11	FI. 1	224	375	711	744	250		
	FI. 2	225	387					
12	FI. 1	230	371	712	742	250		
	FI. 2	235	381					
13	FI. 1	235	364	712	745	250	Pasir Gugur	REJECT
	FI. 2	240	381					
14	FI. 1	243	365	713	741	256		
	FI. 2	240	382					
15	FI. 1	247	383	712	744	256		
	FI. 2	237	394					
16	FI. 1	243	374	713	749	256		
	FI. 2	242	374					
17	FI. 1	242	372	713	736	256		
	FI. 2	230	386					
18	FI. 1	258	381	713	741	256	MS	

Universitas Indonesia

	FI. 2	248	390				
19	FI. 1	254	376	713	739	256	MS
	FI. 2	256	385				
20	FI. 1	267	383	713	735	256	
	FI. 2	256	392				
21	FI. 1	295	386	713	740	256	
	FI. 2	285	395				
<hr/>							
22	FI. 1	273	388	713	739	256	
	FI. 2	272	395				
23	FI. 1	260	380	713	740	256	
	FI. 2	270	390				
24	FI. 1	254	380	713	743	256	
	FI. 2	252	392				
25	FI. 1	260	380	713	735	256	MS
	FI. 2	254	393				
26	FI. 1	269	379	713	739	256	kopong
	FI. 2	261	394				REJECT
27	FI. 1	263	383	712	737	262	MS
	FI. 2	262	396				
28	FI. 1	256	383	713	738	262	
	FI. 2	260	396				
29	FI. 1	268	393	713	738	262	
	FI. 2	265	402				
30	FI. 1	265	384	712	739	262	MS
	FI. 2	254	394				
31	FI. 1	271	384	712	737	262	MS
	FI. 2	264	393				
32	FI. 1	281	382	714	734	262	
	FI. 2	287	390				
33	FI. 1	296	390	712	736	262	
	FI. 2	270	395				
34	FI. 1		386	712	737	262	MS
	FI. 2		392				
35	FI. 1	262	390	712	736	262	
	FI. 2	265	394				
36	FI. 1	266	389	712	733	262	
	FI. 2	264	396				
37	FI. 1	250	363	713	744	262	MS
	FI. 2	248	372				
38	FI. 1	271	385	712	728	262	
	FI. 2	255	392				
39	FI. 1	269	389	712	732	262	
	FI. 2	263	397				
40	FI. 1	268	389	712	735	262	

	FI. 2	264	394					
41	FI. 1	268	388	712	733	268		
	FI. 2	265	399					
42	FI. 1	270	388	712	736	268		
	FI. 2	269	396					
43	FI. 1	262	386	712	742	268		
	FI. 2	260	387					
44	FI. 1	265	378	712	734	268		
	FI. 2	263	394					
45	FI. 1	268	393	712	733	268		
	FI. 2	265	400					
46	FI. 1	272	397	712	732	268	MS	
	FI. 2	268	399					
47	FI. 1	277	398	712	733	268		
	FI. 2	274	401					
48	FI. 1	276		712	734	268		
	FI. 2	274					MS.lower	REJECT
1	FI. 1							TRIAL
	FI. 2							
2	FI. 1							TRIAL
	FI. 2							
3	FI. 1	260	375	715	737	256		
	FI. 2	260	377					
4	FI. 1	256	380	714	736	256	MS.UPPER	
	FI. 2	256	388					REJECT
5	FI. 1	264	391	713	741	256	MS.EX	
	FI. 2	263	402					REJECT
6	FI. 1	257	387	713	749	256	MS.IN	
	FI. 2	257	397					
7	FI. 1	261	392	713	745	256	CUTTER	
	FI. 2	259	405				CUTTER	
8	FI. 1	230	372	714	757	256		DRY COATING DIES
	FI. 2	230	381					
9	FI. 1	261	397	714	743	256		
	FI. 2	258	396					
10	FI. 1	268	404	713	746	256	MS.EX	
	FI. 2	266	412					
11	FI. 1	252	386	713	754	256		
	FI. 2	250	394					
12	FI. 1	263	393	714	743	256		
	FI. 2	260	406					
13	FI. 1	263	386	714	750	256	MS.EX	

	FI. 2	264	398					
14	FI. 1	263	396	714	741	256	MS.UPPER	
	FI. 2	263	410					
15	FI. 1	267	395	714	745	256	MS.IN	
	FI. 2	249	408				MS.UPPER	
16	FI. 1	265	399	714	745	262		
	FI. 2	264	414					
17	FI. 1	262	411	713	739	262		
	FI. 2	264	418				MS.UPPER	
18	FI. 1	267	407	713	743	262		TRIAL
	FI. 2	262	416					TRIAL
19	FI. 1	268	392	715	749	262	MS.EX	
	FI. 2	269	399					
20	FI. 1	274	398	714	737	262		
	FI. 2	275	412				CUTTER	
21	FI. 1	265	399	713	740	262	MS.PL	
	FI. 2	265	412					
22	FI. 1	269	396	714	742	262		
	FI. 2	266	408				MS.UPPER	
23	FI. 1	264	396	713	740	262		
	FI. 2	259	408				MS.UPPER	
24	FI. 1	278	406	714	738	262	MS.EX	
	FI. 2	269	415					
25	FI. 1	273	400	713	741	262		
	FI. 2	268	413					
26	FI. 1	262	405	713	739	262		
	FI. 2	263	415					
27	FI. 1	271	404	712	736	262		
	FI. 2	268	418					
28	FI. 1	268	402	712	739	268		
	FI. 2	264	414					
29	FI. 1	265	402	713	740	268		
	FI. 2	254	413					
30	FI. 1	269	410	713	738	268		
	FI. 2	266	418					
31	FI. 1	271	410	713	742	268		
	FI. 2	267	418					
32	FI. 1	273	392	713	746	268	MS.EX	
	FI. 2	270	407				MS.UPPER	
33	FI. 1	274	404	713	736	268		reject
	FI. 2	267	418					reject
34	FI. 1	275	405	713	738	268		reject
	FI. 2	268	415					
35	FI. 1	309	417	712	738	268		

	FI. 2	292	418					
36	FI. 1	304	406	712	737	268		
	FI. 2	290	416					
37	FI. 1	301	401	713	738	268		
	FI. 2	288	418					
38	FI. 1	302	411	712	736	268		
	FI. 2	298	417					
39	FI. 1	289	408	712	737	268		
	FI. 2	263	418					
1	FI. 1							TRIAL
	FI. 2							
2	FI. 1							TRIAL
	FI. 2							
3	FI. 1	274	375	712	734	256		
	FI. 2	261	376					
4	FI. 1	287	379	711	739	256	UNDERCUT	
	FI. 2	270	386					
5	FI. 1	290	378	711	746	256	UNDERCUT	
	FI. 2	275	390					
6	FI. 1	285	331	714	751	256	MS.IN	
	FI. 2	272	346					
7	FI. 1	267	367	713		256		
	FI. 2	251	376					
8	FI. 1	284	383	712	732	256	MS.IN	
	FI. 2	273	390					
9	FI. 1	289	392	712	742	256		
	FI. 2	278	398				MS.EX	
10	FI. 1	295	398	712	743	256		
	FI. 2	283	398					
11	FI. 1	284	392	712	745	256	MS.EX	
	FI. 2	275	394					
12	FI. 1	279	404	713	738	262		
	FI. 2	269	405					
13	FI. 1	301	406	713	741	250	MS.PL	
	FI. 2	287	412					
14	FI. 1	297	402	713	741	256		
	FI. 2	286	407				PASIR GUGUR	REJECT
15	FI. 1	307	408	713	740	256	PASIR GUGUR	REJECT
	FI. 2	298	418					
16	FI. 1	309	417	713	736	262		
	FI. 2	297	421					
17	FI. 1	304	411	713	739	262	MS.PL	
	FI. 2	293	426					
18	FI. 1	290	408	713	739	262	M.SIRIP	REJECT

Universitas Indonesia



	FI. 2	286	426					
19	FI. 1	308	406	712	740	262	M.SIRIP	REJECT
	FI. 2	19	422					
20	FI. 1	310	401	713	740	262		
	FI. 2	294	421					
21	FI. 1	311	423	713	740	262	PASIR GUGUR (LOWER)	REJECT
	FI. 2	299	430					
22	FI. 1	281	404	712	745	262		
	FI. 2	280	415					
23	FI. 1	260	336	713	754	256		
	FI. 2	259	389					
24	FI. 1	286	319	713	744	262		
	FI. 2	281	393					
25	FI. 1	277	320	713	738	268		
	FI. 2	269	409					PERBAIKAN DIES FI.1
26	FI. 1	264	317	714	747	268		
	FI. 2	260	375					
27	FI. 1	269	304	714	738	268		
	FI. 2	265	358					
28	FI. 1	260	317	713	729	268		
	FI. 2	258	392					
29	FI. 1	287	321	713	737	268		
	FI. 2	280	399					
30	FI. 1	294	321	711	734	268		
	FI. 2	284	406					
31	FI. 1	281	320	712	742	268		
	FI. 2	272	391					
32	FI. 1	283	323	712	739	268	MS.EX	
	FI. 2	264	399				PASIR GUGUR	REJECT
33	FI. 1	X	327	713	730	268		
	FI. 2	X	399					
34	FI. 1	X	318	712	738	268		
	FI. 2	X	404					
								DIES REPAIR
1	FI. 1							TRIAL
	FI. 2							
2	FI. 1							TRIAL
	FI. 2							
3	FI. 1	252	362	713	750	250		
	FI. 2	248	374					
4	FI. 1	246	374	712	740	250	MS.PL	
	FI. 2	238	391					

5	FI. 1	250	372	712	752	250	MS.UPPER	DIES COATING
	FI. 2	243	390					
6	FI. 1	220	345	713	757	256		
	FI. 2	205	362					
7	FI. 1	230	374	713	752	256		
	FI. 2	223	390					
8	FI. 1			713	752	256		
	FI. 2							
9	FI. 1	262	383	713	741	256	MS.PL	
	FI. 2	252	403					
10	FI. 1	248	390	713	748	256	MS.PL	
	FI. 2	250	405					
11	FI. 1	237	392	713	746	256		
	FI. 2	238	408					
12	FI. 1	242	399	713	747	256		
	FI. 2	230	416					
13	FI. 1	254	401	713	747	256	MS.PL	
	FI. 2	260	415					REJECT
14	FI. 1	257	402	713	749	256		DIES DIBERI DARK
	FI. 2	258	415					
15	FI. 1	250	394	713	748	256	MS.PL	
	FI. 2	241	408					
16	FI. 1	247	396	714	744	256	MS.PL	
	FI. 2	249	411					
17	FI. 1	264	397	713	745	256		
	FI. 2	257	408					
18	FI. 1	263	401	714	737	262	MS.PL	
	FI. 2	250	415					PENGOLESAN DARK
19	FI. 1	263	393	713	747	262		PENGOLESAN DARK
	FI. 2	246	402					
20	FI. 1	251	381	714	746	262	UNDRECUT	
	FI. 2	243	394				MS.PL	
21	FI. 1	247	393	713	738	262	MS.PL	PENGOLESAN DARK
	FI. 2	241	403					PENGOLESAN DARK
22	FI. 1	260	397	713	735	262		
	FI. 2	260	412					
23	FI. 1	250	395	713	739	262	MS.PL	
	FI. 2	255	411					
24	FI. 1	254	395	713	740	262		PENGOLESAN DARK

	FI. 2	258	407					PENGOLESAN DARK
25	FI. 1	263	401	713	737	262	MS.PL	
	FI. 2	267	414					
26	FI. 1	252	390	713	742	262		
	FI. 2	260	403				MS.PL	
27	FI. 1	266	396	713	736	262		
	FI. 2	265	406					
28	FI. 1	260	400	713	736	262		
	FI. 2	251	412					
29	FI. 1	269	400	713	738	262	MS.PL	
	FI. 2	265	410					
30	FI. 1	267	405	713	736	262	MS.EX	
	FI. 2	265	420					
31	FI. 1	260	406	713	738	268	MS.PL	
	FI. 2	261	420					
32	FI. 1	267	403	713	740	268		REJECT
	FI. 2	262	412					
33	FI. 1	267	398	713	740	268		
	FI. 2	265	411				MS.PL	
34	FI. 1	265	395	712	736	268		
	FI. 2	262	409					
35	FI. 1	263	400	712	733	268		
	FI. 2	256	413				MS.PL	
36	FI. 1	269	396	712	737	268		
	FI. 2	256	407					
37	FI. 1	254	395	712	736	268		
	FI. 2	251	408					
38	FI. 1	253	397	712	734	268		
	FI. 2	260	415					
2	FI. 1						MS.EX	
	FI. 2							
3	FI. 1	266	368	714	737	250	MS.UPPER	
	FI. 2	257	367					
4	FI. 1	275	392	713	739	256	MS.UPPER	
	FI. 2	264	387					
5	FI. 1	280	319	713	746	256	MS.UPPER	
	FI. 2	270	384				MS.PL	PENGERUKAN KOTORAN
6	FI. 1	229	354	714	756	256		TRIAL
	FI. 2	220	356					
7	FI. 1	264	428	714	743	256		TRIAL
	FI. 2	254	410					
8	FI. 1	264	393	714	745	256		

	FI. 2	260	392				MS.EX	
9	FI. 1	260	394	714	739	256	MS.EX	
	FI. 2	258	394					
10	FI. 1	262	393	713	747	256	MS.IN	
	FI. 2	258	395				MS.UPPER	
11	FI. 1	227	357	714	756	256		COATING DIES REJECT
	FI. 2	218	368					
12	FI. 1	250	380	713	738	256		
	FI. 2	248	384					
13	FI. 1	240	375	714	749	256		PENGERUKAN KOTORAN TRIAL
	FI. 2	237	380					
14	FI. 1	257	392	714	745	256	MS.EX	
	FI. 2	256	389					
15	FI. 1	265	405	714	735	256		
	FI. 2	267	397					
16	FI. 1	267	402	713	740	256		REJECT
	FI. 2	266	405					
17	FI. 1	269	415	713	743	262	MS.EX	
	FI. 2	266	409				MS.UPPER	
18	FI. 1	272	402	713	744	262		
	FI. 2	268	415					
19	FI. 1	268	409	713	745	262	MS.EX	
	FI. 2	267	407					
20	FI. 1	250	378	713	754	262	MS.EX	
	FI. 2	247	386				MS.EX	
21	FI. 1	264	396	713	735	262		
	FI. 2	263	409					
22	FI. 1	272	410	713	740	262	MS.EX	
	FI. 2	271	416					
23	FI. 1	271	411	713	740	262		
	FI. 2	270	413					
24	FI. 1	277	412	713	742	262		
	FI. 2	275	420					
25	FI. 1	280	401	713	747	262	MS.IN	
	FI. 2	276	412					
26	FI. 1	260	396	714	746	262		
	FI. 2	261	407					
27	FI. 1	268	402	713	741	262		
	FI. 2	267	409					
28	FI. 1	260	400	713	743	262		
	FI. 2	255	411					
29	FI. 1		390	714	729	268		

	FI. 2		389				
30	FI. 1		390	714	729	268	
	FI. 2		389				
31	FI. 1		398	713	735	268	MS.EX
	FI. 2	269	407				
32	FI. 1	275	407	712	736	268	
	FI. 2	274	713				
33	FI. 1	274	409	712	739	268	MS.EX
	FI. 2	272	416				
34	FI. 1	277	412	712	738	268	
	FI. 2	276	421				
35	FI. 1	270	407	712	741	268	REJECT
	FI. 2	268	419				
1	FI. 1						TRIAL
	FI. 2						
2	FI. 1						TRIAL
	FI. 2						
3	FI. 1		388	711	737	256	MS.PL,UPPER
	FI. 2		377				
4	FI. 1		386	712	745	256	MS.IN,EX
	FI. 2		381				REJECT
5	FI. 1		384	712	754	256	REJECT
	FI. 2		378				
6	FI. 1		393	712	748	256	MS.IN,EX,UPPER
	FI. 2		393				REJECT
7	FI. 1		392	712	749	256	
	FI. 2		389				
8	FI. 1		361	713	759	256	
	FI. 2		364				MS.PL
9	FI. 1		388	714	737	256	
	FI. 2		385				
10	FI. 1		390	713	748	256	
	FI. 2		387				
11	FI. 1		393	714	744	256	
	FI. 2		386				
12	FI. 1		388	714	744	262	MS.EX
	FI. 2		386				
13	FI. 1		397	714	741	250	
	FI. 2		391				
14	FI. 1		401	713	742	256	
	FI. 2		400				
15	FI. 1		403	713	743	256	
	FI. 2		399				
16	FI. 1		409	713	740	256	

	FI. 2	406					
17	FI. 1	396	713	747	256	MS.EX	
	FI. 2	398					
18	FI. 1	406	714	738	262		
	FI. 2	408					
19	FI. 1	409	713	742	262		
	FI. 2	408					
20	FI. 1	406	713	741	262		
	FI. 2	408					
21	FI. 1	392	713	745	262		DI OLES DARK
	FI. 2	396					DI OLES DARK
22	FI. 1	387	713	745	262		
	FI. 2	391					
23	FI. 1	363	714	745	262	MS.IN,PL	
	FI. 2	370					
24	FI. 1	403	715	744	262	MS.EX	
	FI. 2	382				MS.EX,IN	
25	FI. 1	390	713	732	262		
	FI. 2	390					
26	FI. 1	398	713	736	268	MISRUN	REJECT
	FI. 2	400					
27	FI. 1	406	712	738	268		
	FI. 2	401					
28	FI. 1	402	712	737	268	MS.EX	
	FI. 2	403					
29	FI. 1	401	712	738	268		
	FI. 2	403					
30	FI. 1	405	712	737	268	MISRUN	REJECT
	FI. 2	409					
31	FI. 1	409	713	742	268		
	FI. 2	410					
32	FI. 1	413	711	737	268		
	FI. 2	412					
33	FI. 1	408	712	740	268		
	FI. 2	407					
34	FI. 1	411	711	737	268		
	FI. 2	411					
35	FI. 1	407	711	740	268	MISRUN	REJECT
	FI. 2	411				MISRUN	REJECT

Komposisi 0.1 wt. % Ti , 0.018 wt. % Sr
---

No Shot	No. Dies	Temp. Dies (°C)		Temp. LPDC (°C)		Tekanan Mesin (Kpa)	Cacat LPDC	Keterangan
		Upper	Lower	Molten	Atmosfer			
1	F#1							TRIAL
	F#2							
2	F#1							TRIAL
	F#2							
3	F#1	230	394	713	737	250		
	F#2	237	396					
4	F#1	255	397	713	735	250		
	F#2	262	398					
5	F#1	259	401	713	721	250	Ms.Ex	
	F#2	255	404					
6	F#1	265	401	714	726	250		
	F#2	264	404					
7	F#1	282	405	713	724	250		
	F#2	281	417					
8	F#1	281	415	713	726	250		
	F#2	281	413					
9	F#1	281	412	714	725	250		
	F#2	279	403					
10	F#1	282	409	713	723	250		
	F#2	280	401					
11	F#1	-	402	714	718	250		speedy di pinjam
	F#2	-	406					
12	F#1	-	403	714	717	250		
	F#2	-	410					
13	F#1	-	405	713	718	250		
	F#2	-	417					
14	F#1	302	424	713	716	256		
	F#2	298	424					
15	F#1	296	425	713	718	256		
	F#2	283	421					
16	F#1	304	424	713	718	256		
	F#2	291	423					
17	F#1	304	427	713	721	253		
	F#2	301	423					
18	F#1	301	411	713	730	256		
	F#2	298	403					
19	F#1	286	425	711	713	256		
	F#2	281	416					
20	F#1	295	424	713	718	256		
	F#2	290	421					

21	F#1	287	425	712	717	256
	F#2	286	418			
22	F#1	297	422	713	715	256
	F#2	293	423			
23	F#1	296	427	713	718	256
	F#2	290	426			
24	F#1	291	425	712	721	256
	F#2	290	414			
25	F#1	286	430	712	712	256
	F#2	281	428			
26	F#1	290	424	711	716	256
	F#2	284	423			
27	F#1	293	422	713	722	256
	F#2	284	421			
28	F#1	296	425	712	719	262
	F#2	281	418			
29	F#1	306	430	712	715	262
	F#2	295	426			
30	F#1	307	424	712	719	262
	F#2	292	419			
31	F#1	303	423	712	715	262
	F#2	294	422			
32	F#1	301	434	711	715	262
	F#2	296	424			
<hr/>						
1	F#1					TRIAL
	F#2					
2	F#1					TRIAL
	F#2					
3	F#1	-		711	720	250
	F#2	-	376			
4	F#1	-		712	719	256
	F#2	-	385			
5	F#1	-		712	716	256
	F#2	-	394			
6	F#1	-		711	718	256
	F#2	-	398			
7	F#1	-		712	722	256
	F#2	-	403			
8	F#1	-		712	722	256
	F#2	-	405			
9	F#1	-		712	718	256
	F#2	-	411			
10	F#1	-		712	719	256
	F#2	-	412			



11	F#1	-		712	719	256
	F#2	-	419			
12	F#1	-		712	7250	262
	F#2	-	420			
13	F#1	-		712	721	250
	F#2	-	412			
14	F#1	-		713	721	256
	F#2	-	418			
15	F#1	-		712	720	256
	F#2	-	410			
16	F#1	-		713	717	256
	F#2	-	413			
17	F#1	-		714	720	256
	F#2	-	415			
18	F#1	-		714	721	256
	F#2	-	413			
19	F#1	-		713	721	256
	F#2	-	410			
20	F#1	-		712	714	262
	F#2	-	415			
21	F#1	-		712	717	262
	F#2	-	420			
22	F#1	-		713	720	262
	F#2	-	419			
23	F#1	-		713	716	262
	F#2	-	419			
24	F#1	291	418	712	715	262
	F#2	290	419			
25	F#1	291	438	712	714	262
	F#2	288	422			
26	F#1	296	435	712	715	262
	F#2	293	422			
27	F#1	276	422	712	726	262
	F#2	274	402			
28	F#1	288	420	712	714	262
	F#2	285	412			
29	F#1	291	430	711	713	262
	F#2	286	420			
30	F#1	-		713	715	262
	F#2	-	425			
31	F#1	-		711	718	268
	F#2	-	415			
32	F#1	-		711	715	268
	F#2	-	417			

MS.PL

33	F#1	-		713	719	268	
	F#2	-	413				
34	F#1	-		712	720	268	
	F#2	-	420				
35	F#1	-		712	718	268	
	F#2	-	414				
36	F#1	-		712	720	268	
	F#2	-	422				
37	F#1	-		713	723	268	
	F#2	-	412				
38	F#1	-		710	723	268	
	F#2	-	413				
39	F#1	-		711	717	268	
	F#2	-	415				
40	F#1	-		710	713	268	
	F#2	-	420				
41	F#1	-		710	714	268	
	F#2	-	420				
<hr/>							
1	F#1						Trial
	F#2						Trial
2	F#1						Trial
	F#2						Trial
3	F#1	289	370	714	717	250	MR Ex
	F#2	287	374				MR Upper
4	F#1	290	377	719	713	250	
	F#2	290	380				
5	F#1	299	389	712	722	250	Reject
	F#2	298	386				
6	F#1	287	390	713	726	250	
	F#2	288	371				
7	F#1	270	358				MR Ex
	F#2	242	379	712	729	256	dioles dulu pk dark
8	F#1	243	376				
	F#2	225	391	713	718	256	dioles dulu pk dark
9	F#1	243	362				setelah ini prehating
	F#2	229	381	712	731	256	setelah ini prehating
10	F#1	240	365	716	699	256	
	F#2	232	374				
11	F#1	248	375				
	F#2	243	392	712	707	256	Dioles dulu pk dark
12	F#1	259	371	712	717	256	

	F#2	248	389				
13	F#1	261	377				coating insitu upper
	F#2	258	389	712	721	256	coating insitu upper
14	F#1	210	377	712	721	256	coating insitu lower
	F#2	208	395				MR PL
15	F#1	263	387				
	F#2	254	398	712	719	256	
16	F#1	259	388				
	F#2	246	400	711	719	256	
17	F#1	252	361				
	F#2	246	376	712	733	256	
18	F#1	249	382				
	F#2	247	380	713	718	256	
19	F#1	239	375				
	F#2	237	393	712	727	262	
20	F#1	253	384				
	F#2	248	401	712	716	262	
21	F#1	253	391				
	F#2	252	402	712	716	262	
22	F#1	265	389				
	F#2	264	400	712	718	262	
23	F#1	240	391				
	F#2	239	406	712	716	262	
24	F#1	246	399				
	F#2	245	414	712	715	262	
25	F#1	240	394				
	F#2	235	400	712	718	262	Pasir Gugur
26	F#1	239	402				Reject
	F#2	238	416	712	715	262	
27	F#1	253	397				
	F#2	249	407	712	721	262	
28	F#1	255	394				
	F#2	248	409	712	719	262	
29	F#1	266	397				
	F#2	264	407	712	719	262	
30	F#1	-	387				
	F#2	-	397	713	728	262	
31	F#1	-	407				
	F#2	-	417	712	718	262	
32	F#1	-	392				
	F#2	-	412	712	720	268	
33	F#1	-	375				
	F#1	-	375	712	729	268	

	F#2	-	391				MR Ex	
34	F#1	252	370	711	727	268		
	F#2	251	390					
35	F#1	289	385	711	714	268		
	F#2	280	397					
36	F#1	270	380	711	715	268		
	F#2	271	393					
1	F#1							
	F#2							
2	F#1							
	F#2							
3	F#1	265	314				MR Ex	
	F#2	263	326	712	721	250		upper dicoating dulu
4	F#1	246	340	712	714	250	MR Ex	
	F#2	242	358				MR Ex, Upper	
5	F#1	256	342	711	722	250		
	F#2	252	360				MR Upper	
6	F#1	257	347	712	723	250		Reject
	F#2	253	365				MR Upper	
7	F#1	253	348	713	724	250		
	F#2	252	362				MR Upper	
8	F#1	267	372	712	723	250		
	F#2	259	391				MR Upper	
9	F#1	265	392	713	728	250		
	F#2	257	402				MR Upper	
10	F#1	276	380	712	727	250		
	F#2	260	393					
11	F#1	269	377	712	724	250		
	87	259	392					
12	F#1	270	388	713	726	250		
	F#2	263	400					
13	F#1	279	391	712	724	250		
	F#2	263	405					
14	F#1	272	387	713	724	256	MR Upper	
	F#2	265	401				MR Upper	
15	F#1	289	396	713	719	256	MR Upper	
	F#2	273	410				MR Upper	
16	F#1	286	395	713	721	256		
	F#2	281	410					
17	F#1	291	400	712	724	256		
	F#2	290	413				MR Upper	
18	F#1	287	398	712	721	256		

	F#2	286	413			
19	F#1	286	402			
	F#2	285	419	713	721	256
20	F#1	290	403			
	F#2	290	420	712	719	256
21	F#1	288	401			
	F#2	285	416	712	721	256
22	F#1	304	399			
	F#2	298	413	712	721	256
23	F#1	289	404			
	F#2	287	418	712	720	256
24	F#1	288	406			
	407	287	422	712	720	256
25	F#1	290	407			
	F#2	288	423	712	720	256
26	F#1	291	409			
	F#2	290	420	712	720	256
27	F#1	294	408			
	F#2	292	420	712	718	262
28	F#1	291	427			
	F#2	290	415	713	723	262
29	F#1	287	408			
	F#2	286	421	712	721	262
30	F#1	294	405			
	F#2	292	417	711	719	262
31	F#1	282	379			
	F#2	280	360	714	719	262
32	F#1	282	387			
	F#2	281	399	712	710	262
33	F#1	282	388			
	F#2	282	400	712	716	262
34	F#1	283	389			
	F#2	280	401	712	717	262
35	F#1	298	407			
	F#2	294	419	712	718	262
36	F#1	296	405			
	F#2	290	416	712	718	262
37	F#1	296	406			
	F#2	292	418	711	717	262
38	F#1	296	404			
	F#2	294	420	711	716	262
39	F#1	296	403			
	F#2	295	421	713	718	262
40	F#1	298	400			
				713	716	268

	F#2	297	399				
41	F#1	298	402	714	718	268	
	F#2	296	407				
42	F#1	298	403	713	719	268	
	F#2	298	399				
43	F#1	282	406	711	718	268	
	F#2	280	420				
44	F#1	288	409	711	717	268	
	F#2	287	422				
45	F#1	289	403	712	721	268	
	F#2	282	417				
1	F#1						trial
	F#2						trial
2	F#1						trial
	F#2						trial
3	F#1	276	372	713	729	250	
	F#2	275	382				
4	F#1	282	382	713	732	250	
	F#2	280	395				
5	F#1	286	396	713	734	250	
	F#2	285	407				
6	F#1	292	399	712	737	250	
	F#2	290	410				
7	F#1	290	397	713	734	250	Under cut Ex
	F#2	289	412				
8	F#1	289	402	712	733	250	lower di coating
	F#2	288	413				MR
9	F#1	235	388	716	719	250	Reject
	F#2	234	392				MR Ex
10	F#1	234	400	715	731	250	trial
	F#2	231	406				trial
11	F#1	261	415	714	728	250	
	F#2	260	413				
12	F#1		390	713	724	250	
	F#2		403				
13	F#1		393	713	728	256	
	F#2		405				
14	F#1		396	713	727	256	
	F#2		407				
15	F#1		401	713	729	256	
	F#2		413				
16	F#1		404	712	728	256	
	F#2		413				

17	F#1	400	713	730	256
	F#2	410			
18	F#1	400	713	726	256
	F#2	411			
19	F#1	407	713	729	256
	F#2	411			
20	F#1	404	713	725	256
	F#2	412			
21	F#1	374	714	739	256
	F#2	385			
22	F#1	396	713	729	256
	F#2	412			
23	F#1	402	713	727	256
	F#2	415			
24	F#1	437	713	724	256
	F#2	443			
25	F#1	425	713	725	256
	F#2	422			
26	F#1	418	714	731	256
	F#2	418			
27	F#1	410	713	722	256
	F#2	420			
28	F#1	407	713	723	262
	F#2	419			
29	F#1	414	712	721	262
	F#2	424			
30	F#1	413	712	720	262
	F#2	429			
31	F#1	413	712	725	262
	F#2	427			
32	F#1	412	713	724	262
	F#2	424			
33	F#1	406	713	726	262
	F#2	422			
34	F#1	410	712	724	262
	F#2	421			
35	F#1	413	712	720	262
	F#2	431			
36	F#1	425	713	722	262
	F#2	442			
37	F#1	441	713	726	262
	F#2	452			
38	F#1	420	712	721	262

upper dicoating

	F#2		435				
39	F#1		381	715	732	262	
	F#2		394				
40	F#1		407	712	715	268	
	F#2		421				
41	F#1		415	712	719	268	
	F#2		426				
1	F#1			715	694	262	trial
	F#2						trial
2	F#1	220	390	711	710	262	trial
	F#2	222	345				MR Upper trial
3	F#1	223	327	712	730	262	
	F#2	210	346				MR Upper
4	F#1	262	358	711	712	268	
	F#2	253	378				MR Ex
5	F#1	251	370	711	717	268	MR Ex
	F#2	256	387				MR Upper
6	F#1	268	381	711	718	268	MR Upper
	F#2	261	398				MR Upper
7	F#1	261	380	711	720	268	
	F#2	246	396				MR PL
8	F#1	234	355				dicoating insitu
	F#2	224	371	712	730	268	dicoating insitu
9	F#1	252	373	711	716	268	
	F#2	240	390				
10	F#1	279	386	710	714	268	
	F#2	257	401				
11	F#1	278	391	710	714	268	
	F#2	270	407				
12	F#1	268	395	710	716	268	
	F#2	267	408				
13	F#1	275	396	710	717	268	
	F#2	265	414				
14	F#1	281	397	710	710	268	
	F#2	271	413				