



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PEMUDARAN KOMPOSISI
0.120 wt. % Ti DAN 0.018 wt. % Sr TERHADAP
KARAKTERISTIK PADUAN AC4B HASIL
*LOW PRESSURE DIE CASTING***

SKRIPSI

**OKTAFINALDO SYAFZA
0606075132**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PEMUDARAN KOMPOSISI
0.120 wt. % Ti DAN 0.018 wt. % Sr TERHADAP
KARAKTERISTIK PADUAN AC4B HASIL
*LOW PRESSURE DIE CASTING***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**OKTAFINALDO SYAFZA
0606075132**

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

i

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Oktafinaldo Syafza

NPM : 0606075132

Tanda Tangan :



Tanggal : 30 Desember 2009

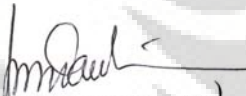
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Oktafinaldo Syafza
NPM : 0606075132
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Pemudaran Komposisi 0.120 Wt. % Ti dan
0.018 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 : Dwi Marta Nurjaya, ST. MT



(.....)

Penguji 2 : Andika Pria Hutama, ST



(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya haturkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.si, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Pihak PT AHM yang telah banyak membantu saya dalam memperoleh data-data yang saya perlukan, terutama kepada segenap karyawan *plant* LPDC PT AHM sunter;
- (3) Kedua orang tua saya, Syafwandi dan Zarmida, serta saudara-saudara saya, Alpony Syafza, Alfiyandra Syafza, Yopie Syafza, dan Syari Susliani Syafza, yang telah mendukung sepenuhnya usaha saya dalam menyelesaikan pendidikan ini baik secara moral maupun material;
- (4) Puji Indah Lestari, yang selalu memberi dukungan dan perhatian kepada saya selama perkuliahan hingga selesainya pembuatan skripsi ini, kesabaran mu akan berbuah manis;
- (5) Teman-teman Teknik Metalurgi dan Material terutama teman-teman angkatan 2006 dan sahabat yang selalu hadir untuk saya, kebersamaan kita semoga selalu terjaga.

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

Depok, 30 Desember 2009

Penulis

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

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

Nama : Oktafinaldo Syafza
NPM : 0606075132
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

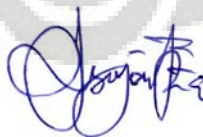
Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Studi Pemudaran Komposisi 0.120 Wt. % Ti dan 0.018 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 : 30 Desember 2009
Yang menyatakan



(Oktafinaldo Syafza)

ABSTRAK

Nama : Oktafinaldo Syafza
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Studi Pemudaran Komposisi 0.120 Wt. % Ti dan 0.018 Wt. % Sr
Terhadap Karakteristik Paduan AC4B Hasil *Low Pressure Die Casting*

Low Pressure Die Casting (LPDC) merupakan salah satu jenis pengecoran logam untuk memproduksi komponen *cylinder head*, yang menggunakan paduan aluminium AC4B sebagai bahan baku utamanya. Dalam proses produksinya masih sering ditemukan cacat, berupa misrun, porositas, bocor, dan penyusutan, yang berdampak terhadap kegagalan produk. Salah satu cara untuk menanggulangi masalah tersebut adalah dengan penambahan penghalus butir titanium dan unsur modifikasi stronsium. Dimana dengan penambahan kedua unsur, porositas akan tersebar secara merata, serta menyebabkan peningkatan kemampuan alir dan sifat mekanis dari paduan AC4B. Penelitian ini mempelajari fenomena pemudaran komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr pada paduan AC4B, dengan variabel waktu tahan: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit.

Pengujian yang dilakukan berupa pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell*, pengujian tarik dengan standar JIS 2201, pengujian kemampuan alir dengan metode spiral, serta perhitungan fraksi volume porositas berdasarkan standar ASTM E562. Selain itu juga dilakukan pengamatan terhadap struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM)/*Energy Dispersive X-ray Analysis* (EDX).

Hasil penelitian menunjukkan penambahan penghalus butir Ti dan unsur modifikasi Sr hingga komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr menyebabkan terjadinya peningkatan nilai kekerasan, kekuatan tarik, kemampuan alir dan penurunan nilai *Dendrit Arm Spacing* (DAS) bila dibandingkan dengan paduan AC4B tanpa penambahan. Namun, dengan meningkatnya waktu tahan terhadap penambahan kedua unsur dalam paduan aluminium cair, menyebabkan keefektifan dari kedua unsur berkurang yang menandakan proses pemudaran berlangsung. Proses pemudaran komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr paduan AC4B berlangsung semakin cepat pada waktu tahan 60 menit. Dimana terjadi perubahan signifikan pada nilai kekerasan maupun *Dendrit Arm Spacing* (DAS).

Kata kunci:

LPDC, AC4B, penghalus butir, unsur modifikasi, pemudaran.

ABSTRACT

Name : Oktafinaldo Syafza
Major : Metallurgy and Materials Engineering
Tittle : Study of Fading of AC4B Alloy Containing 0.120 wt. % Ti and 0.018 wt. % Sr Produced by Low Pressure Die Casting

Low Pressure Die Casting (LPDC) is one method to produce the cylinder head components, which use AC4B aluminum alloy as their main raw material. Some defects commonly found in this component are misrun, porosity, leakage, and shrinkage. An alternative to overcome these problems is by addition of titanium grain refiner and strontium modifier. Addition of these elements is expected to evenly distribute porosity and to increase fluidity of molten metal and mechanical properties. The main aim of this research is to understand the fading of AC4B alloy with 0.120 wt. % Ti and 0.018 wt. % Sr during LPDC process. Fading was observed at the intervals of : 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, and 120 minutes.

Hardness testing was conducted by using Rockwell method, while tensile testing by JIS 2201 standards. Fluidity test employed spiral method and porosity was quantitatively calculated by ASTM E562 standard. Microstructures were observed by means of optical microscope and Scanning Electron Microscope (SEM)/ Energy Dispersive X-ray Analysis (EDX).

The experimental results show that combination of 0.120 wt. % Ti grain refiner and 0.018 wt. % Sr modifier increased tensile strength, hardness, fluidity and decreased Dendrit Arm Spacing (DAS) value. However, increasing holding time reduced the effectiveness of these two elements, or widely known as fading. The fading of 0.120 wt. % Ti and 0.018 wt. % Sr was more apparent after 60 minutes, where there were significant decrease in hardness and increase of Dendrit Arm Spacing (DAS).

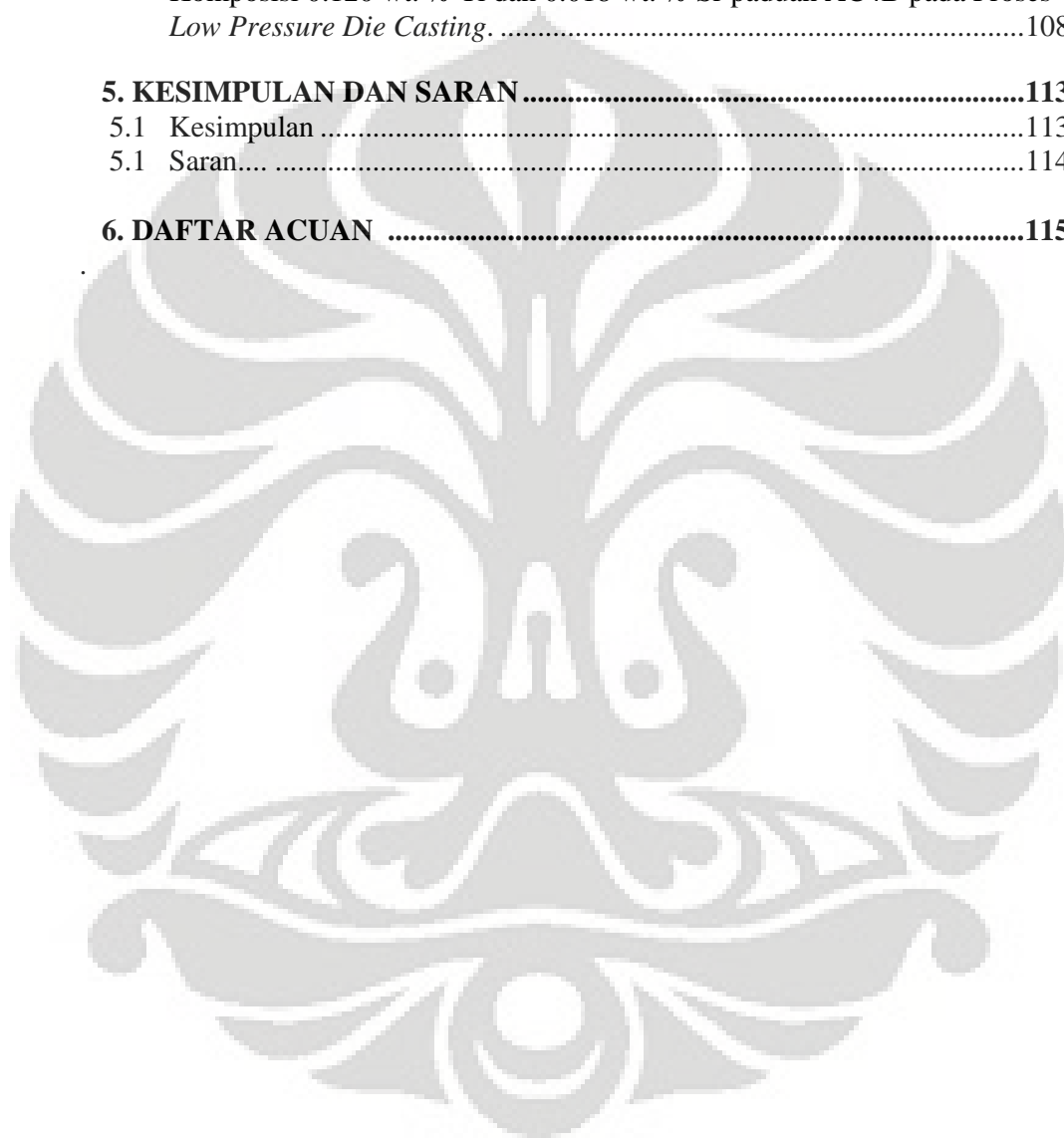
Key words :
LPDC, AC4B, Grain refiner, modifier, fading.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
1.3.1 Material Penelitian	3
1.3.2 Parameter Penelitian	3
1.3.3 Tempat Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
2. STUDI LITERATUR.....	5
2.1 Paduan Aluminium Tuang	5
2.2 Tata Nama Paduan Aluminium Tuang	6
2.3 Paduan Aluminium Silikon.....	8
2.4 Paduan Aluminium AC4B	10
2.5 Pengaruh Unsur Dalam Paduan Aluminium Tuang.....	12
2.6 Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Sifat Mekanis.....	17
2.6.1 Fasa Intermetalik.....	18
2.6.2 <i>Dendrite Arm Spacing</i> (DAS).....	19
2.6.3 Ukuran dan Bentuk Butir	21
2.6.4 Modifikasi Kristal Silikon.....	21
2.7 Pembekuan Logam.....	22
2.7.1 Pembekuan Logam Secara Umum.....	22
2.7.2 Proses Pembentukan Inti (Nukleus).....	23
2.7.3 Proses Pembentukan Kristal	25
2.8 Penghalusan Butir	28
2.8.1 Mekanisme Penghalusan Butir	29
2.8.2 Pengaruh Penambahan Penghalus Butir pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B.....	34
2.8.3 Efek Pemudaran Penghalus Butir	36
2.9 Modifikasi Paduan Aluminium-Silikon AC4B dengan Penambahan Stronsium	37
2.9.1 Mekanisme Modifikasi Paduan Aluminium-Silikon AC4B	39

2.9.2 Modifikasi yang Berlebih	42
2.9.3 Pemudaran Unsur Modifikasi	42
2.9.4 Pengaruh Modifikasi pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B	43
2.10 Penggabungan Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi	51
2.10.1 Interaksi antara Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi	51
2.10.2 Pengaruh Penggabungan Penghalus butir dan Unsur Modifikasi	52
2.10.3 Proses Pemudaran Penggabungan Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi	57
2.11 <i>Low Pressure Die Casting</i> (LPDC)	58
2.11.1 Cacat Yang Terdapat Pada Produk Hasil LPDC	59
2.12 <i>Cylinder Head</i>	62
3. METODOLOGI PENELITIAN	63
3.1 Diagram Alir Penelitian	63
3.2 Peralatan dan Bahan	64
3.2.1 Peralatan	64
3.2.2 Bahan	65
3.3 Prosedur Penelitian	66
3.3.1 Proses Pembuatan Sampel	66
3.3.2 Proses Preparasi Sampel Tebal dan Tipis	72
3.3.3 Karakterisasi Sampel	73
3.3.3.1 Pengujian Komposisi Kimia	73
3.3.3.2 Pengujian Porositas	74
3.3.3.3 Pengujian Kekuatan Tarik dan Fluiditas	75
3.3.3.3.1 Pengujian Kekuatan Tarik	76
3.3.3.3.2 Pengujian Fluiditas	78
3.3.3.4 Pengujian Kekerasan	79
3.3.3.5 Pengamatan Struktur Mikro	80
3.3.3.6 Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive X-ray Analysis</i> (EDX)	81
3.3.3.7 Pengujian <i>X-Ray Diffractometer</i> (XRD)	82
3.3.3.8 Pengujian Kebocoran	83
4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	85
4.1 Analisa Komposisi Paduan Aluminium AC4B	85
4.2 Karakterisasi <i>Flux Coveral</i> GR-2815 dan <i>Master Alloy</i> Al-10Sr	87
4.2.1 Karakterisasi <i>Flux Coveral</i> GR-2815	87
4.2.2 Karakterisasi <i>Master Alloy</i> Al-10Sr Menggunakan Mikroskop Optik dan XRD	89
4.3 Analisa Pemudaran Pengaruh Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Porositas Paduan Aluminium AC4B	90
4.4 Analisa Pemudaran Pengaruh Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium AC4B	93
4.4.1 Analisa Pemudaran Pengaruh Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Sifat Kekuatan Tarik Paduan Aluminium AC4B	93
4.4.2 Analisa Pemudaran Pengaruh Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Kekerasan Paduan Aluminium AC4B	96

4.5	Analisa Pemudaran Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Fluiditas Aluminium AC4B	99
4.6	Analisa Pemudaran Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Struktur Metalografi Aluminium AC4B	101
4.6.1	Pengamatan Mikroskop Optik	101
4.6.2	Pengamatan SEM dan EDX.....	106
4.7	Analisa Tingkat Kegagalan pada Komponen <i>Cylinder Head</i> terhadap Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr paduan AC4B pada Proses <i>Low Pressure Die Casting</i>	108
5.	KESIMPULAN DAN SARAN	113
5.1	Kesimpulan	113
5.1	Saran.....	114
6.	DAFTAR ACUAN	115



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram fasa paduan aluminium silikon (Al-Si)	9
Gambar 2.2	Mikrostruktur Aluminium Silikon; (a) komposisi hipoeutektik, 150 X; (b) komposisi eutektik, 400X; dan (c) komposisi hipereutektik, 150X	9
Gambar 2.3	Grafik kelarutan hidrogen pada aluminium.....	16
Gambar 2.4	Fasa Intermetalik pada paduan aluminium.....	19
Gambar 2.5	Mikrostruktur Al-Si hipoeutektik menunjukkan DAS	20
Gambar 2.6	Sketsa geometris sel dendrit	20
Gambar 2.7	Pengaruh laju pembekuan terhadap Dendrit Arm Spacing	20
Gambar 2.8	Pengaruh <i>Dendrit Arm Spacing</i> terhadap kekuatan.....	21
Gambar 2.9	Radius Kritis	24
Gambar 2.10	Kurva pembekuan pada logam murni	25
Gambar 2.11	Struktur yang terjadi pada hasil tuangan logam cair	26
Gambar 2.12	Ilustrasi pembentukan butir pada bagian dekat dinding cetakan.....	27
Gambar 2.13	Mikrostruktur dari efek penambahan penghalus butir pada aluminium: (a) sebelum penambahan dan (b) setelah penambahan	28
Gambar 2.14	Diagram Fasa Al-Ti.....	30
Gambar 2.15	Mekanisme terjadinya nukleasi pada sistem Al-Ti	31
Gambar 2.16	Skematik nukleasi dan penghalusan butir dari Al dengan peritektik $TiAl_3$	31
Gambar 2.17	Zona <i>undercooled</i> mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit.....	33
Gambar 2.18	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.....	34
Gambar 2.19	Pengaruh nilai SDAS terhadap sifat mekanis pada paduan aluminium tuang.....	35
Gambar 2.20	Pemudaran penghalus butir pada paduan aluminium	37
Gambar 2.21	Mikrostruktur aluminium-silikon, (a) belum termodifikasi, (b) telah termodifikasi	38
Gambar 2.22	Pertumbuhan dan pembentukan silikon <i>acicular</i> ; (a) pertumbuhan silikon, (b) silikon <i>acicular</i>	39
Gambar 2.23	Adsorpsi atom impurities pada tahapan pertumbuhan kristal silikon yang menyebabkan terjadinya mekanisme twinning.....	40
Gambar 2.24	Formasi bidang kembar (twin) pada silikon	40
Gambar 2.25	Diagram solidifikasi paduan Al-Si dengan penambahan 0.02wt % Sr	41
Gambar 2.26	Perubahan mikrostruktur silikon karena proses modifikasi	45
Gambar 2.27	Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi tanpa penambahan Sr.....	46
Gambar 2.28	Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi dengan penambahan Sr.....	47
Gambar 2.29	Perbandingan tingkat porositas	48
Gambar 2.30	Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi (a) pada paduan dengan <i>range</i> pembekuan pendek dan (b) pada paduan dengan <i>range</i> pembekuan panjang ^[24]	49

Gambar 2.31	Metode pengujian fluiditas dengan menggunakan cetakan spiral...	50
Gambar 2.32	Perubahan ukuran butir Al-7%Si dengan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi (1.0% dari Al-1%Ti-3%B dan 0.02% Sr)	52
Gambar 2.33	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.....	54
Gambar 2.34	Pengaruh penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi paduan Al-7Si terhadap;(a) kekuatan tarik dan (b) ketahanan aus	55
Gambar 2.35	Efek hidrogen porositas terhadap sifat mekanik dari aluminium 356-T6.....	56
Gambar 2.36	Konsentrasi Sr terhadap penggabungan dengan penghalus butir dalam aluminium cair	58
Gambar 2.37	Konstruksi mesin <i>Low Pressure Die Casting</i>	58
Gambar 2.38	Jenis <i>shrinkage</i>	61
Gambar 2.39	Komponen <i>Cylinder Head</i>	62
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	63
Gambar 3.2	Dapur peleburan FCECO.	66
Gambar 3.3	Material umpan; a) <i>ingot</i> AC4B dan b) <i>scrap</i> AC4B.....	67
Gambar 3.4	<i>Gas bubble flotation</i>	68
Gambar 3.5	Elemen yang akan ditambahkan a) <i>master alloy</i> Al-10Sr , b) penghalus butir <i>flux Coveral</i> GR-2815.....	68
Gambar 3.6	Mesin LPDC	70
Gambar 3.7	Tahapan pemasukan penghalus butir dan unsur modifikasi: a) Penempatan di dalam ciduk, b) pemasukan ke dalam <i>holding furnace</i> , c) proses pengadukan	71
Gambar 3.8	Proses GBF-manual dengan menggunakan <i>lance</i>	71
Gambar 3.9	Daerah pemotongan sampel pada <i>cylinder head</i>	72
Gambar 3.10	Mesin persiapan sampel; a) Mesin amplas dan b) mesin poles.....	73
Gambar 3.11	a) Cetakan sampel uji spektrometri, b) Sampel uji komposisi kimia, c) Mesin uji spektrometri.....	74
Gambar 3.12	Alat vakum OSTEK	75
Gambar 3.13	Dapur <i>crucible</i>	76
Gambar 3.14	(a) Cetakan uji tarik, (b) sampel uji tarik yang baru dikeluarkan dari cetakan.....	77
Gambar 3.15	Bentuk dan ukuran sampel uji tarik yang disesuaikan dengan standar JIS 2201	77
Gambar 3.16	Mesin uji tarik Shimadzu.....	78
Gambar 3.17	a) Proses penuangan aluminium cair ke cetakan uji fluiditas, b) cetakan uji fluiditas, c) proses pengeluaran sampel dari cetakan....	79
Gambar 3.18	Alat uji kekerasan <i>Rockwell</i>	80
Gambar 3.19	Mikroskop Optik Olympus.....	81
Gambar 3.20	<i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	82
Gambar 3.21	Mesin Difraktometer Sinar-X.....	83
Gambar 3.22	Alat uji bocor	84
Gambar 4.1	Mikrostruktur dari penghalus butir <i>Coveral</i> GR-2815	87
Gambar 4.2	Hasil XRD <i>flux Coveral</i> GR 2815.....	88

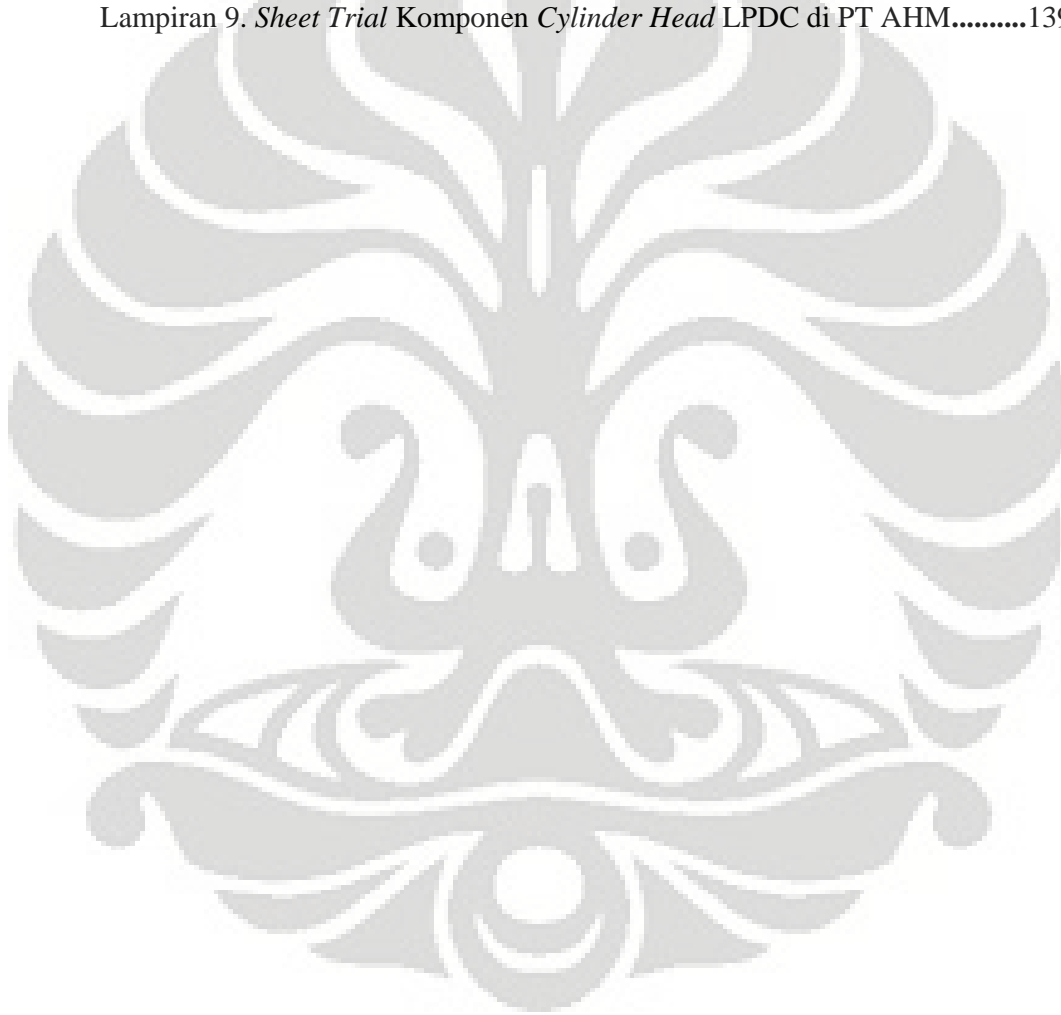
Gambar 4.3	Struktur mikro <i>master alloy</i> Al-10Sr.....	89
Gambar 4.4	Hasil XRD <i>master alloy</i> Al-10 Sr	89
Gambar 4.5	Penampang potongan sampel uji porositas paduan AC4B; (a) komposisi normal, dan pada komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr (b) 0 menit waktu tahan, (c) 120 menit waktu tahan	90
Gambar 4.6	Perbandingan morfologi mikro porositas pada sampel fluiditas paduan AC4B; (a) komposisi normal dan pada komposisi 0.12 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr (b) 0 menit waktu tahan, (c) 120 menit waktu tahan.....	93
Gambar 4.7	Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap nilai UTS paduan AC4B.....	94
Gambar 4.8	Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap % elongasi paduan AC4B	95
Gambar 4.9	Penampang patahan uji tarik komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr pada awal penambahan	96
Gambar 4.10	Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap nilai kekerasan komponen cylinder head AC4B	97
Gambar 4.11	Perbandingan nilai fluiditas paduan AC4B komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr pada pengamatan; (a) 0 menit; (b) 60 menit dan; (c) 120 menit.....	99
Gambar 4.12	Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap panjang fluiditas paduan AC4B.....	100
Gambar 4.13	Struktur mikro paduan AC4B, (a) komposisi normal, (b) komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.....	102
Gambar 4.14	Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap nilai DAS AC4B.....	103
Gambar 4.15	Struktur mikro <i>cylinder head</i> AC4B komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr bagian tipis dan tebal pada waktu tahan 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit	105
Gambar 4.16	Hubungan kekerasan dan DAS <i>cylinder head</i> AC4B terhadap waktu tahan	105
Gambar 4.17	Struktur mikro (SEM) paduan aluminium AC4B komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.....	106
Gambar 4.18	Cacat pada komponen <i>cylinder head</i> dengan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr (a)(b) misrun	109
Gambar 4.19	Perbandingan presentase kegagalan akibat <i>misrun</i> dan <i>shrinkage</i> pada paduan aluminium AC4B pada komposisi tanpa penambahan dan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr	110
Gambar 4.20	Perbandingan persentase kegagalan akibat bocor pada komponen <i>cylinder head</i> paduan AC4B pada komposisi tanpa penambahan dan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr	111

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat umum dari aluminium	6
Tabel 2.2	Klasifikasi aluminium paduan sesuai standar AA	7
Tabel 2.3	Komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan <i>Japan International Standard</i>	11
Tabel 2.4	Komposisi kimia paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar <i>Aluminum Association</i>	11
Tabel 2.5	Karakteristik yang dimiliki paduan aluminium AC4B	12
Tabel 2.6	Teori-teori mengenai mekanisme penghalusan butir	32
Tabel 2.7	Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut pada aluminium.....	33
Tabel 2.8	Bentuk dan komposisi unsur modifikasi stronsium	38
Tabel 2.9	Pengaruh penambahan penghalus butir dan/atau unsur modifikasi terhadap SDAS Al-7Si.....	53
Tabel 4.1	Hasil uji komposisi paduan AC4B.....	85
Tabel 4.2	Komposisi kimia <i>grain refiner</i> berdasarkan analisa SEM.....	88
Tabel 4.3	Hasil penghitungan fraksi volume porositas dengan metode grid (ASTM E562)	91
Tabel 4.4	Hasil analisa komposisi paduan aluminium AC4B kombinasi penambahan 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr	107
Tabel 4.5	Hasil <i>check sheet</i> produksi <i>cylinder head</i> hasil proses LPDC.....	109

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia	118
Lampiran 2. Hasil Pengujian Kekerasan.....	121
Lampiran 3. Hasil Pengujian Tarik	122
Lampiran 4. Hasil Perhitungan Nilai DAS	126
Lampiran 5. Hasil Pengamatan SEM/EDX.....	128
Lampiran 6. Hasil Pengujian XRD	134
Lampiran 7. Komposisi Penghalus Butir <i>Flux Coveral</i> GR 2815	136
Lampiran 8. <i>Sheet</i> Komponen <i>Cylinder Head</i> LPDC.....	137
Lampiran 9. <i>Sheet Trial</i> Komponen <i>Cylinder Head</i> LPDC di PT AHM.....	139



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Dewasa ini, dengan semakin jelinya masyarakat dalam memilih kebutuhan akan moda transportasi dengan harga murah, irit, dan tahan lama. Menuntut para pelaku industri otomotif untuk dapat lebih berinovasi dan terus mengembangkan produk sehingga menghasilkan produk yang berkualitas, biaya produksi yang rendah, dan dapat bersaing dipasaran. Salah satu bentuk realisasi hal tersebut dengan melakukan pengembangan terhadap penggunaan material atau bahan baku dalam produksinya.

Bahan baku yang paling sering digunakan untuk aplikasi pada komponen otomotif yaitu berasal dari aluminium dan paduannya. Dengan keunggulan yang dimiliki oleh logam aluminium berupa ringan, kekuatan yang tinggi, pengantar panas dan listrik yang baik, serta ketahanan korosi yang baik^[1], tetap belum mampu menghasilkan komponen otomotif yang diinginkan. Oleh karena itu, perlu dilakukannya pengembangan dan penelitian lebih lanjut agar sifat aluminium paduan menjadi lebih baik lagi. Adapun metode yang sering digunakan dan terus mengalami pengembangan untuk peningkatan kualitas dari hasil pengecoran dengan bahan baku paduan aluminium, yakni melalui metode penghalusan butir, penambahan unsur modifikasi, serta perlakuan panas^[2].

Jenis paduan aluminium yang banyak digunakan sebagai bahan baku pembuatan komponen pada industri manufaktur otomotif adalah paduan aluminium AC4B (Al-Si-Cu) berdasarkan standar JIS / *Japan Industrial Standard* atau setara dengan dengan paduan 333.0 *as-cast* berdasarkan standar AA / *Aluminum Association*^[3]. Paduan aluminium ini digunakan terutama dalam aplikasi pembuatan *cylinder head* pada industri kendaraan bermotor dengan proses pengecoran menggunakan metode *Low Pressure Die Casting* (LPDC). Dengan segenap proses yang telah dijalani baik menyangkut kepada penggunaan bahan baku, proses permesinan, dan parameter proses lainnya, ternyata belum mampu menghasilkan produk yang optimal. Masih sering ditemukannya cacat pada produk, baik selama proses pengecoran di LPDC ataupun pada tahap

selanjutnya melalui proses permesinan. Adapun cacat yang sering ditemukan berupa *misrun*, *shrinkage*, porositas, dan bocor^{[4][5][6]}. Keberadaan cacat tersebut berakibat buruk pada kualitas dari *cylinder head* yang dihasilkan, karena akan menurunkan sifat mekanisnya yang berdampak terhadap peningkatan kegagalan produk. Oleh karena itu, dibutuhkannya suatu penelitian dan pengembangan terutama menyangkut penggunaan bahan baku, karena dirasa paling cocok untuk mengatasi permasalahan tersebut. Metode yang dipilih berupa penambahan penghalus butir yang merupakan suatu unsur yang berperan dalam mengubah ukuran dan bentuk butir logam menjadi butir-butir yang lebih kecil dan homogen sehingga dapat memperbaiki sifat mekanis produk hasil coran. Serta penambahan unsur modifikasi pada aluminium cair, yang berperan merubah bentuk morfologi dari silikon *eutectic* dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*, yang juga berdampak terhadap peningkatan sifat mampu alir dan sifat mekanis aluminium paduan^[4]. Dengan melihat sifat yang dihasilkan dari penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi yang baik terhadap hasil coran, serta saling mendukung di antara keduanya dan diharapkan dapat menanggulangi cacat ataupun kegagalan yang terjadi pada produk LPDC.

Penelitian ini lebih menekankan pada pengamatan proses pemudaran (*fading*) dari penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi di dalam aluminium cair. Pemudaran merupakan proses untuk menemukan waktu kontak keefektifan yang paling tinggi (*critical contact time*) terhadap penambahan unsur penghalus butir dan modifikasi terhadap aluminium cair. Parameter waktu yang digunakan dalam mengamati pemudaran dari unsur yang ditambahkan dimulai dari 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit sejak awal proses penambahan. Jenis penghalus butir yang digunakan adalah penghalus butir dalam bentuk *fluks*, dengan nama dagang *Coveral GR-2815* dengan komposisi penambahan sebanyak 0.08 wt. % Ti. Serta jenis modifikasi yang digunakan adalah Sr dalam bentuk *master alloy Al-10 % Sr*, dengan komposisi penambahan sebanyak 0.018 wt. % Sr.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian payung yang dilakukan dalam bentuk grup riset dengan bahasan yang berbeda-beda. Namun, memiliki keterkaitan satu dengan yang lain, mengenai pengembangan material aluminium

untuk aplikasi otomotif dengan cara kombinasi penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi sehingga dapat dihasilkan produk komponen otomotif yang berkualitas.

1.2 Tujuan Penelitian

1. Untuk mempelajari fenomena pemudaran paduan aluminium AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap sifat mekanis paduan.
2. Untuk mempelajari fenomena pemudaran komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap terhadap struktur mikro paduan aluminium AC4B.
3. Untuk mengetahui keefektifan waktu pudar (*fading*) komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr paduan aluminium AC4B.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

1.3.1 Material Penelitian

1. Paduan aluminium tuang AC4B.
2. Penghalus butir yang digunakan adalah serbuk Al-Ti (nama dagang *Coveral GR-2815* dengan 15 % Ti).
3. Unsur modifikasi yang digunakan berupa *master alloy* Al-10 % Sr.

1.3.2 Parameter Penelitian

1. Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr pada paduan AC4B.
2. Variabel waktu pudar: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit sejak proses penambahan dimulai.
3. Proses LPDC dengan temperatur *pre-heating* ± 270 °C, kapasitas *holding furnace* adalah 500 kg, temperatur logam aluminium selama proses 710 ± 10 °C, dengan tekanan mesin 250-268 kPa di *plant* LPDC PT AHM.
4. Pengujian fluiditas dengan metode spiral dengan temperatur *pre-heating* dijaga konstan pada 290 °C.
5. Komponen *cylinder head as cast*.

1.3.3 Tempat Penelitian

- 1) Proses pengecoran dilakukan di *plant* LPDC PT AHM.
- 2) Pengujian kekerasan, pengujian tarik, spektometri dan kebocoran dilakukan di PT AHM.
- 3) Pengamatan mikrostruktur dilakukan di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- 4) Analisis struktur dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan *Dispersive X-ray Analysis* (EDX) di laboratorium SEM di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- 5) Karakterisasi pengalus butir *Coveral* GR-2815 dan unsur modifikasi *master alloy* Al-10 % Sr dengan menggunakan *X-Ray Diffractometer* (XRD) dilakukan di BATAN.

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan hasil yang diperoleh dapat memberi kontribusi dalam dunia pendidikan Indonesia, terutama pada bidang pengecoran aluminium paduan dan memahami pengaruh unsur paduan dalam paduan aluminium khususnya pengaruh unsur penghalus butir dan modifikasi. Serta memberikan suatu alternatif solusi sebagai upaya peningkatan kualitas produk AC4B dengan metode LPDC dan dapat menurunkan angka kegagalan pada komponen *cylinder head* guna menciptakan proses produksi yang efektif dan efisien.

BAB 2

STUDI LITERATUR

2.1 Paduan Aluminium Tuang

Aluminium paduan merupakan salah satu material yang paling sering digunakan, baik sebagai bahan baku, bahan setengah jadi, ataupun barang jadi. Bila dibandingkan dengan jenis paduan material lain. Paduan aluminium merupakan paduan yang paling sering digunakan dalam bidang pengecoran logam terutama pada dunia manufaktur otomotif .

Dalam kondisi murni, aluminium memiliki sifat yang lunak, mampu cor, serta sifat mekanis yang kurang baik. Oleh karena itu aluminium perlu pepaduan dengan unsur-unsur tertentu agar sifat dari aluminium dapat ditingkatkan. Hingga saat ini dunia internasional telah menemukan lebih dari 300 paduan aluminium dan lebih dari 100 jenis komposisi aluminium yang telah terdaftar pada aluminium asosiasi^[1]. Adapun sifat-sifat yang dimiliki aluminium sebagai aluminium tuang^[8], yaitu :

- Fluiditas yang baik, sehingga mampu mengisi rongga-rongga cetakan yang tipis.
- Temperatur lebur dan temperatur tuang yang relatif lebih rendah dibandingkan logam lain, dimana titik leburnya sekitar 650-750 °C.
- Siklus penuangan yang cukup cepat, dikarenakan perpindahan panas dari aluminium cair ke cetakan relatif lebih cepat.
- Kelarutan gas (dalam hal ini hidrogen) dapat dikendalikan dengan proses yang baik.
- Cukup banyak jenis paduan aluminium tuang yang relatif bebas dari kecenderungan *hot shortness*.
- Memiliki stabilitas kimia yang cukup baik.
- Permukaan *as-cast* baik, berkilat, dan tanpa noda.
- Ketahanan terhadap kondisi korosif yang baik hampir disetiap kondisi lingkungan, hal ini disebabkan karena hadirnya lapisan pasif film Al_2O_3 pada permukaannya.

Namun demikian, dengan segenap keunggulan yang dimiliki bukan berarti paduan aluminium terlepas dari kekurangan yang dapat muncul karena sifat-sifat tersebut, seperti berat jenis yang rendah 2.71 g/cm^3 pada temperatur kamar menyebabkan pengotor-pengotor yang dengan berat hampir sama dengan aluminium yaitu $1.9\text{-}2.1 \text{ gr/cm}^3$ dapat dengan mudah tercampur pada aluminium cair^[7]. Sifat aluminium yang mudah mengikat gas hidrogen dalam kondisi cair, menyebabkan dibutuhkan proses yang lebih lanjut berupa proses *degassing* atau *Ar treatment*, sehingga berdampak pada peningkatan biaya produksi. Serta penyusutan saat membeku cukup tinggi yaitu sekitar 6 %. Sifat aluminium secara umum tersaji pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Sifat umum dari aluminium^[4]

Sifat	Nilai
Nomor atom	13
Berat atom ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	26.98
Nomor valensi atom	3
Struktur kristal	FCC
Titik lebur ($^{\circ}\text{C}$)	660.2
Titik didih ($^{\circ}\text{C}$)	2519
Rata-rata panas spesifik (0-100 $^{\circ}\text{C}$) ($\text{cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$)	0.219
Konduktivitas panas (0-100 $^{\circ}\text{C}$) ($\text{cal}/\text{cms}\cdot^{\circ}\text{C}$)	0.57
Koefisien ekspansi linier (0-100 $^{\circ}\text{C}$) ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	23.5
Ekspansi termal (25°C) ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	23.1
Resistivitas elektrik at 20 $^{\circ}\text{C}$ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	2.69
Kepadatan (g/cm^3)	2.6898
Modulus elastis (GPa)	68.3
Rasio Poisson	0.34

2.2 Tata Nama Paduan Aluminium Tuang

Sistim klasifikasi yang umum dipakai dalam tata nama paduan aluminium tuang adalah berdasarkan standar *Aluminium Association* (AA) dan *American National Standard Institute* (ANSI H35.1-1978). Sistem pengklasifikasian

mencangkup cara pembuatan serta unsur utama yang menjadi penyusun logam paduan, yang digambarkan dengan 4 digit angka, seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Klasifikasi aluminium paduan sesuai standar AA^[1]

Seri	Tipe Paduan
1XX.X	Aluminium murni ($\geq 99\%$)
2XX.X	Aluminium-tembaga (Cu)
3XX.X	Aluminium-Si + Cu dan atau Mg
4XX.X	Aluminium-Silicon (Si)
5XX.X	Aluminium-Magnesium (Mg)
6XX.X	Tidak digunakan
7XX.X	Aluminium-Seng (Zn)
8XX.X	Aluminium-Timah (Sn)
9XX.X	Aluminium+Unsur lain-lain

Digit pertama menunjukkan kelompok paduan, digit kedua dan ketiga menunjukkan jenis spesifikasi aluminium paduan tersebut, sedangkan digit keempat mengindikasikan bentuk produk^[1], dimana :

- 0 untuk mengindikasikan keterbatasan kimia yang diberikan pada paduan coran.
- 1 untuk mengindikasikan keterbatasan kimia yang diberikan untuk *ingot* yang digunakan untuk membuat paduan coran.
- 2 untuk mengindikasikan *ingot* namun dengan perbedaan keterbatasan kimia.

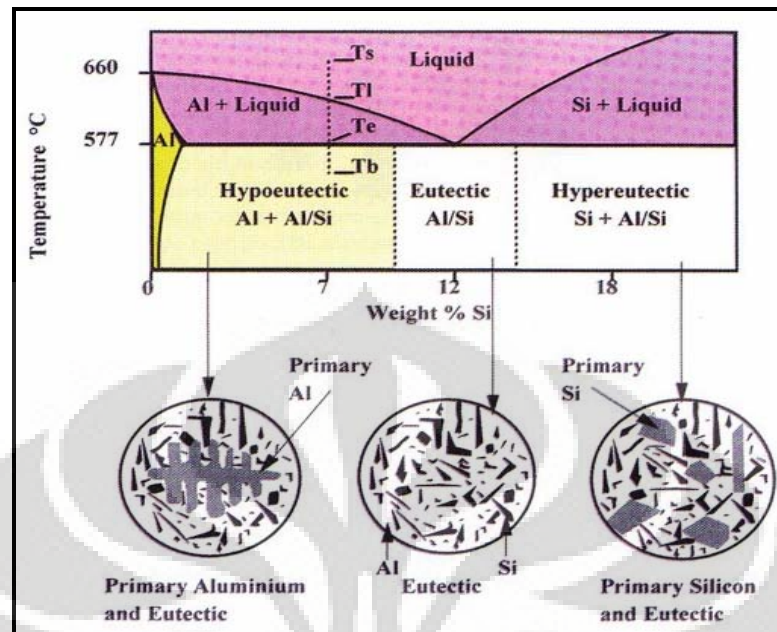
Pada sistem pengklasifikasian aluminium paduan, *ingot* versi XXX.1 dapat digunakan sebagai *secondary product* (dilebur kembali dari *scrap*), sedangkan *ingot* versi XXX.2 dibuat dari *primary* aluminium. Beberapa nama aluminium paduan juga ada yang diklasifikasikan menggunakan huruf. Setiap huruf yang diikuti oleh angka menjadi pembeda antara paduan dalam hal persentase pengotor atau elemen yang jumlahnya minor.

Berdasarkan *Aluminium Association Casting Temper Designation System* (Ref 1), aluminium diklasifikasikan berdasarkan proses perlakuan panas yang dilakukan terhadapnya^[1]. Adapun sistem pengklasifikasian aluminium berdasarkan perlakuan panas, yaitu:

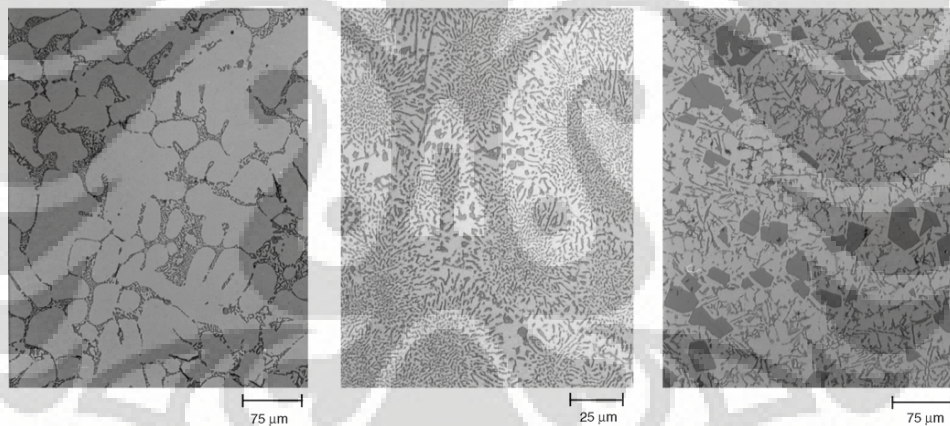
- 1) Orde F, *as – cast* (digunakan dalam proses pengecoran)
- 2) Orde O, *annealed*
- 3) T4, *solution treated and aged*
- 4) T5, *precipitation hardened*
- 5) T6, *solution heat treated, quenched, and precipitation hardened*
- 6) T7, *solution heat treated, quenched, and overaged*

2.3 Paduan Aluminium Silikon

Aluminium silikon merupakan paduan yang lebih banyak digunakan bila dibandingkan dengan jenis lain dari aluminium paduan. Pengaplikasian aluminium silikon pada saat ini tidak hanya terbatas pada proses manufaktur otomotif saja, tetapi telah berkembang pada industri perkakas, penerbangan, produk olahraga, hingga industri pertahanan. Hal ini disebabkan oleh sifat yang dihadirkan oleh aluminium silikon, baik selama proses pembuatan maupun produk yang dihasilkan nantinya. Paduan aluminium silikon termasuk pada aluminium paduan berseri 3XX.X berdasarkan standar *Aluminium Association* (AA). Kombinasi antara aluminium dengan silikon pada suatu paduan memiliki beberapa keunggulan, diantaranya mempunyai kemampuan alir yang sangat baik, sifat mampu bentuk dan ketahanan korosi yang baik, serta memiliki koefisien ekspansi termal yang rendah^[8].



Gambar 2.1 Diagram fasa paduan aluminium silikon (Al-Si)^[16].



Gambar 2.2 Mikrostruktur Aluminium-Silikon; (a) komposisi hipoeutektik, 150 X; (b) komposisi eutektik, 400X; dan (c) komposisi hipereutektik, 150X^[11].

Berdasarkan kandungan silikon yang ada dalam paduannya, maka paduan aluminium silikon dibagi menjadi tiga daerah utama, hal ini dapat terlihat pada Gambar 2.1. Adapun pembagiannya, yaitu:

1) Hipoeutektik silikon

Merupakan paduan aluminium silikon yang memiliki kadar Si < 11.7 %. Pada diagram fasa diatas terlihat bahwa dalam kondisi ini proses pembekuan berlangsung melalui fasa cair-padat, dengan struktur akhir dari komposisi ini

berupa struktur yang didominasi oleh aluminium. Fasa utama yang terdapat pada hipoeutektik silikon berupa fasa α -Al dan struktur eutektik sebagai struktur tambahan.

2) Eutektik silikon

Paduan aluminium silikon yang memiliki kadar Si 11.7-12 %. Pada kondisi ini paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padat. Proses pembekuan yang berlangsung menyerupai pembekuan logam murni, dimana temperatur awal dan temperatur akhir adalah sama (isothermal). Adanya struktur eutektik ini mengakibatkan paduan aluminium silikon memiliki karakteristik mampu cor yang baik.

3) Hipereutektik silikon

Paduan aluminium silikon dengan kadar Si > 12.2 %. Mikrostruktur paduan ini terdiri dari endapan partikel silikon primer dalam matriks eutektik. Proses pembekuannya melalui fasa cair-padat yang didominasi hadirnya partikel silikon dengan fasa eutektik sebagai fasa tambahan. Dengan adanya endapan partikel silikon, maka paduan aluminium silikon hipereutektik memiliki ketahanan aus yang sangat baik. Akan tetapi kekuatan tarik dan keuletannya menjadi lebih rendah dibandingkan dengan aluminium silikon hipoeutektik. Selain itu, adanya endapan partikel silikon ini menjadi masalah pada proses permesinannya.

Bentuk struktur mikro dari ketiga bagian ini terlihat pada Gambar 2.2. Ketiga komposisi ini memiliki struktur utama berupa fasa α -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 α -Al, terdapat juga fasa yang merupakan partikel-partikel kristal silikon yang tidak terlarut dalam fasa α -Al.

2.4 Paduan Aluminium AC4B

Paduan AC4B merupakan unsur utama sebagai bahan baku pembuatan *cylinder head* dan paduan yang sering digunakan dalam proses pengecoran lainnya pada manufaktur otomotif. Berdasarkan standar JIS H5202 (*Japan*

International Standard), paduan aluminium AC4B setara dengan paduan aluminium tuang 333.0 standar AA (*Aluminum Association*). Kesetaraan ini terlihat pada kedekatan komposisi diantara kedua jenis paduan. Adapun komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan standar JIS H5202 dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan komposisi kimia paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar AA pada Tabel 2.4.

Kelebihan dari paduan aluminium tuang AC4B adalah kekuatan dan kekerasan yang baik, sifat mampu cor (*castability*), dan sifat mampu las yang baik serta dapat dilakukan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanisnya^[1]. Karakteristik yang dimiliki oleh paduan aluminium AC4B hasil pengecoran (*as-cast*) diperlihatkan pada Tabel 2.5. Aplikasi lain penggunaan paduan aluminium tuang AC4B berupa *engine cooling fans, clutch housing, crankcases, air compressors pistons, fuel pumps, compressor cases, rocker arms, timing gears*^[1].

Tabel 2.3 Komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan *Japan International Standard*^[3]

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

Tabel 2.4 Komposisi kimia paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar *Aluminum Association*^[7]

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

Tabel 2.5 Karakteristik yang dimiliki paduan aluminium AC4B^[9]

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

2.5 Pengaruh Unsur Dalam Paduan Aluminium Tuang

Penambahan unsur pada aluminium bertujuan untuk peningkatan sifat dari coran aluminium, baik selama proses pengecoran maupun terhadap produk akhir yang dihasilkan. Adapun unsur yang berpengaruh dalam pengecoran aluminium AC4B, yaitu:

1. Besi (Fe)

Rentang penggunaan Fe pada *pressure die casting* yaitu sebesar 0.9-1.0%. Dalam paduan aluminium keberadaan besi dapat dikategorikan sebagai pengotor yang paling sering ditemukan, dimana besi dan unsur lain membentuk suatu kombinasi fasa intermetalik yang dapat menurunkan sifat hasil coran, karena fasa intermetalik ini memiliki titik leleh yang tinggi dan bersifat cukup keras sehingga dapat menimbulkan masalah saat pemrosesan. Selain itu, keberadaan besi yang berlebih akan menurunkan keuletan dan ketahanan korosi pada paduan aluminium serta mengakibatkan struktur butir yang kasar. Besi akan bereaksi membentuk fasa-fasa intermetalik dalam paduan aluminium, berupa $FeAl_3$, $FeMnAl_6$, dan $\alpha AlFeSi$ ^[1]. Namun, keberadaan besi pada paduan aluminium juga dapat memberikan efek yang baik berupa peningkatan kekuatan dan kekerasan, memperbaiki ketahanan *hot-tearing*, serta mengurangi kecenderungan penempelan (*die sticking*) atau penyambungan (*soldering*) antara aluminium dengan cetakan pada saat proses pengecoran^[1]. Besi memiliki kelarutan yang sangat rendah pada aluminium cair yaitu sebesar 0.05 % pada suhu 655 °c.

2. Boron (B)

Boron pada aluminium paduan merupakan unsur yang sering digunakan sebagai penghalus butir dan untuk meningkatkan konduktivitas dengan pengendapan vanadium, titanium, kromium dan molibdenum. Boron dapat digunakan sendiri (pada kandungan 0.005-0.1 %) sebagai penghalus butir selama proses solidifikasi. Namun, akan dapat menjadi efektif saat digunakan dengan unsur titanium yang berlebih^[2].

3. Fosfor (P)

Fosfor ketika berada dalam aluminium tuang akan membentuk AlP_3 , yang berperan sebagai nukleus untuk modifikasi hipereutektik Al-Si, agar Si primer memiliki bentuk yang lebih bulat.

4. Karbon (C)

Keberadaan karbon dalam aluminium dikategorikan sebagai pengotor dalam bentuk *oxycarbide* dan karbida seperti Al_4C_3 . Namun, pembentukan karbida pengotor lainnya dapat saja terjadi seperti dengan titanium. Al_4C_3 akan mengalami dekomposisi atau terurai dengan adanya air dan uap air, hal ini akan dapat memicu terbentuknya lubang-lubang kecil pada permukaan.

5. Magnesium (Mg)

Magnesium merupakan elemen pembangun atau yang memberi sifat kekuatan dan kekerasan dalam perlakuan panas pada paduan aluminium-silikon. Dan untuk tujuan yang sama, magnesium biasanya juga digunakan pada paduan aluminium-silikon yang kompleks, yang terdiri dari tembaga, nikel, dan unsur-unsur lainnya. Magnesium memiliki kelarutan 17.4 % pada temperatur 450 °C. Magnesium dan silikon akan mengalami mekanisme penguatan berupa penguatan endapan (*precipitation hardening*), dengan membentuk fasa Mg_2Si sebagai presipitat. Fasa Mg_2Si akan berguna pada kadar sekitar 0.7 % Mg, lebih dari itu maka efek penguatannya tidak terjadi. Biasanya paduan aluminium-silikon akan memiliki kekuatan yang tinggi dengan penambahan magnesium pada kisaran 0.4-0.7 %^[1]. Perpaduan antara aluminium dan magnesium biasanya digunakan untuk pengaplikasian yang menghendaki permukaan akhir yang terang, memiliki respon yang baik terhadap bahan kimia, tahan terhadap korosi, dan memiliki kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan.

6. Mangan (Mn)

Pada kondisi normal keberadaan mangan dianggap sebagai pengotor pada komposisi coran. Kelarutan unsur Mn dalam aluminium cair sebesar 1.82 % pada temperatur 658 °c. Mangan akan memberikan efek yang baik bila dikombinasikan dengan besi, dimana dapat meningkatkan sifat mampu cor dan sifat mekanis, serta mengurangi penyusutan (*shrinkage*) pada pengecoran aluminium. Penambahan mangan pada aluminium juga dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan.

7. Nikel (Ni)

Nikel pada paduan aluminium-silikon bersama dengan tembaga akan berperan dalam mempertahankan sifat-sifat paduan pada saat kenaikan temperatur, serta dalam mereduksi koefisien ekspansi termal^[1]. Pada aluminium cair unsur Ni memiliki batas nilai kelarutan sekitar 0.05 %.

8. Seng (Zn)

Keberadaan seng pada paduan aluminium tidak memberikan dampak yang signifikan. Namun, dengan tembaga dan atau magnesium, penambahan seng menghasilkan komposisi *heat-treatable* dan *aging natural* yang unik, dimana terbentuknya presipitat $MgZn_2$ dan $CuAl_2$.

9. Silikon (Si)

Silikon merupakan unsur paduan yang paling sering digunakan dalam pengecoran aluminium guna meningkatkan karakteristik logam coran. Silikon dalam perpaduan aluminium-silikon berdampak pada peningkatan mampu alir, meningkatkan ketahanan terhadap retak panas pada hasil coran, serta menurunkan *specific gravity* dan koefisien muai panas^[1]. Pada aluminium AC4B kandungan silikon sekitar 7-10 %, keberadaan silikon ini menyebabkan terbentuknya fasa eutektik pada temperatur ruang.

10. Stronsium (Sr)

Stronsium merupakan unsur modifikasi pada aluminium-silikon eutektik yang berperan dalam merubah struktur silikom primer dari bentuk jarum yang kasar/balok menjadi bentuk halus/bulat. Proses modifikasi dapat berjalan efektif dengan hanya menambahkan stronsium dalam jumlah yang sangat sedikit dengan meningkatnya laju pembekuan, yang dalam hal ini rentang keefektifan stronsium berada pada 0.008-0.04 % yang biasa digunakan. Namun, dengan besarnya

kandungan stronsium pada paduan akan mengakibatkan tidak efektifnya proses *degassing*, sehingga porositas dapat hadir^[1].

11. Tembaga (Cu)

Penambahan tembaga dalam campuran aluminium biasanya berkisar pada 4-5.5 %^[1]. Tembaga memiliki kelarutan sekitar 5.65 % pada temperatur 550 °c. Pencampuran tembaga bertujuan untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada benda hasil coran dan pada kondisi perlakuan panas. Namun, secara umum keberadaan tembaga dapat berdampak kepada penurunan sifat ketahanan terhadap korosi, ketahanan terhadap *hot-tearing*, serta meningkatkan potensi untuk terjadinya penyusutan interdendritik^[1].

12. Titanium (Ti)

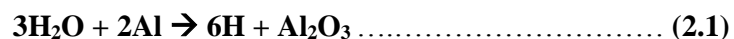
Titanium secara luas digunakan untuk proses penghalus butir pada struktur paduan aluminium hasil pengecoran. Biasanya digunakan dengan pengkombinasian unsur boron dalam jumlah tertentu. Keberadaan titanium dan boron membentuk $TiAl_3$, AlB_2 atau $(Al,Ti)B_2$ sebagai nuklean pada solidifikasi aluminium tuang. Titanium dalam paduan aluminium dapat mereduksi kecenderungan terjadinya retak pada *hot-short composition*.

13. Timah (Sn)

Timah berperan dalam meningkatkan sifat anti gesek dan untuk aplikasi material yang memerlukan ketahanan aus. Biasanya pada paduan aluminium tuang penambahan Sn mencapai 25 %. Di samping itu, penambahan timah juga dapat meningkatkan sifat mampu mesin (*machinability*).

14. Hidrogen

Hidrogen merupakan satu-satunya gas yang memiliki kelarutan yang cukup besar pada aluminium cair, sehingga dapat dengan mudah larut dalam aluminium cair. Penyerapan hidrogen pada aluminium cair terjadi pada saat permukaan aluminium cair kontak dengan uap air pada atmosfer sehingga air tereduksi dan menghasilkan hidrogen. Proses ini dapat dijelaskan dalam persamaan (2.1) :

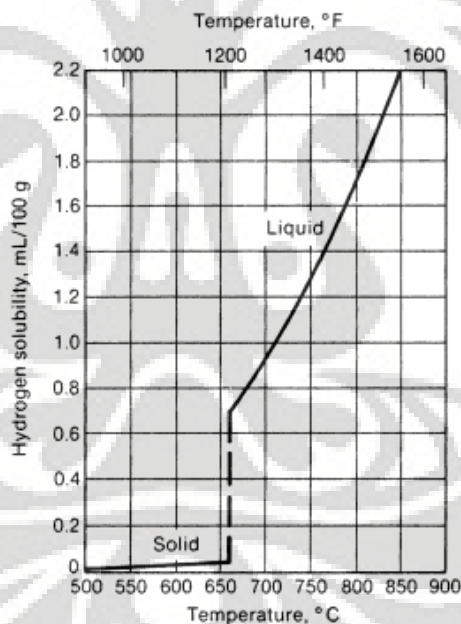


Kehadiran hidrogen dalam aluminium cair dapat menimbulkan masalah yang mengarah pada terjadinya cacat porositas pada hasil coran. Dimana dalam cairan aluminium, hidrogen larut secara atomik. Sehingga selama proses pendinginan

dan pembekuan, hidrogen berlebih yang terdapat pada aluminium cair akan mengendap membentuk molekul dan akhirnya mengakibatkan pembentukan porositas.

Keberadaan porositas akan berdampak terhadap penurunan sifat mekanik dari aluminium tuang, berupa menurunnya kekuatan tarik dan elongasi serta penurunan kekuatan fatik dan dampak. Tak hanya itu, keberadaan porositas yang saling terhubung akan menyebabkan bocor pada produk aluminium tuang dalam kondisi dibawah tekanan serta memicu terjadinya retak panas.

Proses pengendapan hidrogen mengikuti hukum nukleasi dan pertumbuhan fasa selama proses pembekuan. Dimana, semakin tinggi temperatur pada paduan aluminium, maka kelarutan hidrogen didalam paduan juga semakin meningkat. Hal ini dapat terlihat melalui grafik kelarutan hidrogen-temperatur pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Grafik kelarutan hidrogen pada aluminium^[1].

Larutnya gas hidrogen dalam aluminium cair dapat disebabkan oleh beberapa faktor berupa, material bahan yang kurang baik, lingkungan yang lembab, proses penggunaan *flux* yang tidak optimal (tidak menutupi seluruh permukaan aluminium cair), proses *degassing* yang tidak sempurna sehingga gas hidrogen yang terlarut tidak terbawa keluar, serta kondisi cetakan pasir yang memiliki

permeabilitas besar akibat kurangnya kadar air sehingga gas hidrogen dari luar dapat masuk ke dalam cetakan^[1].

Pengendalian hidrogen dalam aluminium cair dan paduannya dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu, 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. Proses *degassing* dilakukan dengan memasukan senyawa kimia kering yang akan terurai dan mampu mengikat serta mengangkat hidrogen keluar dari aluminium cair. Senyawa kimia yang digunakan biasanya berupa gas inert seperti nitrogen dan argon, dengan alasan keduanya tidak akan menimbulkan reaksi dengan aluminium cair. Atau penggunaan gas aktif berupa klorin, freon, florin ataupun kombinasi diantara ketiganya dengan gas inert^[7]. Mekanisme pengikatan serta pengangkatan hidrogen ini menggunakan prinsip difusi tekanan parsial.

2.6 Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Sifat Mekanis

Struktur mikro yang terbentuk pada aluminium paduan sangat memegang peranan dalam menentukan sifat-sifat dari material baik selama pemrosesan maupun hasil akhir yang dihasilkan. Struktur mikro dari paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi, kecepatan pembekuan, serta perlakuan panas. Komponen dari struktur mikro yang dapat mempengaruhi sifat mekanis pada aluminium tuang adalah^[1]:

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

2.6.1 Fasa Intermetalik

Fasa intermetalik merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro paduan aluminium, fasa ini terbentuk akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Keberadaan fasa intermetalik sangat dipengaruhi oleh komposisi dan mekanisme pembekuan yang terjadi. Dengan berpegang terhadap komposisi kimia yang akan hadir menyebabkan dalam prosesnya sangat bergantung kepada perhitungan stekiometri agar keberadaan fasa ini dapat terkontrol dengan baik.

Keberadaan fasa intermetalik akan berpengaruh kepada sifat mekanis dari paduan aluminium. Fasa intermetalik bersifat sangat getas yang akan mengurangi keuletan material sehingga berdampak terhadap penurunan kekuatan dari paduan aluminium silikon. Fasa ini terbentuk akibat hadirnya unsur tambahan yang menyebabkan terbentuknya oksida dalam paduan aluminium, serta akibat terjadinya modifikasi yang berlebihan karena penambahan unsur modifikasi pada aluminium paduan^[11]. Pada reaksi solidifikasi paduan Al-Si hipoeutektik dan eutektik terjadi beberapa mekanisme pengendapan fasa, yaitu :

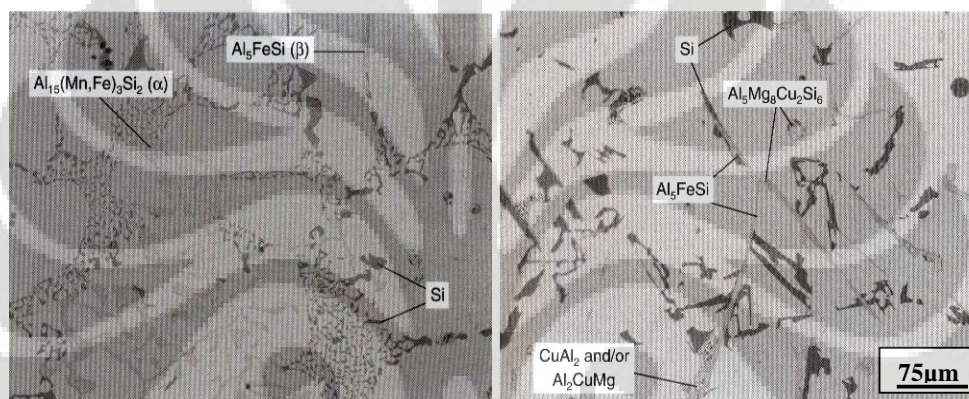
1. Pembentukan jaringan dendritik α -aluminium.
2. Reaksi eutektik Al-Si.
3. Pengendapan fasa kedua eutektik seperti Mg_2Si dan Al_2Cu , serta juga terjadi pengendapan fasa yang mengandung Mn dan Fe.

Fasa yang paling sering muncul pada paduan Al-Si adalah fasa Al_5FeSi dan $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$. Keberadaan Fe dan Mn dalam paduan sangat mempengaruhi sifat mekanis dari paduan berdasarkan struktur mikro yang terbentuk. Dimana fasa yang terbentuk oleh unsur Fe berupa fasa Al_5FeSi yang bersifat getas, yang dapat menyebabkan penurunan keuletan. Serta unsur Mn yang akan membentuk fasa $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ juga memiliki sifat yang getas dan keras. Kedua fasa ini menyebabkan sulitnya proses permesinan. Pada tahapan akhir solidifikasi terjadi pengendapan fasa Mg_2Si dan Al_2Cu ^[11].

Dendrit α -aluminium lebih mudah bertumbuh dibandingkan kristal silikon dan fasa intermetalik lainnya. Namun, diantara fasa intermetalik terdapat perbedaan kecepatan pertumbuhan, dimana fasa $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ lebih mudah

bertumbuh dibandingkan fasa Al_5FeSi sehingga fasa ini lebih mendominasi pada saat pembekuan cepat.

Kecepatan pembekuan sangat mempengaruhi ukuran, bentuk, dan distribusi fasa intermetalik. Pembekuan yang lambat menghasilkan fasa intermetalik yang kasar dan juga terjadi konsentrasi fasa kedua pada batas butir. Pembekuan yang cepat menghasilkan semakin banyak larutan padat dan partikel yang lebih halus terdispersi. Keberadaan fasa intermetalik dalam paduan aluminium dapat terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Fasa Intermetalik pada paduan aluminium^[7].

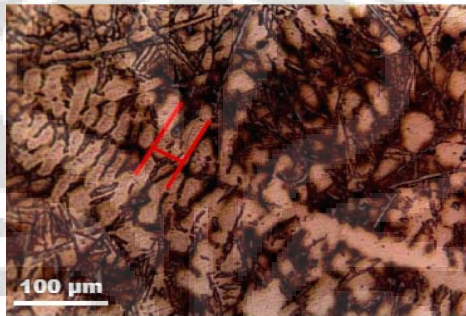
2.6.2 Dendrite Arm Spacing (DAS)

Dendrit merupakan struktur khas yang akan muncul dari hasil proses pengecoran. Struktur dendrit berbentuk seperti struktur yang bercabang-cabang yang menyerupai pohon, yang tumbuh ketika aluminium cair yang *undercooled* membeku, gambaran dari struktur dendrit pada aluminium dapat terlihat pada Gambar 2.6. Ada 3 hal yang menjadi acuan dalam menjelaskan karakteristik dendrit, yaitu :

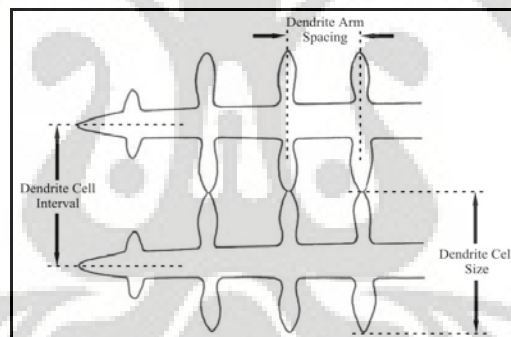
- *Dendrite arm spacing* : jarak antara lengan sekunder dendrit.
- *Dendrite sel interval* : jarak antara garis sumbu dendrit yang saling berdekatan.
- *Dendrite cell size* : lebar dendrit

Dendrite arm spacing (DAS) atau jarak antar lengan dendrit merupakan gambaran dari struktur mikro yang terbentuk pada material coran, hal ini dapat terlihat pada Gambar 2.5. Keberadaan DAS dipengaruhi oleh cepat lambatnya proses pembekuan pada proses pengecoran (Gambar 2.7). DAS dihitung dari

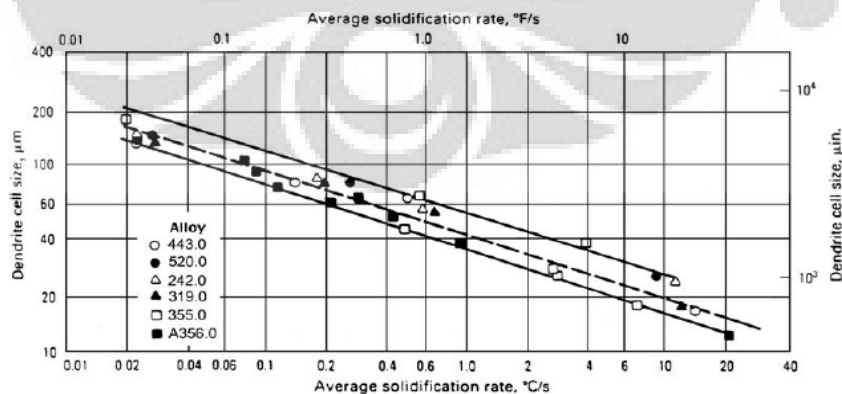
tengah cabang dendrit ke tengah cabang dendrit yang lain, nilai dari DAS ini akan berpengaruh terhadap sifat mekanis suatu paduan logam. Dimana nilai DAS yang semakin besar mengindikasikan struktur mikro yang kasar, sehingga sifat mekanis yang dihasilkan tidak baik. Sedangkan nilai DAS yang yang kecil mengindikasikan struktur mikro yang halus dengan sifat mekanis yang baik^[5], terlihat pada Gambar 2.8.



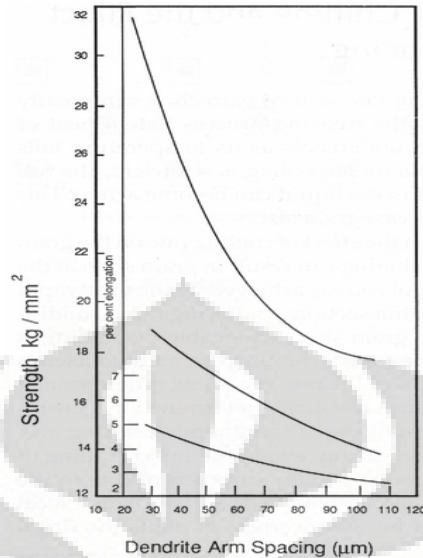
Gambar 2.5 Mikrostruktur Al-Si hipoeutektik menunjukkan DAS^[33].



Gambar 2.6 Sketsa geometris sel dendrit^[5].



Gambar 2.7 Pengaruh laju pembekuan terhadap *Dendrit Arm Spacing*^[11].



Gambar 2.8 Pengaruh *Dendrit Arm Spacing* terhadap kekuatan^[1].

2.6.3 Ukuran dan Bentuk Butir

Dalam suatu struktur mikro dari suatu material terdiri dari banyak butir, dengan bentuk dan ukuran yang beranekaragam yang akan mempengaruhi sifat mekanis material tersebut. Pada suatu struktur mikro logam bentuk butir yang sangat diinginkan berupa butir yang halus dan *equiaxed* karena butir jenis ini dapat menghasilkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan. Sedangkan adanya butir yang kasar dan berbentuk *columnar* tidak diinginkan karena menurunkan sifat mekanik. Bentuk dan ukuran butir dipengaruhi oleh komposisi kimia, kecepatan pembekuan, konsentrasi dari efektifitas inti saat pembekuan, dan penambahan penghalus butir (*grain refining*)^[11].

2.6.4 Modifikasi Kristal Silikon

Proses modifikasi merupakan suatu proses penambahan unsur tertentu yang dapat merubah struktur mikro silikon eutektik dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*. Elemen modifikasi biasanya berasal dari unsur-unsur golongan IA, IIA dan unsur tanah jarang seperti stronsium (Sr) dan sodium (Na) untuk paduan al-si hipoeutektik, sedangkan phosphor (P) dan antimony (Sb) untuk paduan Al-Si hipereutektik^[4]. Elemen modifikasi merupakan unsur yang digunakan untuk mengontrol bentuk morfologi dari partikel silikon yang akan berdampak terhadap sifat dari material coran^[16].

Unsur modifikasi akan berjalan efektif dengan penambahan dalam konsentrasi yang sangat kecil, biasanya berada pada rentang 0.01 - 0.02 %^[4]. Efektifitas dari perlakuan modifikasi dapat dilihat dari derajat dan lama waktu *undercooling* saat proses pembekuan. Secara umum tujuan dilakukannya modifikasi adalah untuk^[12] :

- Meningkatkan UTS dan keuletan.
- Meningkatkan kekuatan impak dan ketangguhan.
- Meningkatkan kekuatan fatik.
- Sifat mampu mesin (*machinability*) menjadi lebih baik.
- Kecenderungan terhadap retak panas (*hot tearing*) rendah.
- Meningkatkan fluiditas.

2.7 Pembekuan Logam

2.7.1 Pembekuan Logam Secara Umum

Proses pembekuan sangat mempengaruhi produk yang dihasilkan, oleh karena itu fenomena pembekuan dari tuangan dan variabel-variabel yang mempengaruhi struktur akhir benda tuang selama proses pembekuannya perlu diperhatikan.

Pembekuan logam coran dimulai dari bagian yang bersentuhan dengan cetakan, dimana ketika panas dari logam cair diambil oleh cetakan sehingga bagian logam yang bersentuhan dengan cetakan itu mendingin sampai pada titik beku, yang akhirnya inti-inti kristal tumbuh. Bagian dalam dari coran mendingin lebih lambat dari pada bagian luar, sehingga kristal-kristal tumbuh dari inti asal mengarah kebagian dalam coran dan butir-butir kristal tersebut berbentuk panjang seperti kolom, yang disebut struktur kolom. Namun, jika gradien temperatur bagian tengah pada saat pengecoran rendah maka terbentuk struktur kristal segi banyak dengan orientasi yang sembarang^[13].

Pada waktu terjadinya pembekuan atau pencairan, logam berada pada dua fasa sekaligus yaitu fasa padat dan fasa cair. Fasa cair memiliki susunan yang tidak teratur apabila didinginkan mendekati temperatur pembekuannya maka akan terbentuk sekelompok atom yang bergabung dan kedudukannya teratur dimana kelompok ini makin lama makin banyak dan juga akan berkembang (inti) menjadi

butir (padat). Perubahan suatu fasa terjadi dengan tujuan untuk mencapai kesetimbangan menuju kondisi yang lebih stabil, perubahan ini selalu menuju pada energi bebas yang terendah. Jika yang terjadi hanya perubahan sejumlah kecil volume maka dapat ditulis seperti pada Persamaan (2.2) :

$$G = H - TS \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana :

G : Energi bebas

H : Energi total

T : Temperatur absolut (K)

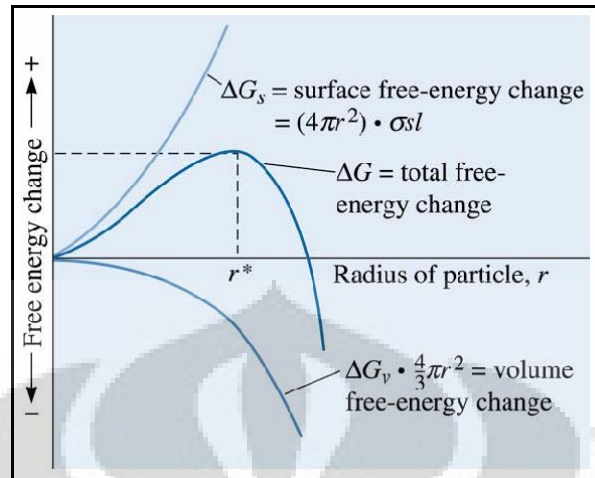
S : Entropi

Pada temperatur tertentu energi total sebesar H dalam sistem dapat terdiri dari dua bagian berupa Energi bebas/*Gibbs Free Energy* (G) dan Energi ikatan/*Bound Energy*. Kedua bentuk energi ini dapat terjadi secara serentak dalam bentuk yang berlainan, dan pada akhirnya dapat diubah ke dalam bentuk panas. Kandungan panas dalam sistem tersebut dapat dihitung berdasarkan unit termal. Energi bebas *Gibbs* dapat dijelaskan bahwa dalam kondisi tertentu energi dapat diubah dan dilepaskan tanpa perubahan temperatur.

2.7.2 Proses Pembentukan Inti (Nukleus)

Pembentukan kristal bermula dari proses pembentukan inti melalui proses nukleasi. Proses pembentukan inti dan pertumbuhan kristal ditentukan oleh dua faktor :

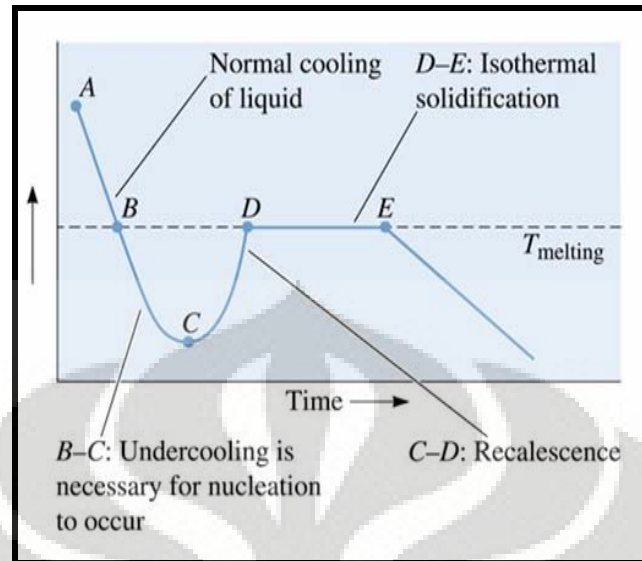
- 1) Energi permukaan yaitu energi yang diperlukan untuk membentuk permukaan sampai tegangan radius kritis (r_c), dimana tegangan permukaan adalah γ .
- 2) Energi volume, yaitu energi yang diperlukan untuk pembentukan volume pada temperatur konstan.



Gambar 2.9 Radius Kritis^[2].

Beda energi antara fasa padat dengan fasa cair menghasilkan beda energi volume (ΔG_v) yang bernilai negatif. Saat pembentukan fasa padat terbentuk suatu batas antar muka pada kedua fasa tersebut, permukaan ini memiliki energi bebas permukaan (σ) sebagai pertumbuhan fasa solid yang bernilai positif.

Oleh karena itu, total energi bebas pada sistem fasa cair menjadi fasa padat tergantung pada jari-jari kritis dari inti pembentuk fasa padat (Gambar 2.9). Apabila jari-jari inti kurang dari jari-jari kritisnya maka tidak terjadi pembekuan, artinya jika jumlah intinya kurang maka inti akan kembali larut. Apabila fasa cair tepat pada titik pembekuan hanya sedikit molekul yang bersatu karena molekul-molekul tersebut memiliki energi yang tinggi dan ketika fasa cair diturunkan dari titik pembekuannya, maka banyak molekul yang terbentuk menjadi inti (*nuclei*), kemudian inti-inti tersebut membesar dan membentuk fasa padat.



Gambar 2.10 Kurva pembekuan pada logam murni^[2].

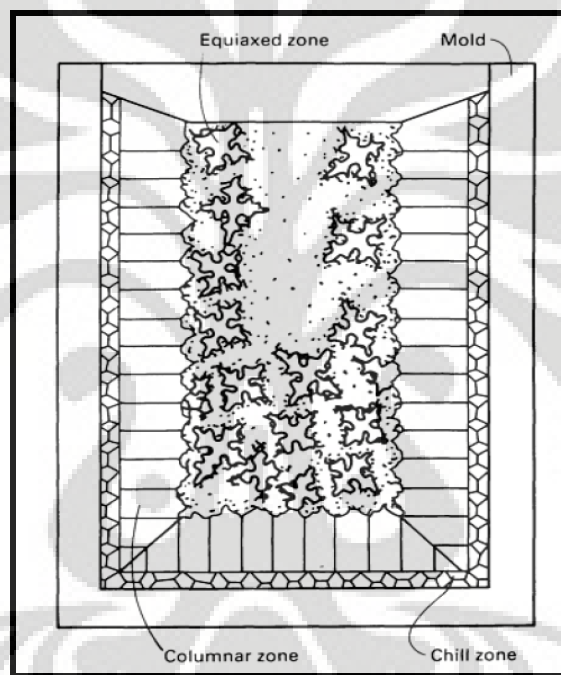
Dari Gambar 2.10 dapat terlihat bahwa proses pembekuan dimulai dari titik A menuju titik B dimana pada titik B seharusnya logam cair sudah membeku. Namun, untuk dapat terjadi pembekuan perlu adanya jumlah bibit (*nucleus*) yang cukup. Sehingga jika pada titik B jumlah bibit yang diperlukan untuk pembekuan berkurang maka pembekuan akan terus mencari temperatur yang sesuai (penurunan temperatur) hingga bibit (*nucleus*) yang diperlukan cukup yaitu pada titik C. Kondisi ini dinamakan *undercooling*. Ketika bibit sudah cukup, maka logam mulai membeku dengan mengeluarkan panas sehingga temperatur naik kembali sampai titik D (*Recalescence*) dan terjadi *isothermal solidification* pada titik D-E dan akhirnya pada titik E pembekuan selesai.

2.7.3 Proses Pembentukan Kristal

Pertumbuhan kristal merupakan kelanjutan proses nukleasi dimana proses ini akan menentukan bentuk kristalografi akhir logam tuang. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, pada proses pengecoran pertumbuhan kristal berawal dari dinding cetakan menuju bagian tengah sampai akhirnya semua logam cair membeku. Kecepatan pertumbuhan diatur oleh besarnya derajat pendinginan lanjut dibawah titik lebur. Kecepatan pertumbuhan meningkat seiring dengan naiknya derajat pendinginan lanjut hingga maksimum dan kemudian turun lagi.

Kecepatan pembekuan inti dan kecepatan pertumbuhan mengikuti arah yang sama dengan meningkatnya derajat pendinginan lebih lanjut.

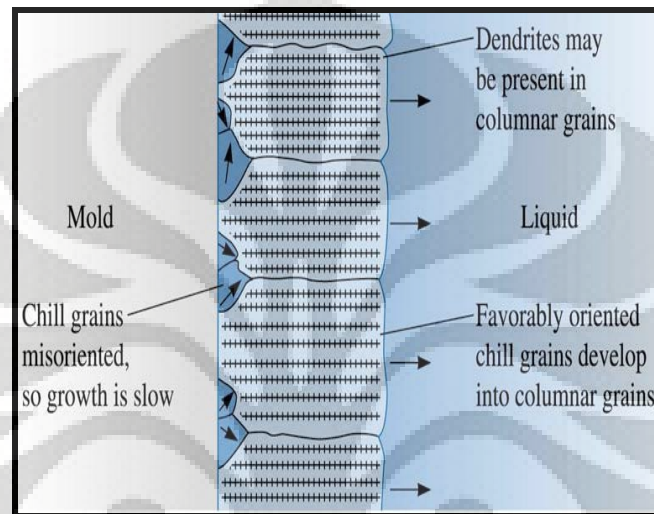
Pada proses pengecoran, struktur kristal dapat berbentuk *equiaxed* maupun *columnar*, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.11. Ketika dituang ke dalam cetakan, logam cair yang bersentuhan dengan dinding cetakan akan mengalami pendinginan cepat dibawah temperatur *liquidus*-nya, terbentuk *nuklei* pada bagian dinding cetakan, yang menyebabkan terbentuknya *equiaxed chilled zone*.



Gambar 2.11 Struktur yang terjadi pada hasil tuangan logam cair^[14].

Selama proses pembekuan pertama pada dinding cetakan ini, panas yang berasal dari logam cair (panas laten) akan dilepaskan sehingga meningkatkan temperatur disekitarnya dan menyebabkan penurunan kecepatan pendinginan lanjut. Perubahan ini akan menghentikan pembentukan inti baru yang selanjutnya akan terjadi pertumbuhan secara berkelanjutan. Pertumbuhan ini dikontrol oleh kecepatan perpindahan panas sehingga menghasilkan suatu struktur yang dinamakan *columnar*.

Pembentukan daerah *columnar* pada bagian dekat dinding cetakan diakibatkan oleh berkumpulnya butir yang mempunyai orientasi yang sama sehingga terbentuk struktur *columnar*. Butir-butir pada bagian dekat dinding saling berkompetisi untuk tumbuh, sehingga hanya butir dengan orientasi tertentu saja yang dapat tumbuh, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12.

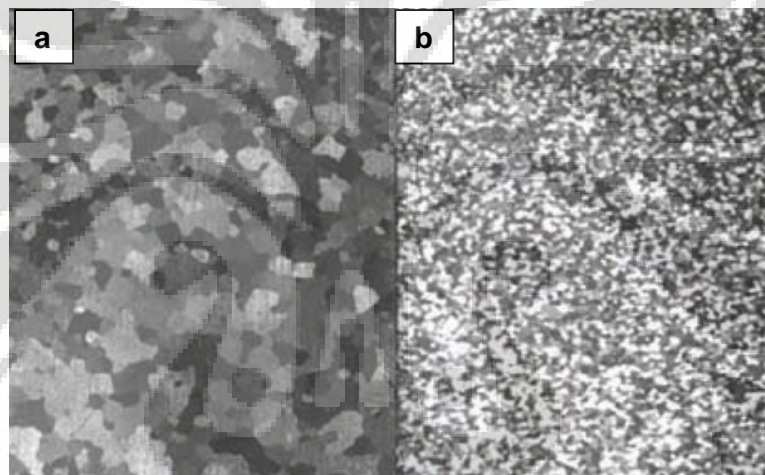


Gambar 2.12 Ilustrasi pembentukan butir pada bagian dekat dinding cetakan^[15].

Struktur kristal *equiaxed* akan menggantikan pertumbuhan *columnar*. Struktur *equiaxed* memiliki orientasi kristalografis yang acak. Pada dinding cetakan, struktur ini terbentuk karena pendinginan cepat sehingga logam cair memiliki kecepatan nukleasi yang tinggi. Pada bagian tengah cetakan, struktur ini terbentuk akibat gradien temperatur antara *solid* dan *liquid* sudah sedemikian kecilnya sehingga pendinginan lanjut konstitusional menjadi demikian efektif bagi proses nukleasi kristal-kristal baru. Selanjutnya dendrit *equiaxed* yang terbentuk akan tumbuh dan merupakan awal terbentuknya butir. Dari kedua struktur yang hadir selama proses pengecoran, struktur *equiaxed* merupakan struktur yang diharapkan untuk hadir, karena dapat menghasilkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan, bila dibandingkan dengan struktur *columnar* yang dapat menurunkan sifat mekanis.

2.8 Penghalusan Butir

Pengontrolan terhadap ukuran dan bentuk butir sangat memegang peranan penting dalam menentukan sifat dari material coran. Bentuk dan ukuran butir dipengaruhi oleh temperatur tuang logam, gradien temperatur antara cetakan dan logam cair, komposisi kimia logam cair dan kecepatan pembekuan serta konsentrasi dari efektifitas inti saat pembekuan^[1]. Salah satu cara pengontrolan ukuran butir yaitu melalui mekanisme penghalus butir. Penghalusan butir merupakan suatu proses penghalusan butir, sehingga diperoleh ukuran butir yang lebih kecil, halus dan homogen melalui pepaduan unsur penghalus butir pada saat proses pengecoran logam^[7].



Gambar 2.13 Mikrostruktur dari efek penambahan penghalus butir pada aluminium: (a) sebelum penambahan dan (b) setelah penambahan^[39].

Penghalus butir yang biasa digunakan berupa *master alloys* yang mengandung titanium atau gabungan antara titanium dan boron. Titanium dapat dengan sendirinya berfungsi sebagai penghalus butir, namun hasil yang diperoleh tidaklah maksimal, oleh karena itu dibutuhkan kehadiran boron untuk membuat titanium menjadi lebih efektif. Penghalus butir dapat dijumpai dalam bentuk serbuk dan batang (*rod*). Konsentrasi titanium pada aluminium-titanium sebagai penghalus butir berkisar antara 0.05-0.15% Ti, 0.04 % boron, atau penggabungan antara keduanya dengan kadar masing-masing berkisar antara 0.01-0.08 % Ti dan 0.003% boron. Namun, pada hipereutektik silikon persentase kadar boron yang

digunakan lebih tinggi yaitu berkisar antara 0.003-0.008 % boron, seperti pada saat pembuatan piston^[7].

2.8.1 Mekanisme Penghalusan Butir

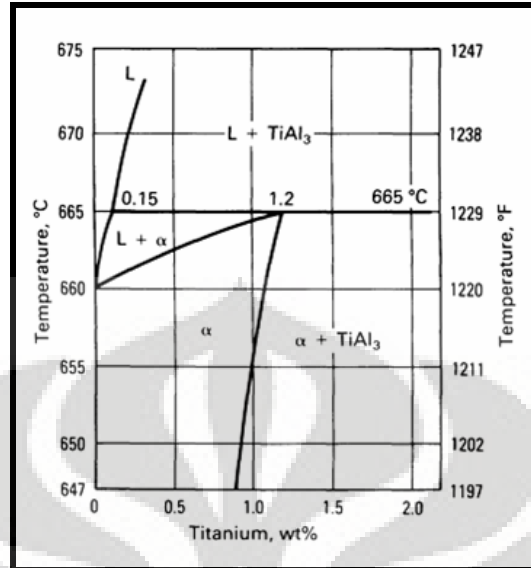
Secara umum mekanisme penghalusan butir adalah dengan mempercepat laju nukleasi dan menghambat pertumbuhan kristal sehingga didapat butir yang kecil dan banyak. Mekanisme ini dapat berlangsung akibat reaksi yang ditimbulkan akibat penginkulasian *nucleating agent* seperti Titanium (Ti) dan Boron (B).

Proses penghalusan butir ini bermula dari proses pengintian, dimana *nucleating agent* yang telah ditambahkan pada aluminium cair akan membentuk nukleasi (benih) dari titanium borida, titanium karbida, aluminium borida atau senyawa intermetalik kompleks lainnya dalam cairan logam dalam jumlah banyak dan merata. Dengan meningkatnya proses nukleasi inilah yang menyebabkan terbentuknya butir yang halus ketika aluminium cair ini membeku^[7].

Partikel nukleasi memberikan pembentukan kristal Al yang baru dan bertumbuh berhadapan dengan arah tumbuh sehingga mengurangi pertumbuhan kristal *columnar* dari dinding cetakan dan memberikan struktur butir yang halus. Kondisi pertumbuhan butir yang lebih diinginkan dapat diperoleh dengan partikel nukleasi yang juga berkontribusi pada reaksi peritektik yang terjadi pada temperatur 665 °C dengan kehadiran 0.15 % Ti, dengan reaksi :



seperti pada Gambar 2.14.

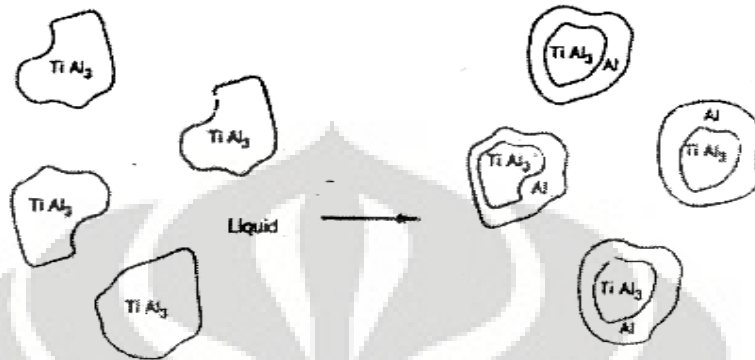


Gambar 2.14 Diagram Fasa Al-Ti^[4].

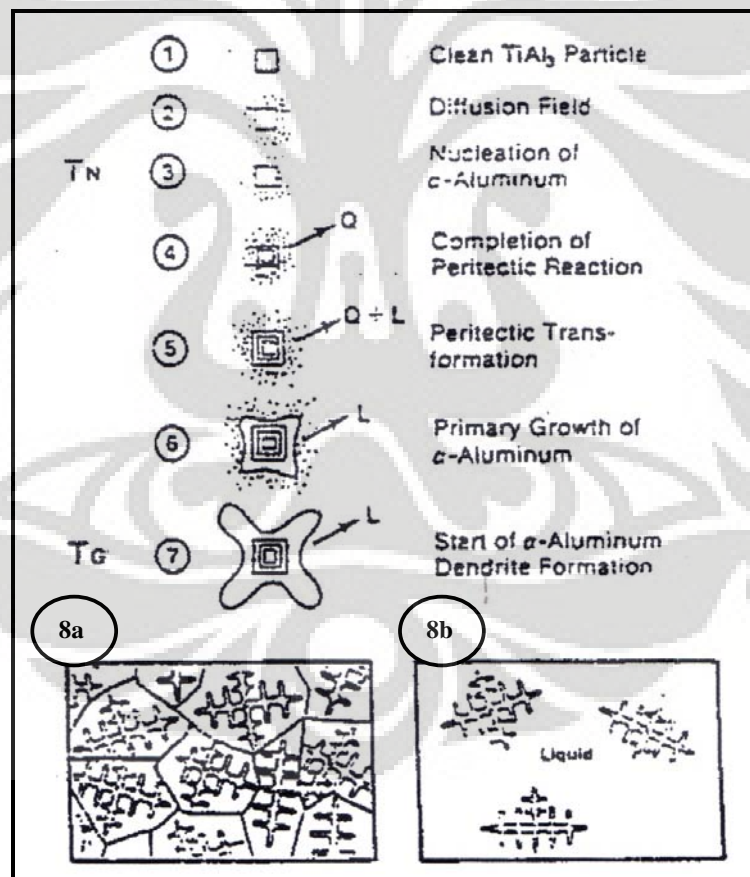
Reaksi yang terjadi berupa reaksi eksotermik, dimana panas dibebaskan sebagai akibat dari reaksi peritektik. Pembentukan *solid solution* yang baru akan menutupi partikel TiAl₃ yang akan memberikan nukleasi dimana butir akan tumbuh (Gambar 2.15).

Proses pembekuan dan pertumbuhan kristal bermula dari larutnya partikel TiAl₃ yang menyebabkan konsentrasi Ti dalam aluminium cair akan meningkat di sekitar partikel. Proses selanjutnya atau tahap-3, yaitu dimulainya reaksi peritektik, berlangsung jika komposisi peritektik dan temperatur nukleasi (T_n) dicapai sehingga terjadi nukleasi dari solid Al pada permukaan partikel. Solid kristal dari α -aluminium akan tumbuh (tahap 4) sampai reaksi peritektik selesai dimana pertumbuhan akan terhenti sehingga partikel menjadi *non* aktif sampai temperatur pertumbuhan (T_g) dicapai. Pada keadaan ini panas akan dilepaskan. Pada tahap 5 dan 6 adalah pertumbuhan yang lambat dari α -aluminium layer pada kristal. Ketika logam cair mengalami pendinginan (pada temperatur pertumbuhan/ T_g), nukleus akan tumbuh membentuk cabang-cabang dendrit. Ketika temperatur turun, maka ruang dendritik diisi dan membeku. Densitas yang lebih tinggi dari partikel TiAl₃ dengan karakteristik nukleasi yang baik akan menghasilkan butir yang lebih halus seperti yang ditunjukkan pada tahap (8a).

Jika partikel $TiAl_3$ tidak cukup, maka dendrit dapat tumbuh lebih besar seperti yang ditunjukkan pada tahap (8b). Dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 2.16.



Gambar 2.15 Mekanisme terjadinya nukleasi pada sistem Al-Ti^[7].



Gambar 2.16 Skematik nukleasi dan penghalusan butir dari Al dengan peritektik $TiAl_3$ ^[33].

Tabel 2.6 Teori-teori mengenai mekanisme penghalusan butir^[34]

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 ₃ Ti dimana terbentuk pada permukaan partikel TiB ₂
<i>The solute Paradigm</i> Mekanisme <i>undercooling-driven</i>	borida (atau partikel lain)

Dari Tabel 2.6 terlihat bahwa terdapat beberapa mekanisme pembentukan inti yang mungkin terjadi dalam proses penghalusan butir yang menggunakan unsur penghalus butir. Teori yang dijelaskan diawal merupakan teori reaksi peritektik. Namun, teori yang terakhir hadir guna melengkapi dan menyempurnakan teori sebelumnya yaitu teori paradigma unsur terlarut oleh M. Johnsson^[34]. Teori ini menjelaskan bahwa hadirnya elemen terlarut sangat memegang peranan penting dalam proses penghalusan butir, yang dikarenakan oleh 2 hal, yaitu :

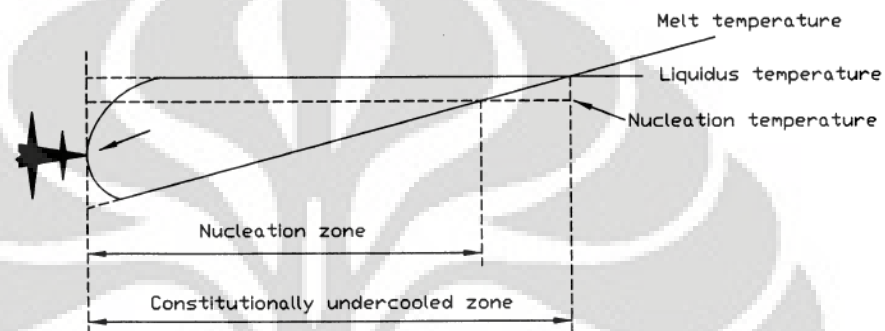
- 1) Unsur-unsur terlarut tersebut mampu membatasi laju dari pertumbuhan butir sehingga akan memberikan waktu pembentukan inti untuk terjadi, terutama apabila pengintian yang terjadi secara spontan dan tidak terarah. Kemampuan suatu elemen untuk membatasi laju pertumbuhan butir yang juga disebut kemampuan segregasi dari elemen ini dihitung melalui besarnya faktor pembatasan pertumbuhan (GRF) selama pembekuan. GRF dapat dihitung dengan menggunakan rumus^[34]:

$$GRF = m \cdot C_o \cdot (k-1) \dots\dots\dots (2.4)$$

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

- 2) Terciptanya zona *undercooled* mendatar di depan daerah antarmuka pertumbuhan butir akibatnya kemampuan segregasi yang dimiliki unsur

terlarut. Zona *undercooled* mendasar tersebut mengaktifkan partikel pembentuk inti lain di depan daerah antarmuka pertumbuhan butir, yang dapat mengganggu pertumbuhan dari butir tersebut sehingga memberikan waktu kepada butir lain untuk tumbuh. Gambar 2.17 memperlihatkan adanya zona *undercooled* mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dimana pertumbuhan butir baru dapat terjadi dengan adanya unsur-unsur terlarut.



Gambar 2.17 Zona *undercooled* mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit^[34].

Tabel 2.7 Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut pada aluminium^[34]

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	~ 0.1	peritektik
Hf	2.4	8	11.2	~ 0.5	peritektik
Mo	2.5	5	7.5	~ 0.1	peritektik
Zr	2.5	4.5	6.8	~ 0.11	peritektik
Nb	1.5	13.3	6.6	~ 0.15	peritektik
Si	0.11	-6.6	5.9	~ 12.6	eutektik
Cr	2	3.5	3.5	~ 0.4	peritektik
Ni	0.01	-3.3	3.3	~ 6	eutektik
Mg	0.51	-6.2	3	~ 3.4	eutektik
Fe	0.02	-3	2.9	~ 1.8	eutektik
Cu	0.17	-3.4	2.8	~ 33.2	eutektik
Mn	0.94	-1.6	0.1	~ 1.9	eutektik

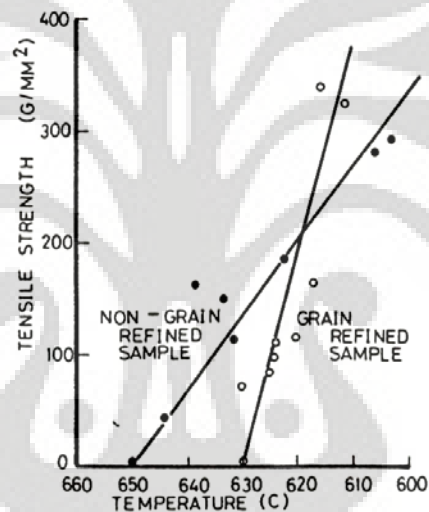
Dalam proses penghalusan butir menggunakan penghalus butir, TiB_2 dan $TiAl_3$ merupakan partikel pembentuk inti yang efektif. $TiAl_3$ tidak akan terbentuk jika tidak ada unsur-unsur terlarut seperti titanium dalam jumlah berlebih. TiB_2 juga tidak akan efektif sebagai penghalus butir jika tidak ada unsur-unsur terlarut

yang mampu menghambat pertumbuhan butir. Adapun kemampuan segregasi dari unsur-unsur terlarut pada aluminium cair dapat terlihat pada Tabel 2.7.

2.8.2 Pengaruh Penambahan Penghalus Butir pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B

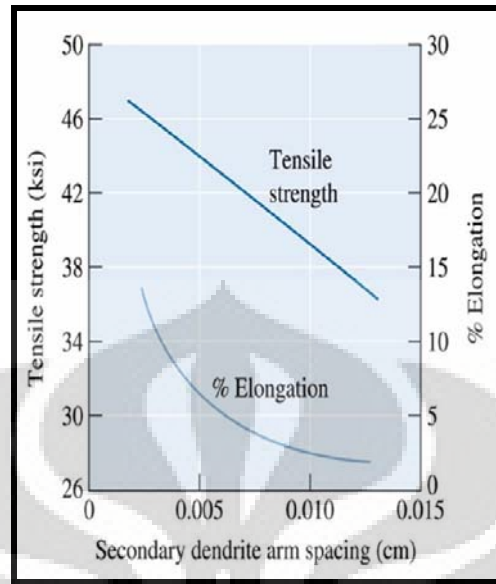
Pengaruh penambahan penghalus butir pada paduan aluminium tuang adalah sebagai berikut :

- 1) Meningkatkan sifat mekanis material seiring dengan semakin halusnya ukuran butir, terutama berdampak pada peningkatan *tensile strength* dan *Elongasi*, yang terlihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Perbandingan *hot tensile strength* sampel *grain refined* dan *non-grain refined* pada paduan Al-0.5%Mg-0.4%Si^[22].

- 2) Memperkecil *secondary dendrite arm spacing* (SDAS) yang dikarenakan laju pembekuan yang semakin cepat akibat dari penambahan penghalus butir. Semakin kecil DAS, maka nilai kekuatannya semakin meningkat dan elongasinya juga bertambah besar (Gambar 2.19).



Gambar 2.19 Pengaruh nilai SDAS terhadap sifat mekanis pada paduan aluminium tuang^[15].

3) Pendistribusian porositas yang secara merata

Dalam proses pengecoran logam aluminium paduan, pada saat pembekuan akan terdapat lubang pori, keberadaan porositas ini tidak dapat dihilangkan. Namun, tindakan yang dapat dilakukan hanyalah mengontrol pertumbuhan dan pendistribusiannya dalam logam aluminium paduan. Dengan hadirnya penghalus butir, akan berdampak kepada pengecilan ukuran lubang pori dan pemerataan distribusinya di dalam logam aluminium paduan. Logam yang tidak diberikan penghalus butir cenderung membeku dengan daerah yang mempunyai konsentrasi porositas yang tinggi.

4) Meningkatkan kemampuan cor (*castability*) dan kemampuan permesinan (*machinability*), karena dengan semakin kecilnya ukuran butir menyebabkan dendrit yang terbentuk selama proses pengecoran semakin halus, sehingga cacat cor akan terminimalisir. Seperti kecenderungan *hot tearing* berkurang, penyusutan (*shrinkage*) berkurang, dan porositas terdistribusi secara merata^[4].

5) Meningkatkan kemampuan *feeding*, mekanisme *feeding* berkaitan dengan ukuran butir dan dendrit. Dengan penambahan penghalus butir maka ukuran dendrit akan lebih halus, butir *equiaxed* akan mudah berpindah selama proses pengecoran sehingga *feeding* dapat terjadi^[7].

- 6) Produk hasil pengecoran akan memiliki sifat yang stabil setelah diberikan perlakuan panas, karena dengan butir paduan yang halus dan terdistribusi secara merata mengakibatkan sifat kimia yang dimilikinya menjadi stabil walaupun diberikan perlakuan panas.
- 7) Perlakuan akhir permukaan seperti *anodizing coatings* menjadi lebih mudah karena struktur butir yang lebih halus.

2.8.3 Efek Pemudaran Penghalus Butir

Pemudaran merupakan kejadian dimana penghalus butir kehilangan kemampuannya setelah beberapa waktu atau dengan kata lain pengaruh yang dihasilkan akibat penambahan penghalus butir tidak akan menghasilkan apa-apa seiring dengan berjalanya waktu^[17]. Penyebab utama terjadinya mekanisme pemudaran diantaranya^[18]:

1) Pengendapan (*settling*)

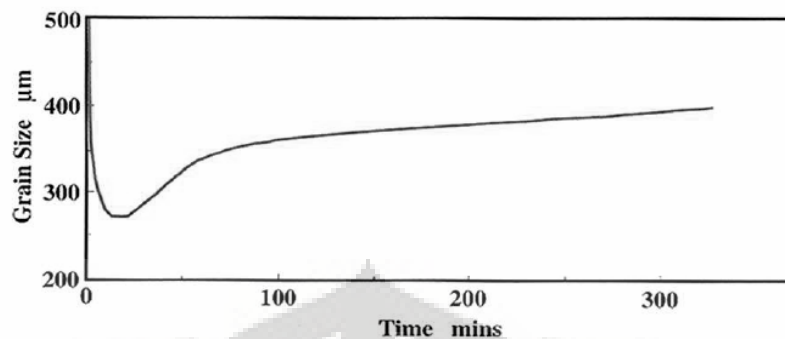
Pengendapan bisa terjadi pada logam cair yang tidak mengalami pengadukan secara terus menerus, sehingga menyebabkan TiB_2 dan $TiAl_3$ yang berperan sebagai penghalus butir mudah mengalami pengendapan pada aluminium cair. Hal ini dikarenakan TiB_2 dan $TiAl_3$ ini memiliki berat jenis yang lebih besar bila dibandingkan dengan aluminium cair. Masing-masing memiliki berat jenis 4.5 g/cm^3 dan 3.35 g/cm^3 , sedangkan aluminium cair hanya memiliki berat jenis 2.7 g/cm^3 ^[29].

2) Penggumpalan (*agglomeration*)

Proses penggumpalan terjadi karena keberadaan partikel-partikel borida, karena sifatnya yang dapat dengan mudah mengalami penggumpalan yang menyebabkan densitasnya meningkat dan akhirnya mengendap lebih cepat ke dasar *furnace*.

3) pencemaran (*poisoning*).

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



Gambar 2.20 Pemudaran penghalus butir pada paduan aluminium^[17].

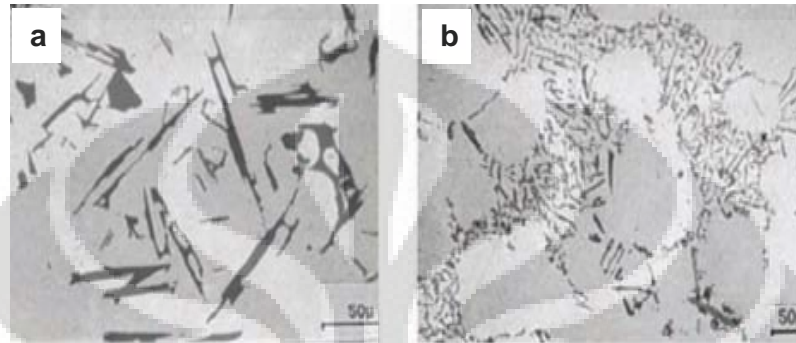
Mekanisme pemudaran dalam proses penghalus butir pada aluminium cair sangat perlu diperhatikan, dengan cara menemukan waktu kontak keefektifan yang paling tinggi (*critical contact time*) penghalus butir dengan logam cair. Jika waktu kontak terlalu singkat, maka ukuran butir yang halus sulit untuk dicapai, dan jika waktu kontak terlalu lama, keefektifan penghalus butir juga semakin turun. Keefektifan dari $TiAl_3$ and TiB_2 sebagai penghalus butir hanya dapat terlihat pada waktu 20 menit awal setelah pencampuran, seperti yang terlihat pada Gambar 2.20^[17].

Oleh karena itu, untuk menghindari mekanisme pemudaran, perlu dilakukan pengadukan pada aluminium cair secara berkala agar partikel-partikel tersebut dapat kembali merata ke seluruh aluminium cair dan dapat bertindak sebagai nukleat^[17].

2.9 Modifikasi Paduan Aluminium-Silikon AC4B dengan Penambahan Stronsium

Paduan aluminium-silikon AC4B tergolong jenis hipoeutektik silikon yang dapat dimodifikasi menggunakan unsur sodium (Na) atau stronsium (Sr). Namun, kali ini yang digunakan sebagai unsur modifikasi ialah unsur stronsium. Unsur stronsium bisa ditambahkan ke dalam paduan aluminium-silikon baik sebagai logam murni maupun dalam bentuk *master alloy*. Penggunaan stronsium sebagai unsur modifikasi lebih banyak digunakan dalam bentuk *master alloy*, dimana sejak 1975 telah dikenal aluminium *master alloy* 10 % Sr dan 14 % Sr^[7]. Jenis-jenis modifikasi Sryang biasa digunakan pada aluminium paduan disajikan

pada Tabel 2.8. Penggunaan Sr sebagai unsur modifikasi bertujuan untuk merubah bentuk silikon eutektik dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*, dapat terlihat pada Gambar 2.21. Perubahan bentuk ini menyebabkan perubahan sifat mekanis paduan aluminium tuang^[7].



Gambar 2.21 Mikrostruktur aluminium-silikon, (a) belum termodifikasi, (b) telah termodifikasi^[39].

Pada awal penggunaannya, persentase stronsium yang harus ditambahkan sebagai unsur modifikasi pada paduan Aluminium-Silikon hipoeutektik masih dalam presentase yang cukup besar yaitu berkisar antara 0.07 - 0.08 wt % namun, seiring dengan penelitian selanjutnya diperoleh hasil bahwa penambahan stronsium dalam jumlah kecil sudah mencukupi untuk memberikan dampak terhadap aluminium cair yaitu berkisar pada 0.01 - 0.02 wt %^[7].

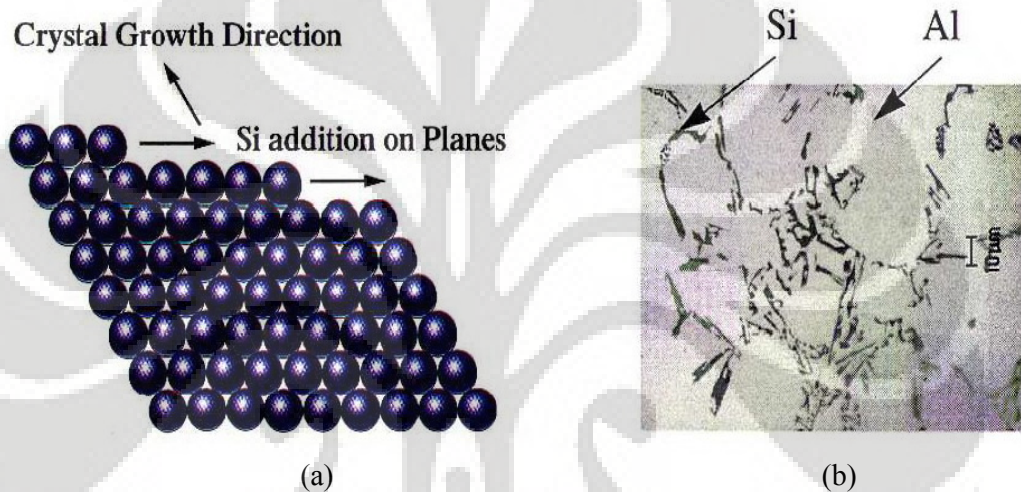
Dalam proses modifikasi menggunakan Sr perlu diperhatikan akan kehadiran unsur klorin dan fluorin yang merupakan unsur utama bahan *flux*, akan mengganggu efek modifikasi yang akan terjadi, sehingga sebelum dilakukan perlakuan modifikasi dengan stronsium sangat dianjurkan untuk melakukan metode *fluxing* dengan *dry nitrogen* atau gas argon^[7].

Tabel 2.8 Bentuk dan komposisi unsur modifikasi stronsium^[7]

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

2.9.1 Mekanisme Modifikasi Paduan Aluminium-Silikon AC4B

Pada proses pembekuan aluminium-silikon, kristal silikon memiliki perilaku yang khusus dimana kristal silikon hanya memiliki arah kristalografi tertentu dalam pertumbuhannya. Dapat terlihat pada Gambar 2.22, dimana penambahan atom silikon akan berbeda arah dengan bidang tumbuhnya, sehingga pada paduan yang tidak dimodifikasi akan terlihat kristal yang berbetuk pelat tajam yang biasa disebut *accicular*^[16].

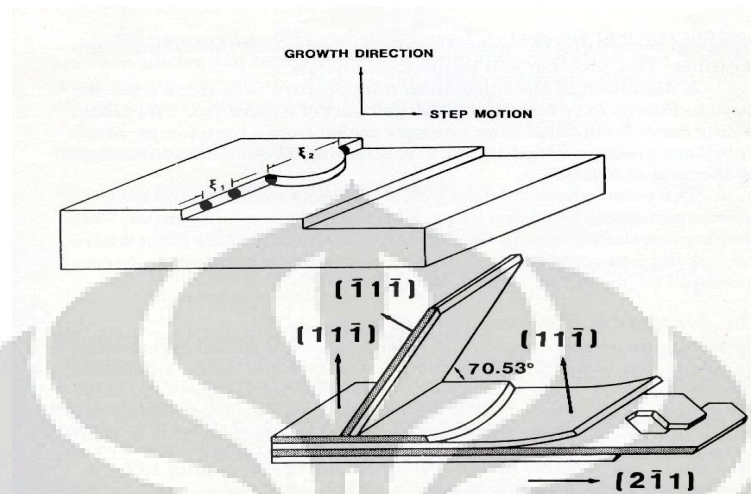


Gambar 2.22 Pertumbuhan dan pembentukan silikon *accicular*; (a) pertumbuhan silikon, (b) silikon *accicular*^[16].

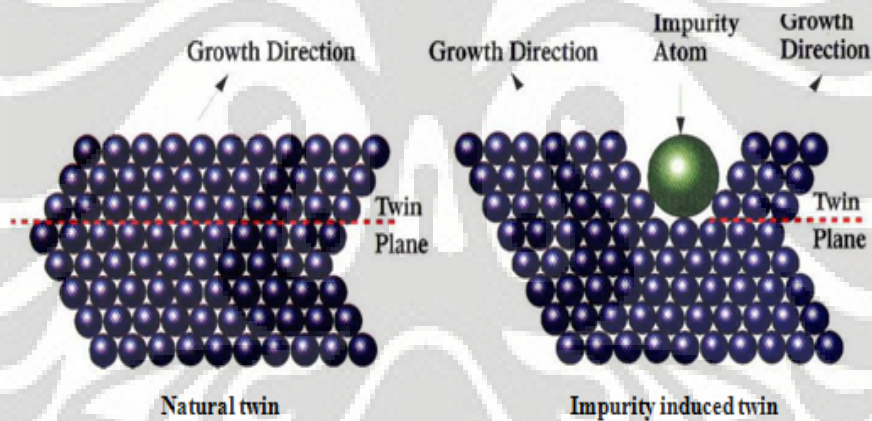
Pada kristal silikon bidang kembar (*twinning*) sangat mudah untuk terbentuk. Bidang ini merupakan salah satu bentuk cacat kristalografi yang dapat terbentuk pada saat sekumpulan atom silikon mengalami pergeseran posisi melewati suatu bidang kristalografi^[5].

Proses pembekuan pada aluminium-silikon, dapat diilustrasikan seperti bentuk anak tangga, dimana terjadi penambahan atom pada antar muka *solid-liquid* yang berlangsung pada setiap arah pertumbuhannya^[5]. Akibat dari fenomena ini, maka kemungkinan terjadinya cabang pada struktur kristal silikon sangatlah kecil. Pada saat penambahan unsur modifikasi, dihasilkan struktur kristalografi dengan jumlah bidang kembar (*twinning*) yang lebih banyak dari pada tanpa penambahan unsur modifikasi. Mekanisme modifikasi ini biasa disebut sebagai *impurity induced twinning*, dimana dengan adanya elemen modifikasi

akan menyebabkan proses pertumbuhan kristal silikon terganggu sehingga menyebabkan *twinning* (Gambar 2.23).



Gambar 2.23 Adsorpsi atom *impurities* pada tahapan pertumbuhan kristal silikon yang menyebabkan terjadinya mekanisme *twinning*^[5].

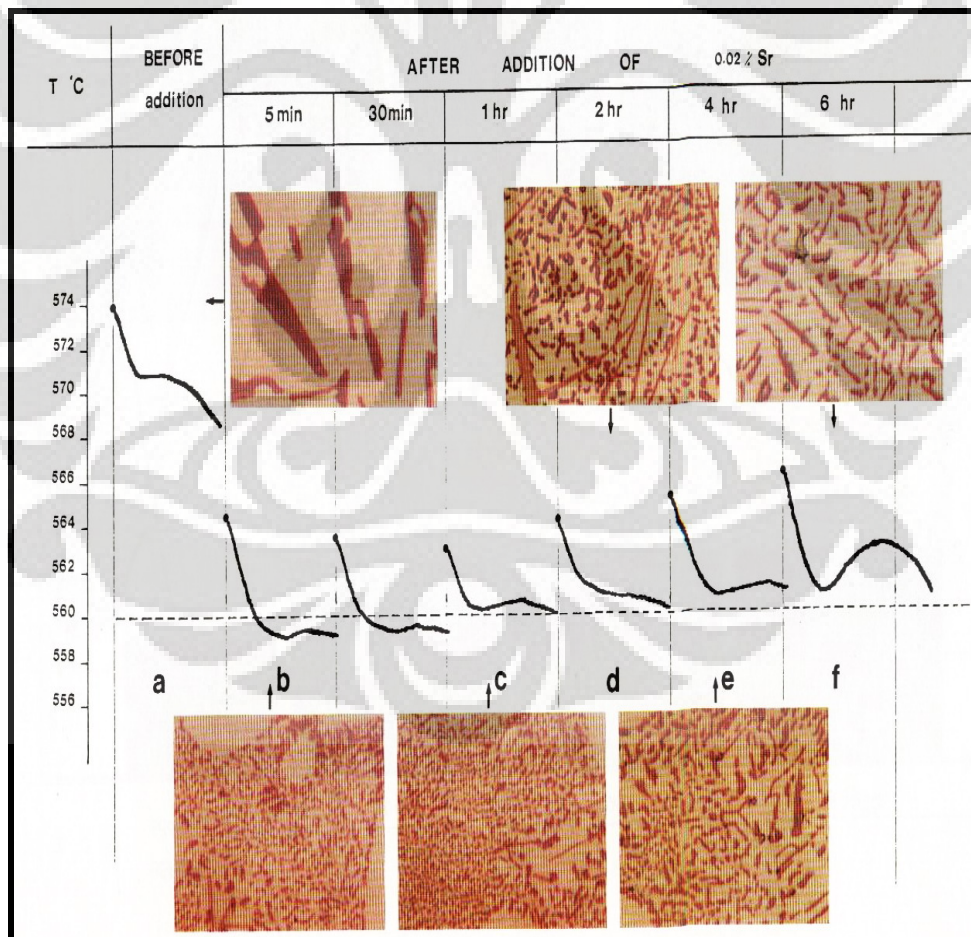


Gambar 2.24 Formasi bidang kembar (*twin*) pada silikon^[16].

Dengan semakin banyak terjadinya *twinning* akan menyebabkan terbentuknya banyak cabang pada kristal yang akan menghasilkan mikrostruktur *fibrous* silikon dari paduan yang dimodifikasi, hal ini akan menyebabkan terjadinya perubahan struktur silikon bila dibandingkan dengan struktur silikon yang tidak mengalami modifikasi. Pada Gambar 2.24 terlihat penambahan *impurities* yang merupakan unsur modifikasi pada paduan. Ukuran dari atom *impurities* akan menjadi faktor yang menentukan apakah akan terjadi *twinning*^[16].

Unsur yang menjadi modifikasi harus memiliki afinitas dan persenyawaan dengan silikon. Hal ini bertujuan untuk mempermudah adsorpsi unsur modifikasi pada permukaan krsital silikon. Selain mempengaruhi tahapan pertumbuhan kristal silikon, unsur modifikasi juga menurunkan temperatur nukleasi dan temperatur dari silikon^[5]. Penambahan stronsium juga akan mempengaruhi temperatur solidifikasi eutektik seperti pada Gambar 2.25 dan dapat diketahui :

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



Gambar 2.25 Diagram solidifikasi paduan Al-Si dengan penambahan 0.02wt % Sr^[5].

2.9.2 Modifikasi yang Berlebih

Modifikasi yang berlebih/*Over modifikasi* merupakan peristiwa penambahan unsur modifikasi yang dalam hal ini Sr dalam jumlah atau presentase yang berlebih. Terdapat 2 fenomena yang timbul akibat dari over modifikasi^[4], yaitu:

1. Struktur silikon yang tadinya berbetuk *fibrous* sebagai akibat mengalami modifikasi, tetapi dengan terjadinya over modifikasi struktur silikon akan kembali kebentuk *acicular* atau berbentuk jarum yang kasar.
2. Terbentuknya fasa intermetalik, yang menyebabkan tumbuhnya silikon primer kasar dan saling berhubungan.

2.9.3 Pemudaran Unsur Modifikasi

Pemudaran unsur modifikasi merupakan mekanisme pemudaran efek yang ditimbulkan oleh elemen modifikasi seiring dengan berjalannya waktu. Terdapat 2 tipe reaksi kimia pada logam cair yang dapat menyebabkan terjadinya fenomena pemudaran, diantaranya unsur modifikasi akan mengalami penguapan karena tekanan pada aluminium cair yang tinggi serta karena unsur modifikasi ini teroksidasi^[4]. Setelah mekanisme pemudaran terjadi, unsur modifikasi yang ditambahkan masih berada di dalam aluminium namun, dalam bentuk persenyawaan.

Mekanisme pemudaran stronsium berbeda dengan sodium, dimana penyebab utama pemudaran dari stronsium dikarena proses oksidasi. Stronsium memiliki waktu pemudaran yang lebih lama bila dibandingkan dengan sodium. Ketika penambahan stronsium mencapai konsentrasi 0.025 %, mekanisme pemudaran akan terjadi setelah 9 jam. Sedangkan dengan memperkecil konsentrasi unsur modifikasi hingga 0.003 %, mekanisme pemudaran akan terjadi lebih lama lagi sekitar 16 jam^[4].

2.9.4 Pengaruh Modifikasi pada Paduan Aluminium-Silikon AC4B

Proses modifikasi terhadap morfologi kristal silikon paduan aluminium-silikon AC4B akan memberikan pengaruh kepada karakteristik dari paduan. Adapun pengaruh yang terjadi akibat penambahan unsur modifikasi pada paduan aluminium-silikon, yaitu:

1) Pengaruh modifikasi terhadap struktur mikro

Penambahan unsur modifikasi akan berdampak terhadap perubahan mikrostruktur, dari bentuk *acicular* ke bentuk *fibrous*. Terdapat 5 variabel yang menentukan struktur mikro akhir yang terbentuk dari paduan Aluminium-Silikon akibat proses modifikasi, yaitu^[5]:

1. Jenis unsur modifikasi

Dari beberapa jenis unsur modifikasi, sodium lebih memberikan pengaruh yang baik, yang dapat menghasilkan mikrostruktur yang termodifikasi secara merata pada konsentrasi yang lebih rendah dibandingkan dengan stronsium.

2. Keberadaan pengotor atau impuritis pada logam cair

Keberadaan impuritis akan berpengaruh terhadap jalannya proses pemodifikasian, semakin banyak impuritis semakin sulit proses modifikasi dan sebaliknya. Jenis impuritis yang mengganggu proses modifikasi adalah unsur fosfor dan antimoni. antimoni merupakan impuriti yang dapat berinteraksi dengan stronsium yang menimbulkan dampak yang buruk. Namun, mekanisme pengaruh interaksi antara impuriti dengan unsur modifikasi masih belum diketahui.

3. Jumlah unsur modifikasi

Secara umum, semakin tinggi konsentrasi unsur modifikasi akan menyebabkan struktur mikro yang semakin termodifikasi. Tetapi berdasarkan penelitian yang dilakukan dewasa ini, dengan penambahan dalam konsentrasi yang rendah unsur modifikasi telah mampu berperan dengan baik. Dalam hal ini terlihat pada jumlah unsur modifikasi Sr yang efektif adalah antara 0.01-0.02 wt%^[5].

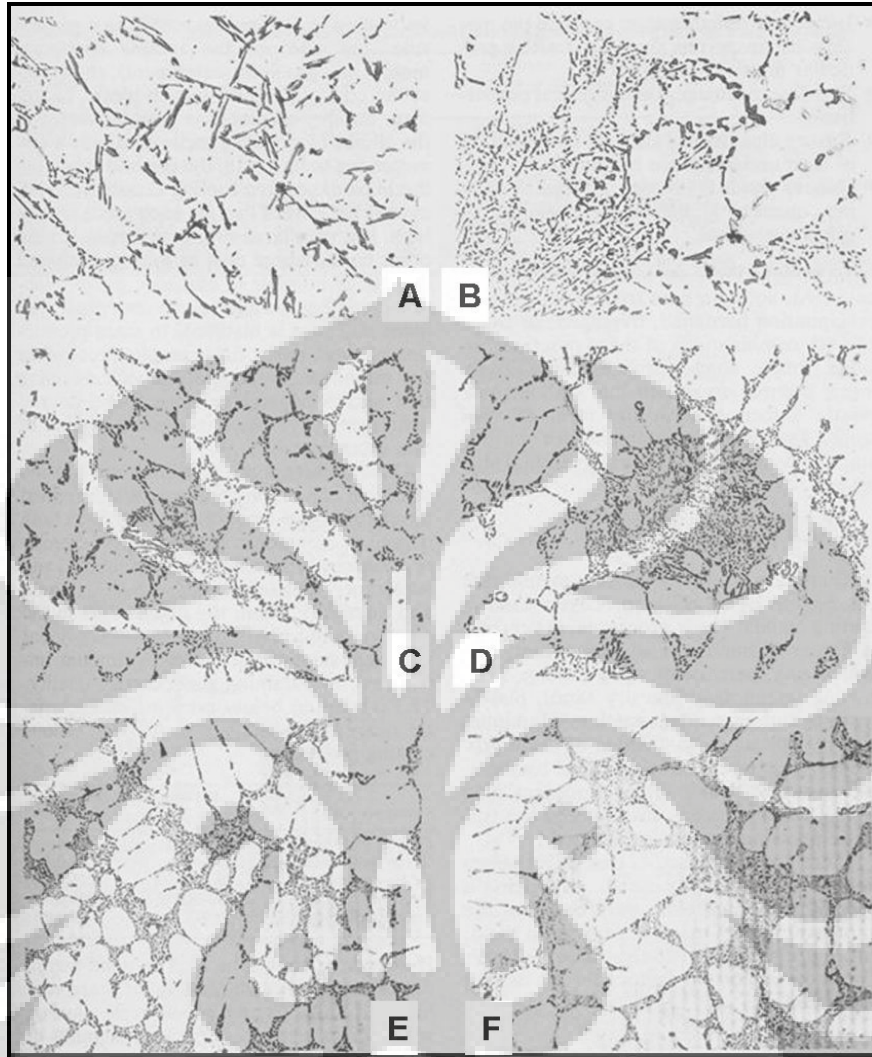
4. Kecepatan pembekuan

Semakin cepat proses pembekuan akan sangat membantu dalam proses modifikasi, dimana struktur mikro yang termodifikasi akan semakin halus. Keterkaitan antara kecepatan pembekuan terhadap persentasi kadar stronsium, dimana semakin cepat proses pembekuan persentasi stronsium yang dibutuhkan semakin banyak.

5. Kandungan silikon

Semakin besar kandungan silikon dalam paduan, maka dibutuhkan persentase unsur modifikasi yang juga semakin besar.

Penampakan mikrostruktur hasil modifikasi pada silikon yang mungkin terjadi pada paduan hipoeutektik diperlihatkan pada Gambar 2.26. Struktur ini dibagi menjadi 6 kelas, dimulai dari kelas A dimana tidak mengalami modifikasi hingga kelas E yang memiliki struktur yang termodifikasi paling baik. Sedangkan kelas F merupakan struktur yang sangat halus (*supermodified*)^[5].



Gambar 2.26 Perubahan mikrostruktur silikon karena proses modifikasi^[1]

2) Pengaruh modifikasi terhadap sifat mekanis

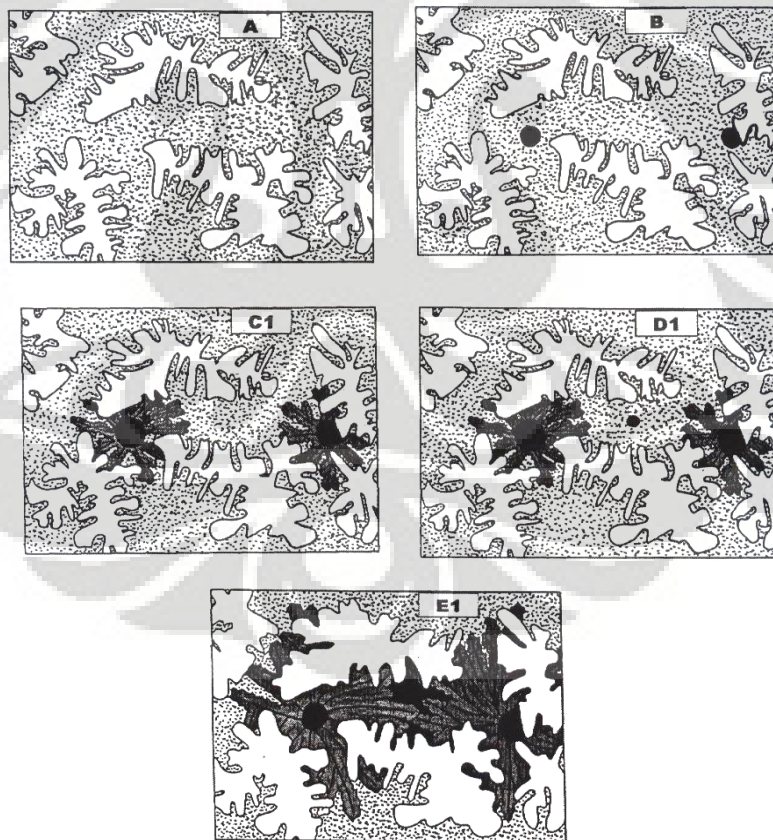
Perubahan struktur kristal silikon akibat proses modifikasi, akan berdampak terhadap sifat mekanik dari paduan. Perubahan dari struktur *acicular* menjadi struktur *fibrous* yang halus, berdampak terhadap peningkatan nilai UTS dan keuletan dari paduan aluminium-silikon^[12]. Secara teoritis, penambahan stronsium yang dapat mengubah struktur mikro menjadi lebih halus akan meningkatkan nilai kekerasan dari aluminium paduan^[19]. Namun, pada beberapa literatur pengaruh unsur modifikasi terhadap nilai kekerasan menunjukkan hal yang sebaliknya. Perbedaan ini dimungkinkan terjadi karena keberadaan porositas yang semakin terdistribusi secara merata^[4], sehingga

Universitas Indonesia

kekerasan pada bagian yang sebelumnya memiliki densitas tinggi menjadi rendah akibat porositas yang ada.

3) Pengaruh modifikasi terhadap Porositas

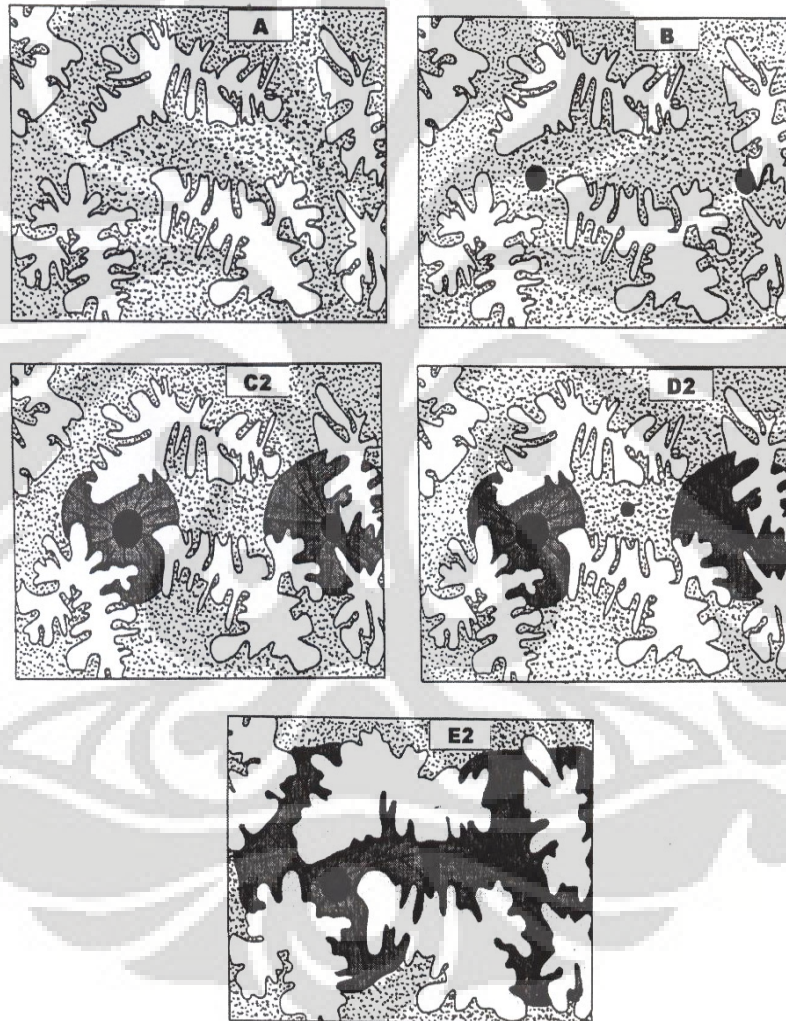
Penambahan stronsium sebagai elemen modifikasi pada paduan aluminium-silikon cenderung dapat meningkatkan persentase porositas, menurunkan densiti dari porositas yang terbentuk (jumlah poros per luas), serta menghasilkan ukuran porositas yang seragam yang dalam hal ini ukurannya menjadi kecil^[20]. Sebelum 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^[21]. Gambar 2.28 menunjukkan modifikasi terhadap porositas. ASM standar mengelompokkan porositas dalam beberapa tingkatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.29.



Gambar 2.27 Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi tanpa penambahan Sr^[21].

Ket :

- A : Kondisi sebelum solidifikasi eutektik (dendrit α -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 2.28 Ilustrasi struktur mikro paduan Al-Si sebagai tahapan solidifikasi dengan penambahan Si^[21].

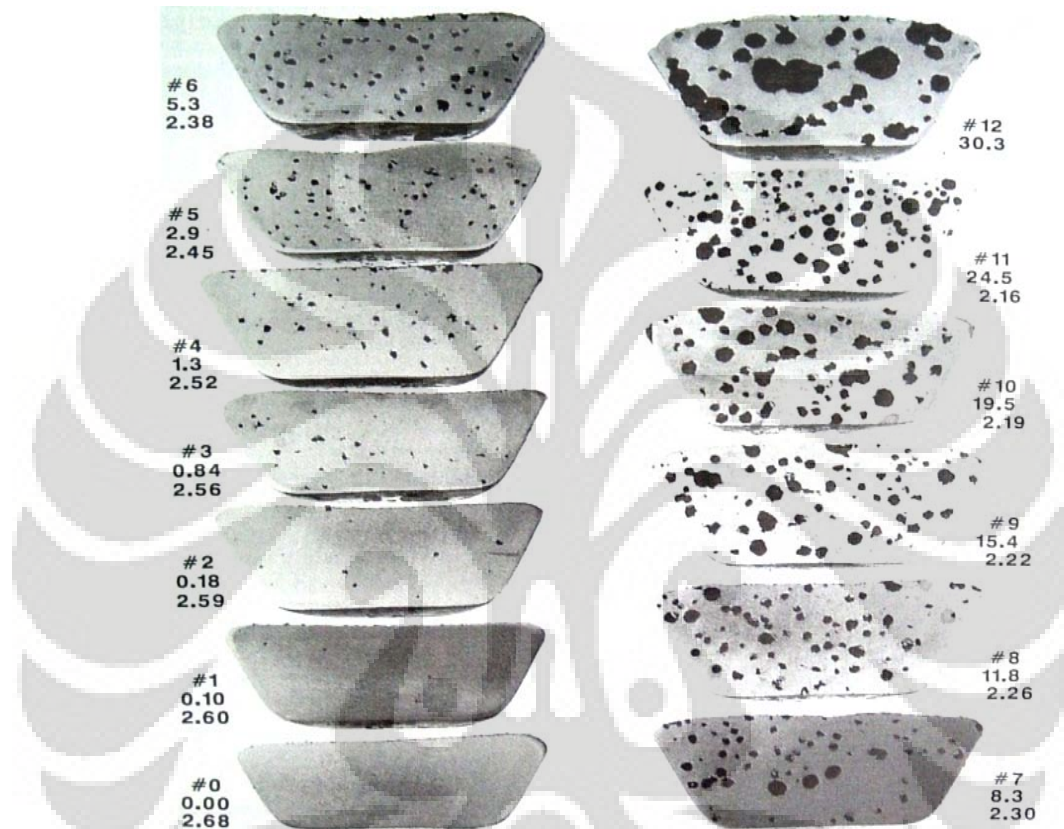
Ket :

- A : Kondisi sebelum solidifikasi eutektik (dendrit α -Al dan *liquid*)
- B : Porositas berbentuk bulat mulai muncul sebelum solidifikasi eutektik

Universitas Indonesia

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 2.29 Perbandingan tingkat porositas^[4].

4) Pengaruh modifikasi terhadap Fluiditas

Fluiditas adalah sifat mampu alir logam cair yang berarti merupakan kemampuan logam cair untuk mengisi rongga-rongga cetakan dalam proses pengecoran logam. Fluiditas berkaitan dengan karakteristik solidifikasi logam cair, pada saat pengecoran logam, aliran logam cair akan berhenti mengalir akibat adanya proses solidifikasi dendrit yang tebal pada bagian ujung aliran sehingga menghambat aliran logam cair dibelakangnya. Fluiditas 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.

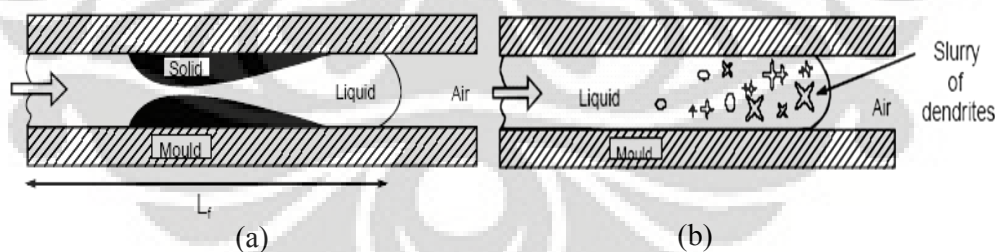
Satuan dalam pengukuran fluiditas berupa ukuran panjang berupa cm atau inch^[23]. Paduan yang memiliki fluiditas yang baik adalah paduan dengan *range* pembekuan pendek, sedangkan paduan dengan *range* pembekuan panjang memiliki fluiditas yang buruk. *Rentang* pembekuan aluminium terlihat pada Gambar 2.30.

1. *Range* pembekuan pendek

Pada aliran logam paduan dengan *range* 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.

2. *Range* pembekuan panjang

Mekanisme solidifikasi aliran pada paduan dengan *range* 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.

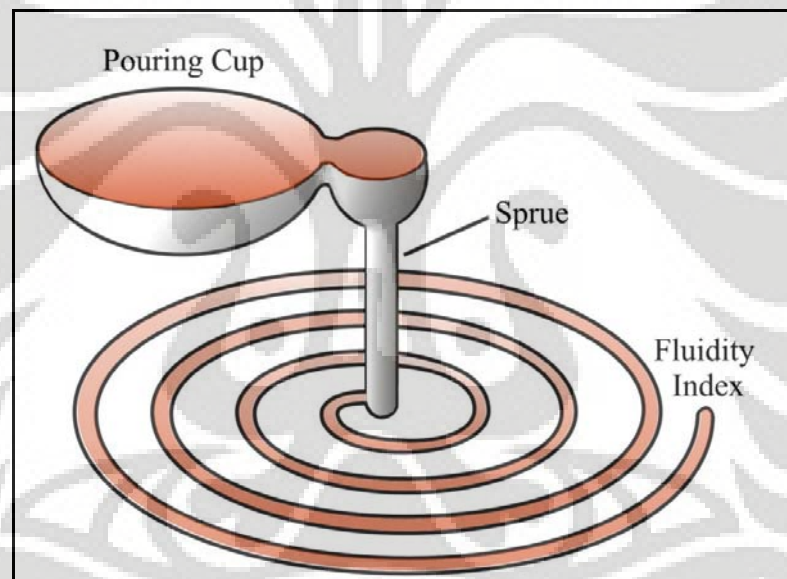


Gambar 2.30 Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi; (a) pada paduan dengan *range* pembekuan pendek dan (b) pada paduan dengan *range* pembekuan panjang^[24].

Penambahan unsur modifikasi stronsium pada paduan aluminium-silikon mampu memperbaiki sifat alir dari logam cair. Stronsium berperan dalam menurunkan temperatur eutektik nukleasi dan temperatur pertumbuhan,

sehingga membuat range pembekuan menjadi lebih pendek sehingga diperoleh peningkatan fluiditas^[5].

Untuk dapat mengetahui kemampuan alir suatu logam cair, maka dilakukan pengujian melalui metode pengujian spiral. Metode pengujian ini didasarkan pada kondisi yang mensimulasikan proses pengecoran logam dan pengukuran fluiditas sebagai total jarak yang dilalui oleh cairan logam dalam sistem saluran tertutup. Ukuran dalam pengujian seperti ini adalah waktu alir (*fluid life*). Namun, metode yang biasa digunakan adalah pengujian fluiditas spiral seperti pada Gambar 2.31. Dari pengujian ini diperoleh indeks fluiditas yang merupakan panjang logam yang membeku dalam saluran spiral. Semakin panjang logam yang membeku, semakin besar nilai fluiditasnya.



Gambar 2.31 Metode pengujian fluiditas dengan menggunakan cetakan spiral.

Secara keseluruhan terdapat dua hal yang mempengaruhi nilai fluiditas dari logam cair, yaitu karakteristik logam cair dan kondisi pengecoran^[25]. 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.

2.10 Penggabungan Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi

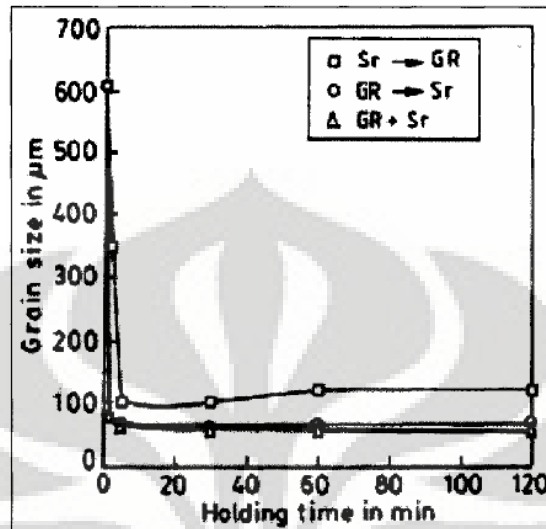
Pemaduan antara penghalus butir dengan unsur modifikasi stronsium berawal dari dampak baik yang dihasilkan oleh masing-masing unsur baik dari maupun stronsium. Penghalus butir dan modifikasi adalah 2 bentuk perlakuan yang dapat digunakan dalam peningkatan sifat dari paduan coran aluminium-silikon. Modifikasi merupakan proses penambahan elemen sodium atau stronsium dengan tujuan merubah struktur morfologi silikon eutektik dari struktur butir *acicular* ke bentuk *fibrous* dan dengan demikian dapat meningkatkan *ductility* paduan. Sedangkan kehadiran penghalus butir melalui penambahan elemen Ti dan B pada paduan aluminium-silikon untuk mempercepat proses nukleasi dengan terjadinya peningkatan nuklei.

2.10.1 Interaksi antara Penghalus Butir dan Unsur Modifikasi

Penggabungan antara penghalus butir dan unsur modifikasi pada pengecoran hipoeutektik paduan aluminium-silikon dari beberapa literatur akan berdampak kepada penurunan *degree of poisoning* pada partikel silicon dengan kadar penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi tertentu. Efek *poisoning* hadir kerana penggabungan stronsium-bromida akibat penambahan unsur modifikasi stronsium. Selanjutnya, dengan penambahan penghalus butir Al-5%Ti-1%B *master alloy* mendekati eutektik aluminium-silikon, keefektifan dari stronsium menjadi berkurang, sehingga hal ini berdampak proses *poisoning* yang terjadi^[28].

Pada suatu penelitian yang dilakukan oleh Liao dan Sun^[28], menghasilkan suatu kesimpulan bahwa pada daerah dekat paduan eutektik, efek penghalusan oleh boron akan melemah yang disebabkan peningkatan jumlah penambahan stronsium. Dengan kata lain, kemampuan penghalusan butir oleh boron terganggu (*poisoning*) akibat hadirnya stronsium yang membentuk SrB_6 . Namun, hal ini masih menjadi perdebatan bagi beberapa peneliti, karena masih terdapat perbedaan hasil pada penelitian lainnya. Interaksi penggabungan penghalus butir dengan unsur modifikasi pada pembekuan aluminium-silikon eutektik dan Al-primer tetap berdampak terhadap perubahan ukuran dan struktur butir α -Al, dimana struktur termodifikasi dengan baik serta halus akan didapat saat

penambahan penghalus butir yang rendah^[29], hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.32.



Gambar 2.32 Perubahan ukuran butir Al-7%Si dengan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi (1.0% dari Al-1%Ti-3%B dan 0.02% Sr)^[28].

2.10.2 Pengaruh Penggabungan Penghalus butir dan Unsur Modifikasi

1) Pengaruh terhadap struktur mikro dan SDAS

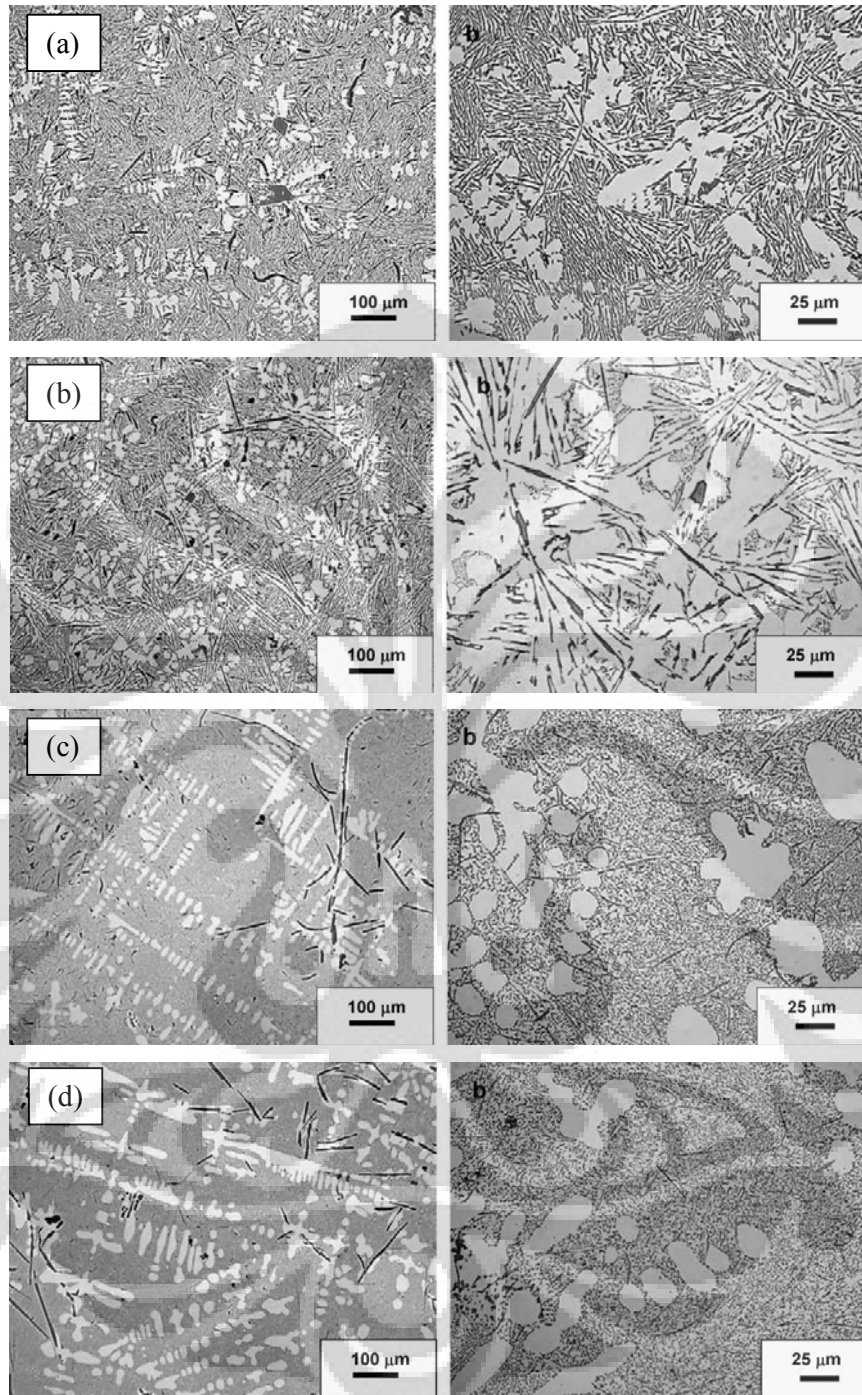
Pada penelitian yang dilakukan oleh Juan Asensio-Lozano *et al.*^[30], terhadap efek penambahan penghalus butir Al-3Ti-1B serta unsur modifikasi Al-10Sr pada paduan Al-12Si. Penambahan *master alloy* Al-3Ti-1B memiliki pengaruh baik pada penghalusan dendrit dari fasa α -Al. Penambahan Ti meningkatkan fraksi volume dari fasa α -Al dan *primary silicon cuboids* serta menghaluskan ukuran butir. Penambahan *master alloy* Al-10Sr akan meningkatkan fraksi volume dari dendrit α -Al primer. Pada Gambar 2.33 diperlihatkan perubahan struktur mikro pada paduan Al-12Si pada keadaan normal, penambahan penghalus butir, penambahan unsur modifikasi, serta penggabungan keduanya. Pada saat penambahan Ti, terjadinya pengurangan struktur *columnar* dan peningkatan struktur *cellular* pada paduan. Dan ketika Ti ditambahkan pada paduan dengan modifikasi Sr akan memberikan efek pada transisi *columnar-cellular* dari struktur butir, meskipun masih terlihat adanya campuran keduanya.

Efek terhadap *Secondary Dendrite Arm Spacing* (SDAS), dapat kita ketahui melalui penelitian yang dilakukan oleh A.K Prasada Rao *et al.*^[31],

terhadap paduan Al-7Si dengan kombinasi penambahan penghalus butir, modifikasi, serta penggabungan keduanya. Hasil penelitian tersebut menjelaskan dengan penggabungan nilai SDAS akan mengalami penurunan, yang dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Pengaruh penambahan penghalus butir dan/atau unsur modifikasi terhadap SDAS Al-7Si^[31]

Penambahan pada Al-7Si		SDAS
<i>grain refiner</i>	<i>modifier</i>	
-	-	60 μm
Al-1Ti-3B	-	24 μm
-	0,02%Sr	51 μm
Al-1Ti-3B	0,02%Sr	22 μm

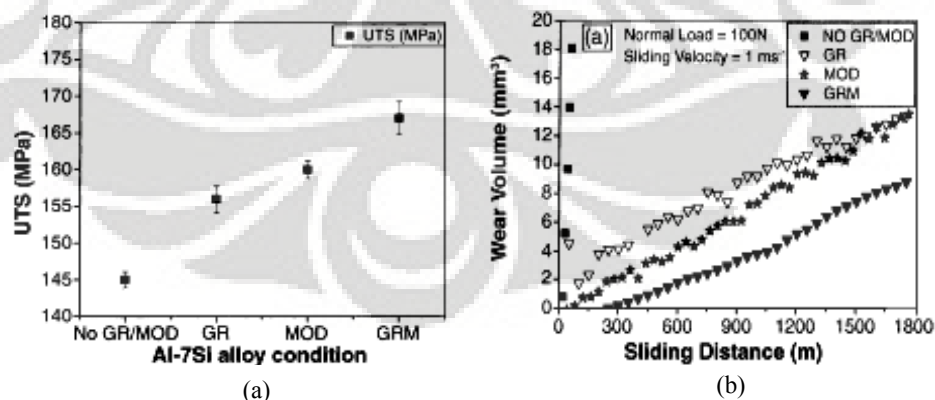


Gambar 2.33 Mikrostruktur dari paduan Al-12Si; (a) tanpa penambahan apapun, (b) mengandung 0.03 wt.%Ti, (c) mengandung 0.04 wt.%Sr, (d) dengan penambahan 0.03 wt.%Ti dan 0.05 wt.%Sr^[30].

2) Pengaruh Terhadap Sifat Mekanis

Peningkatan sifat mekanis yang terjadi berhubungan dengan struktur mikro yang terjadi dimana dengan kombinasi penghalus butir dan unsur modifikasi membuat pembentukan dendrit dan silikon eutektik yang halus melalui kedua perlakuan tersebut. Penelitian yang dilakukan A.K Prasada Rao *et al*^[31], mengenai pengaruh penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi pada paduan Al-7Si memperlihatkan peningkatan terhadap kekuatan tarik, dimana terjadi peningkatan nilai UTS yang cukup signifikan. Hali ini dapat di lihat pada Gambar 2.34 (a), yang menggambarkan paduan dengan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi memiliki nilai UTS yang paling tinggi.

Pada penitian tersebut juga didapatkan bahwa dengan penggabungan kedua unsur ini juga berdampak terhadap nilai keausan paduan Al-7Si, dimana wear volume pada specimen dengan penggabungan penghalus butir dan unsur modifikasi memiliki nilai yang paling rendah bila dibandingkan dengan paduan aluminium yang tanpa perlakuan, dengan penambahan penghalus butir saja, ataupun dengan penambahan unsur modifikasi saja. Dengan kata lain, penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi memiliki ketahanan aus yang paling tinggi dibandingkan dengan yang lainnya, seperti yang terlihat pada Gambar 2.34 (b).

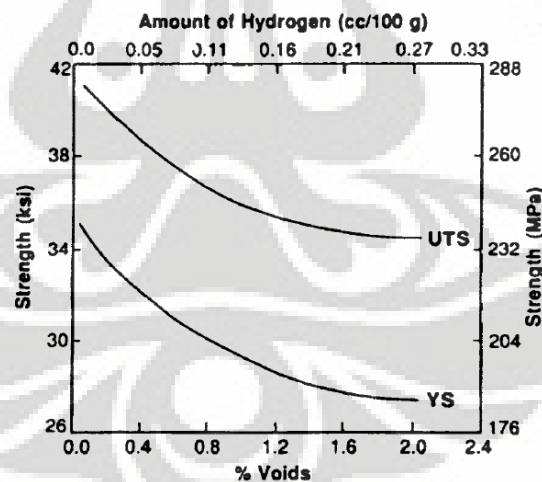


Gambar 2.34 Pengaruh penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi paduan Al-7Si terhadap;(a) kekuatan tarik dan (b) ketahanan aus^[31].

3) Pengaruh Terhadap Porositas

Pada penelitian yang dilakukan Shivkumar^[32], disimpulkan bahwa Porositas yang terbentuk pada paduan penggabungan antara penghalus butir dan unsur modifikasi lebih sedikit dari paduan yang hanya dimodifikasi saja tapi lebih banyak dari pada paduan yang dilakukan proses penghalus butir saja. Hal ini dikarenakan pada penggabungan penghalus butir dan unsur modifikasi zona *mushy* akan menjadi lebih panjang, dan radius liquid *channel* akan semakin mengecil ketika jumlah aliran *channel*nya meningkat. Hal inilah sebagai salah satu penyebab meningkatnya porositas. Keberadaan porositas pada paduan akan berdampak terhadap sifat mekanik dari aluminium paduan.

Dari penelitian yang dilakukan Traenkner^[36], keberadaan porositas sangat mempengaruhi terhadap nilai UTS dan *yield strength* dari material, dengan meningkatnya porositas pada paduan maka nilai UTS dan YS dari paduan akan mengalami penurunan. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 2.35 mengenai efek hidrogen porositas terhadap sifat mekanik dari aluminium 356-T6. Korelasi mengenai keberadaan porositas ini akan terlihat dan dibahas pada subbab berikutnya.

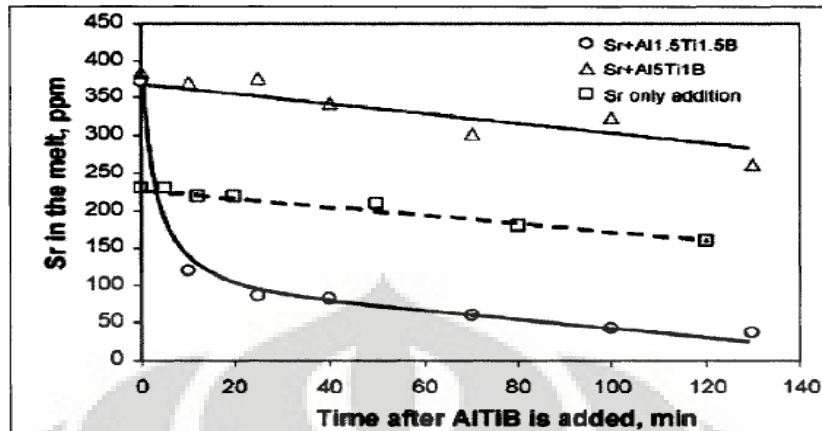


Gambar 2.35 Efek hidrogen porositas terhadap sifat mekanik dari aluminium 356-T6^[36].

2.10.3 Proses Pemudaran Penggabungan Penghalus Butir Dan Unsur Modifikasi

Mekanisme pemudaran dari efek yang ditimbulkan oleh kedua elemen, baik sebagai penghalus butir maupun elemen modifikasi belum dapat diketahui lebih jauh. Dari penjelasan pada sub bab sebelumnya, stronsium lebih memiliki waktu pudar yang lebih lama yaitu sekitar 2 jam setelah proses pencampuran, sedangkan pemudaran yang dialami penghalus butir sangat cepat yaitu sekitar 20 menit setelah pencampuran.

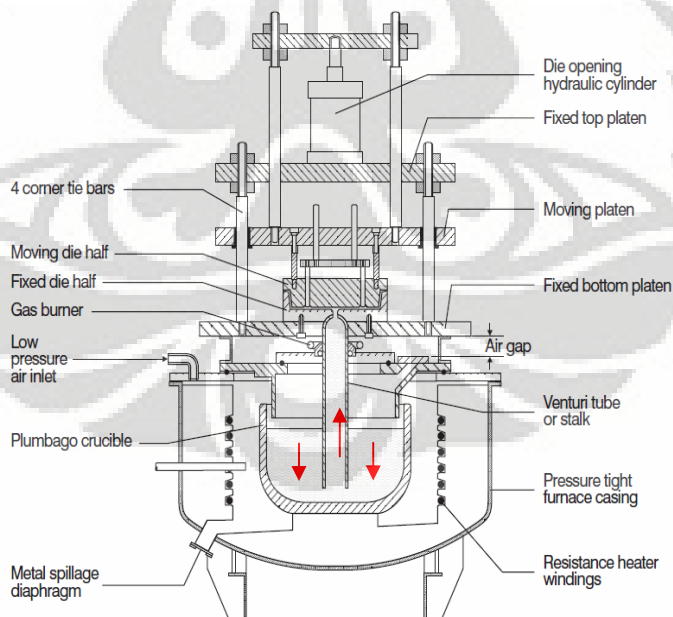
Dari penelitian yang dilakukan Liao dan Sun^[28], menyimpulkan bahwa pada paduan sekitar eutektik efek penghalusan dari boron akan berkurang dengan adanya penambahan stronsium. Dengan kata lain, pemudaran itu terjadi akibat interaksi boron sebagai menghaluskan butir yang tercemar oleh stronsium, sehingga terjadinya persenyawaan stronsium dengan boron membentuk senyawa SrB_6 . Partikel SrB_6 yang terbentuk memiliki berat jenis yang tinggi sekitar 3.422 g/cm^3 dan kemudian akan mengendap di bagian bawah cairan. Sehingga berdampak terhadap semakin berkurangnya laju keefektifan dari penghalus butir dan unsur modifikasi. Hal ini dipertegas dengan penelitian yang dilakukan L. Lu dan A.K. Dahle^[29], yang memperlihatkan bahwa interaksi penghalus butir dan unsur modifikasi pada aluminium cair akan berkurang dengan seiring berjalannya waktu. Namun, interaksi pemudaran tersebut akan berjalan cepat apabila kandungan boron pada penghalus butir dalam kadar yang cukup banyak, hal dapat terlihat pada Gambar 2.36. Penambahan penghalus butir secara signifikan tidak akan mempercepat kehilangan Sr dalam logam cair, tetapi proses reduksi akan tetap berjalan perlahan seiring dengan berjalannya waktu.



Gambar 2.36 Konsentrasi Sr terhadap penggabungan dengan penghalus butir dalam aluminium cair^[28].

2.11 Low Pressure Die Casting (LPDC)

Low pressure die casting (LPDC) merupakan proses pengecoran dengan menggunakan cetakan permanen (*dies*) berdasarkan prinsip tekanan rendah. Cetakan yang digunakan dalam proses *Low Pressure Die Casting* berasal dari material *tool steel* yang biasa diaplikasikan untuk pengecoran logam-logam dengan temperatur lebur tidak terlalu tinggi, seperti untuk peleburan aluminium, timah atau seng.



Gambar 2.37 Kontruksi mesin Low Pressure Die Casting^[35].

Proses LPDC menggunakan tekanan yang tidak terlalu tinggi yaitu sekitar 2-15 psi. Mesin LPDC terdiri dari bagian bawah berupa *holding furnace* yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan aluminium cair yang akan dicor, dan bagian atas merupakan tempat cetakan logam untuk memproduksi *cylinder head*. Bagian cetakan memiliki dua bagian yaitu *cup* dan *drag*, bagian *cup* dapat bergerak naik keatas untuk membuka cetakan sehingga produk cor dapat dikeluarkan, hal ini dapat terlihat pada Gambar 2.37.

Prinsip kerja dari mesin LPDC yaitu dengan pemberian tekanan (berupa tekanan gas, sekitar 0.3-1.5 bar) pada *holding furnace* sehingga menyebabkan aluminium cair yang berada pada *holding furnace* naik ke atas melalui bagian *fill stalk* (seperti pipa) menuju cetakan dan akhirnya logam cair mengisi cetakan berada pada bagian atas.

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.

2.11.1 Cacat Yang Terdapat Pada Produk Hasil LPDC

Cacat merupakan kerusakan atau kesalahan yang terdapat pada benda cor yang menyebabkan penurunan kualitas yang berdampak terhadap penolakan tidak diterima produk dalam pasar (*reject*). Beberapa jenis cacat yang seringkali ditemui dalam produk *cylinder head* hasil *low pressure die casting* yaitu :

1) Cacat porositas

Cacat porositas biasanya disebabkan oleh terperangkapnya gas dalam logam cair selama proses pengecoran. Cacat porositas dapat diketahui dengan terdapatnya poros atau lubang-lubang baik pada permukaan baik pada permukaan maupun bagian dalam benda cor. Jenis cacat porositas yang sering terjadi berupa *pinhole* (lubang jarum), *blisters*, dan *body sears* ^[6]. Pada aluminium, kebanyakan porositas merupakan kombinasi dari *shrinkage* dan gas hidrogen.

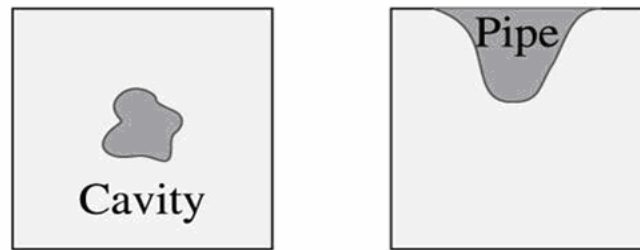
Selama pembekuan aluminium akan berkontraksi. Ketidakmampuan logam cair untuk melakukan *feeding* melalui daerah interdendritik menyebabkan *molten* dikelilingi padatan dan terperangkap di dalamnya, hal ini menyebabkan *shrinkage*. Di sisi lain, kelarutan gas hidrogen juga berkurang, proses pembebasan gas hidrogen selama pembekuan tersebut menyebabkan porositas pula^[26]. Cara pencegahan agar tidak terjadinya cacat porositas yaitu dengan menghilangkan gas-gas terlarut dengan pemberian gas inert seperti argon, heliun, ataupun nitrogen ke dalam logam cair. Atau dengan proses *fluksing*, terutama fluorida dan klorida dari logam alkali tanah^[6].

2) Cacat *shrinkage*

Shrinkage merupakan proses penyusutan volume yang terjadi ketika logam cair membeku. Paduan aluminium memiliki persentase penyusutan sekitar 6 %. Beberapa penyebab terjadinya *shrinkage*, diantaranya^[6]:

1. Perbedaan ketebalan benda cor yang terlalu besar sehingga terdapat bagian tebal yang tidak dapat dialiri logam cair secara utuh. Terdapatnya bagian tebal yang tidak dapat dialiri logam cair secara utuh.
2. Saluran masuk dan penambah tidak mendukung adanya solidifikasi progresif.
3. Saluran masuk dan penambah yang kurang banyak.
4. Saluran masuk dan penambah yang salah dalam peletakkannya.

Shrinkage pada produk aluminium terdapat dalam dua jenis yaitu *cavity* (rongga) dan *pipe* (pipa), yang terlihat pada Gambar 2.38. Tipe pipa ditandai dengan rongga kasar yang tertarik ke dalam bagian yang tebal sedangkan tipe rongga terdapat di dalam bagian yang tebal^[37]. 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 2.38 Jenis *shrinkage*^[27].

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^[6]. 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^[7]:

- 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)^[7]. 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.

2.12 *Cylinder Head*

Cylinder head adalah bagian mesin yang berperan dalam mengatur proses pembakaran. *Cylinder head* berada pada bagian atas *cylinder (Cyl comp)* yang terdiri atas ruang bakar (*combustion chamber*), dudukan valve dan *sprak plug*. Pada bagian atas terdapat ruang untuk rantai keteng dan *rocker arm* yang berfungsi mentransfer gerakan berputar rantai keteng menjadi gerakan lurus (linear) untuk mengoperasikan valve. Dibagian terluar *cylinder head* terdapat sirip-sirip yang berfungsi sebagai pendingin udara untuk mesin.

Cylinder head berperan terhadap kinerja mesin pembakaran internal (*internal combustion engine*), oleh karena itu *Cylinder head* dibuat dengan memiliki ketahanan retak panas (*hot tear*) yang baik. Gambar 2.39 memperlihatkan keberadaan komponen *cylinder head* pada sebuah sepeda motor.

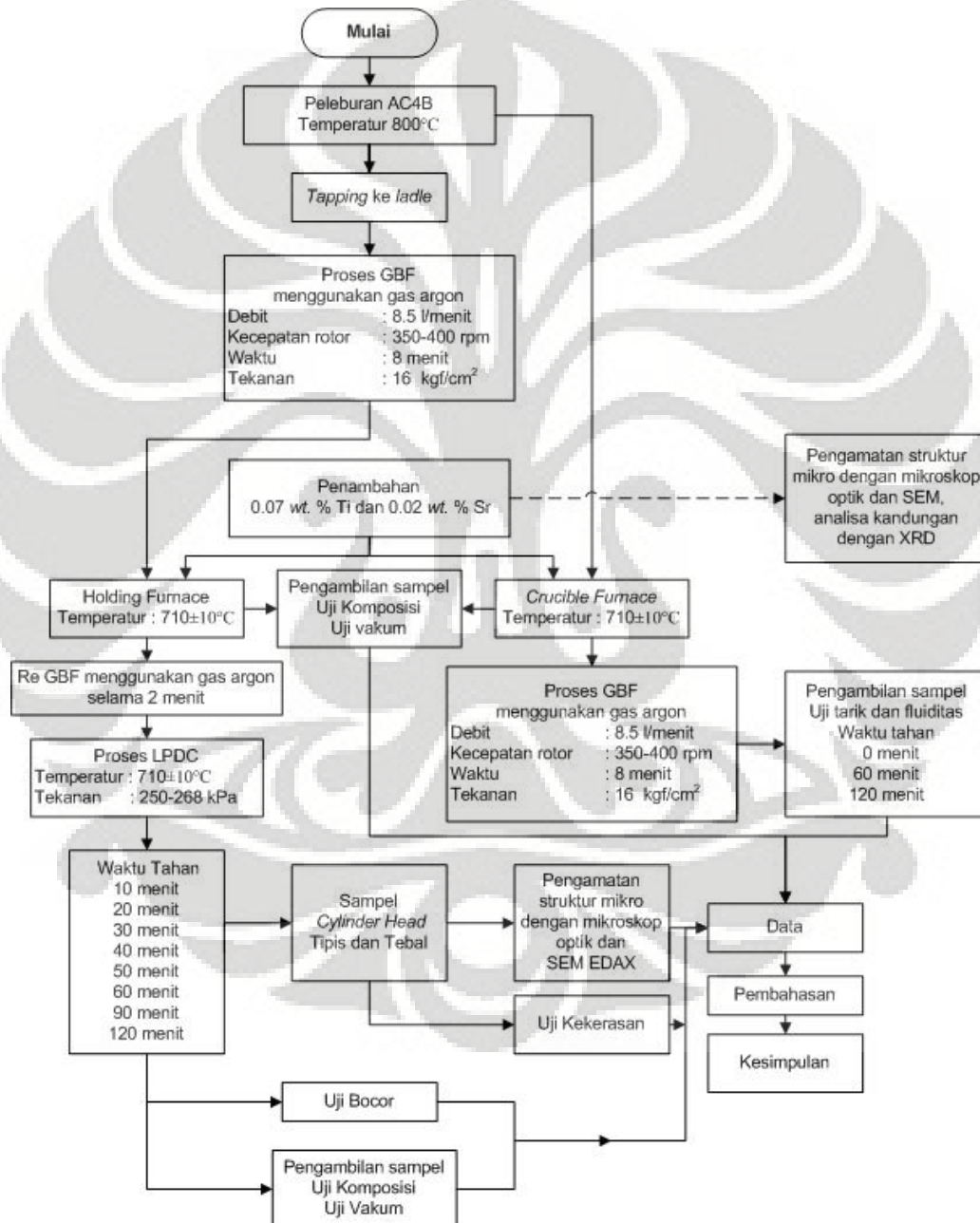


Gambar 2.39 komponen *Cylinder Head*; (a) tampak atas, (b) tampak samping, (c) tampak bawah.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan-tahapan proses dalam penelitian ini dapat terlihat pada Gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.2 Peralatan dan Bahan

3.2.1 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Dapur peleburan FCECO dengan spesifikasi :

- Model HM - 150T buatan Furnace Kakoki Co.Ltd
- Kapasitas hingga 1500 kg
- *Melting rate* 500 kg/jam
- Temperatur peleburan hingga ± 810 °C

2. Alat *degassing* gas argon (*Gas Buble Flootation*) Ostek dengan spesifikasi :

- Kapasitas hingga 500 kg
- Temperatur operasi hingga ± 780 °C
- Kecepatan rotor 350-400 rpm
- Debit argon hingga 8-12 liter/menit
- Lama proses *degassing* selama 8 menit

3. Mesin LPDC dengan dilengkapi dapur tahanan Osaka Giken

Dapur induksi (*holding furnace*) :

- Temperatur aluminium cair 710 ± 10 °C
- Kapasitas hingga 500 kg

Mesin *inject* (LPDC) :

- Temperatur *lower dies* 375 ± 75 °C
- Temperatur *upper dies* 250 ± 75 °C
- Tekanan *dies* sebesar 250, 256, 262, 268 kPa
- Waktu tekan 170-180 detik

4. Dapur *crusibel*

- Temperatur aluminium cair 710 ± 10 °C
- Kapasitas hingga 500 kg

5. *Ladle Bentone* yang di *preheat* dengan *burner* selama 30-60 menit

6. *Sludging rod*

7. *Skimmer*

8. *Cleaning Rod*

9. *Injection Gas Bubble Flotation* (Manual)

10. *Speedy*

11. *Forklift*
12. Neraca
13. Cetakan sampel uji tarik
14. Cetakan spiral uji fluiditas
15. Alat Spektrometri Shimadzu
16. Alat uji vacum (uji porositas) OSTEK
17. Alat uji kekerasan (Rockwell B) merek Future Tech
18. Mesin potong abrasif (gergaji mesin) Heiwa
19. Mesin amplas merek Ecomet
20. Mesin poles merek Ecomet
21. Mikroskop optik dengan kamera merk Olympus
22. *Scanning Electron Microscope* LEO 420i
23. Lain-lain : spidol, tang penjepit, palu, masker dan sarung tangan

3.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. *Ingot* paduan aluminium AC4B
2. *Scrap* paduan aluminium AC4B
3. *Flux* merk Coveral 1111
4. Penghalus butir merk *Coveral* GR 2815 dalam bentuk *flux*
5. *Master Alloy* Al-10Sr
6. Kertas amplas (*mesh* 400-1500)
7. Kain beludru (kain poles)
8. Zat poles Alumina
9. Zat etsa (HF 5 vol%) dan Reagen Tucker (45 ml HNO₃ + 15 ml HCl + 15 ml HF (48%) + 25 ml H₂O)

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Proses Pembuatan Sampel

Semua proses pembuatan sampel dilakukan di PT. AHM dengan mekanisme sebagai berikut :



Gambar 3.2 Dapur peleburan FCECO.

Peleburan merupakan proses awal yang dilakukan sebelum proses pengecoran. Proses pengecoran dilakukan dengan menggunakan dapur peleburan FCECO berkapasitas ± 1500 kg, temperatur aluminium cair $750-800$ °c dan temperatur *holding* $770 - 810$ °c (Gambar 3.2). Bahan baku utamanya 45 % *ingot* AC4B dan 55 % scrap AC4B, yang terlihat pada Gambar 3.3. *Scrap* ini berasal dari hasil *reject cylinder head* ataupun dari *gating cylinder head*.



Gambar 3.3 Material umpan; a) ingot AC4B dan b) scrap AC4B

Pada proses peleburan juga dilakukan proses penambahan *cover flux* Coveral 1111 dengan berat *flux* 0,6-1 % dari total charging, dan temperatur *fluxing* 700-750 °C. *Cover flux* ini berperan sebagai *slag coagulant* atau pengikat kotoran yang ikut terlarut di dalam aluminium cair, yang nantinya akan terangkat pada permukaan aluminium cair saat berlangsungnya proses pengadukan untuk pengangkatan kotoran (*disludging*).

Sebelum aluminium cair dituang, *ladle* terlebih dahulu dipanaskan (*preheating*) pada temperatur 325 °C selama 15 menit. Setelah proses penuangan (*tapping*), *ladle* yang telah berisi aluminium cair kemudian ditimbang guna mengetahui banyaknya aluminium cair.

Setelah itu dilakukan proses GBF (*Gas Bubbling Floatation*) untuk menghilangkan hidrogen yang larut dalam aluminium cair. Proses ini menggunakan gas argon dengan debit 8-12 per menit selama 8 menit dan dengan kecepatan rotor 300-400 rpm, mesin GBF dapat terlihat pada Gambar 3.4. Sebelum proses dimulai, dilakukan pembuangan lapisan oksida aluminium yang terbentuk pada permukaan aluminium cair, begitu juga setelah proses GBF selesai. Setelah proses GBF selesai, *ladle* yang berisi aluminium cair siap didistribusikan ke dalam mesin LPDC menggunakan *forklift*. Namun, sebelum hal tersebut berlangsung dilakukan pengambilan pengujian komposisi dan pengujian vacuum awal. Pengujian komposisi awal ini berguna untuk mengetahui kadar unsur-unsur yang terdapat pada aluminium cair guna mempermudah perhitungan *material balance* sehingga target penambahan dapat tercapai.



Gambar 3.4 Gas bubble flotation.



Gambar 3.5 Elemen yang akan ditambahkan a) *master alloy* Al-10Sr ,
b) penghalus butir *flux* Coveral GR-2815.

Perhitungan *material balance* dilakukan sebelum proses pembuatan *cylinder head* pada mesin LPDC, yang didahului dengan pengujian spektrometer aluminium cair yang ada pada *holding furnace* mesin LPDC. Asumsi yang digunakan terhadap kadar Ti pada penghalus butir *Coveral* GR-2815 sebesar 15 wt. % Ti, serta pada *master alloy* Al-10Sr terdapat kadar 10 % Sr (Gambar 3.5). Target komposisi akhir pada paduan AC4B sebesar 0.110 wt.% Ti dan 0.02 wt. % Sr.

Berikut perhitungan *material balance* disertai data-data yang mempengaruhi perhitungannya:

- 1) Kapasitas *holding furnace* = 500 kg
- 2) Berat 1 *shot* (2 *part*) = 3.8 kg
- 3) Berat Sampel:
 - Uji vacuum = 0.15 kg
 - Uji komposisi = 0.075 kg
 - Uji tarik = 3 kg
 - Uji fluiditas = 5.7 kg

Kandungan titanium dan stronsium pada saat sebelum penambahan sebesar 0.053 *wt. %* Ti dan 0.001 *wt. %* Sr, yang merupakan sisa hasil penelitian sebelumnya dengan parameter yang berbeda. Dalam *holding furnace* mesin LPDC terdapat aluminium cair sebanyak 396.1625 kg, dimana sebelum penambahan proses produksi masih berjalan.

- Sr yang ditambahkan :
 - = $396.1625 \text{ kg} \times (0.02 - 0.001) \%$
 - = 0.075271 kg

Karena Sr yang digunakan dalam bentuk *master alloy* Al-10 Sr, maka Sr yang ditambahkan menjadi :

$$= 0.075271 \text{ kg} \times 100/10$$

$$= 752.71 \text{ gram}$$

- Ti yang ditambahkan adalah :
 - = $396.1625 \text{ kg} \times (0.110 - 0.053) \%$
 - = 0.22581 kg

Karena asumsi kadar Ti dalam flux sebesar 15%, maka Ti yang ditambahkan menjadi :

$$= 0.22581 \text{ kg} \times 100/15$$

$$= 1505.41 \text{ gram}$$

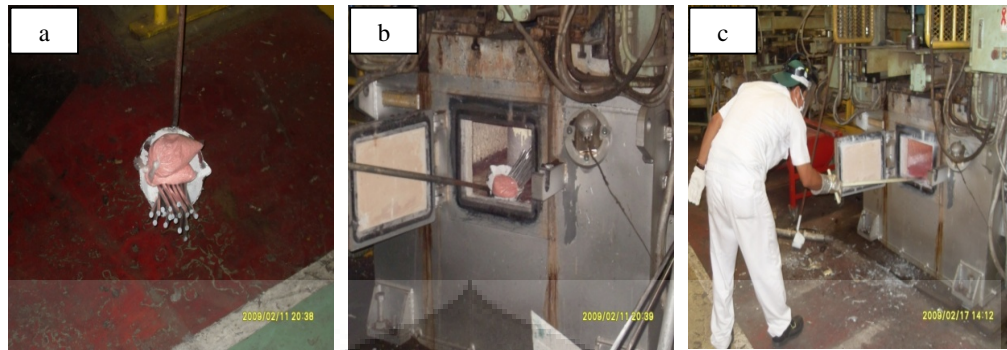
Jadi penambahan yang dilakukan sebanyak, 752.71 gram *master alloy* Al-10Sr dan 1505.41 gram penghalus butir *Coveral* GR-2815. Proses pengecoran ini berlangsung secara kontiniu menggunakan satu *holding* yang sama yaitu pada mesin LPDC 4, serta menggunakan cetakan yang sama.

Aluminium cair yang telah melalui proses GBF, didistribusikan ke mesin LPDC (Gambar 3.6) menggunakan *forklift*. Selanjutnya dituang ke *holding furnace* yang berada dibagian bawah mesin LPDC, dengan bantuan *lounder* yang terlebih dahulu dilakukan pemanasan awal. Pada *holding furnace*, dilakukan proses *skimming*, yaitu proses pengangkatan terak yang ada pada permukaan.



Gambar 3.6 Mesin LPDC.

Setelah proses *skimming* selesai, dilakukan proses penambahan unsur penghalus butir dan modifikasi pada *holding furnace* dengan jumlah penambahan sesuai dengan perhitungan *material balance* (Gambar 3.7). Lalu dilanjutkan dengan proses pengadukan dan *injection gas bubble flotation* secara manual selama 2 menit (Gambar 3.8), dan diteruskan dengan proses *skimming*. Setelah pengangkatan terak pada *holding furnace* selesai, ambil sedikit aluminium cair untuk dituangkan ke cetakan uji komposisi, cetakan uji vacuum, cetakan uji tarik, dan cetakan fluiditas.



Gambar 3.7 Tahapan pemasukan penghalus butir dan unsur modifikasi: a) Penempatan di dalam ciduk, b) pemasukan ke dalam holding furnace, c) proses pengadukan.



Gambar 3.8 Proses GBF manual dengan menggunakan lance.

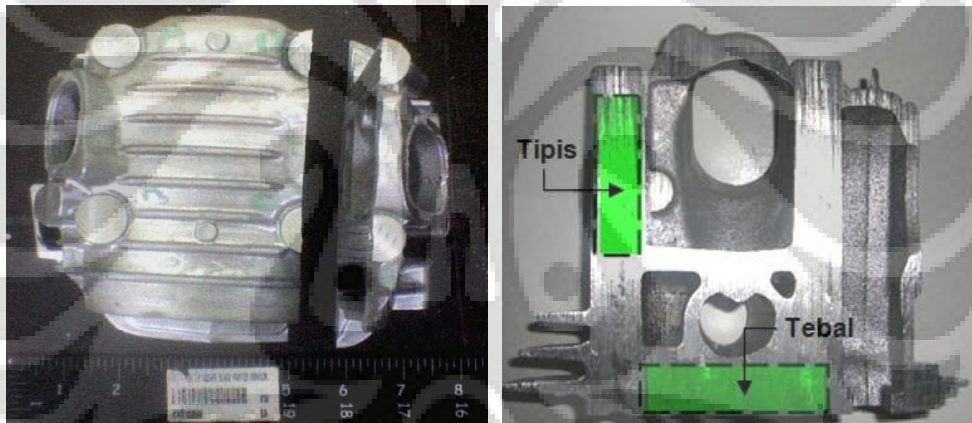
Cetakan yang digunakan dalam LPDC kali ini adalah cetakan 39 dan 40. Sebelum proses pengecoran dilakukan, terlebih dahulu dilakukan pemanasan awal terhadap cetakan yakni selama ± 20 menit hingga temperatur 400 ± 10 °C agar tidak terjadi *thermal shock*. Selanjutnya diteruskan dengan proses pengecoran *cylinder head*, yang diawali dengan *trial* pengecoran sebanyak 2 injeksi dan proses *injeksi* berikutnya terhitung sebagai produk jadi. Hal ini dimaksudkan agar pemerataan panas pada cetakan dapat terjadi dan kemungkinan pada awal injeksi ini cairan aluminium cenderung banyak membawa kotoran. Temperatur aluminium pada mesin LPDC sebesar 710 ± 10 °C, tekanan mesin LPDC 250, 256, 262, 268 kPa tergantung jumlah logam cair yang ada dalam *holding Furnace*. Proses LPDC berlangsung selama kurang lebih 4 jam sebanyak

Universitas Indonesia

45 *shot*. Penelitian ini membahas mengenai proses pemudaran dari penambahan unsur modifikasi Sr dan penghalus butir Ti, dengan variabel waktu pudar pada 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit setelah penambahan. Pengambilan sampel dilakukan pada masing-masing variabel waktu pudar, berupa komponen *cylinder head as cast* hasil injeksi proses LPDC yang nantinya akan diamati lebih lanjut.

3.3.2 Proses Preparasi Sampel Tebal dan Tipis

Sampel untuk pengujian kekerasan dan pengamatan struktur mikro, didapatkan melalui pemotongan pada bagian tebal dan tipis dari *cylinder head* yang terlihat pada Gambar 3.9. Pemotongan *cylinder head* dilakukan dengan mesin potong abrasif di PT AHM dan menghasilkan sampel yang berbentuk balok.

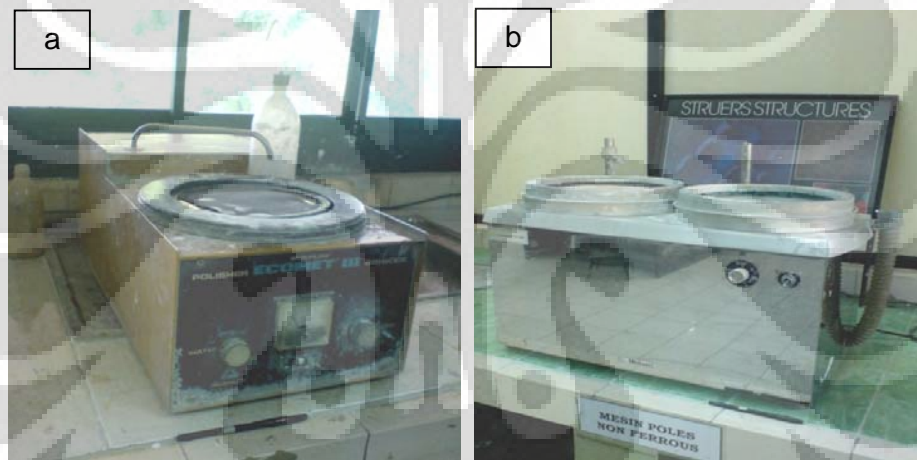


Gambar 3.9 Daerah pemotongan sampel pada cylinder head.

Sampel pengujian terlebih dahulu di-*mounting* guna mempermudah proses lebih lanjut dengan ukuran sampel yang kecil. Setelah itu dilakukan pengamplasan terhadap sampel, dengan tujuan untuk memastikan permukaan sampel benar-benar sudah rata, halus, serta menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan sampel. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas nomor grid #400, #600, #800, #1000, #1200, dan #15000 yang dilakukan secara bertahap, dimulai dari amplas dengan nomor grid paling kecil (kasar) ke nomor grid yang besar (halus). Pengamplasan ini dilakukan dengan menggunakan mesin amplas putar otomatis (Gambar 3.10a). Selanjutnya dilakukan proses

pemolesan dengan menggunakan serbuk alumina yang telah dicampur dengan air (Gambar 3.10b). Pemolesan bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus, bebas goresan, dan mengkilap seperti cermin. Setelah proses pemolesan selesai dilanjutkan dengan proses pengetsaan.

Proses etsa merupakan suatu proses penyerangan atau pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan mencelupkan permukaan sampel ke dalam larutan pengetsa, sehingga struktur yang akan diamati dapat terlihat dengan jelas dan tajam. Mekanisme persiapan sampel ini dikhususkan untuk mempersiapkan sampel guna pengamatan struktur mikro, sedangkan untuk sampel kekerasan hanya cukup hingga proses pengamplasan saja.



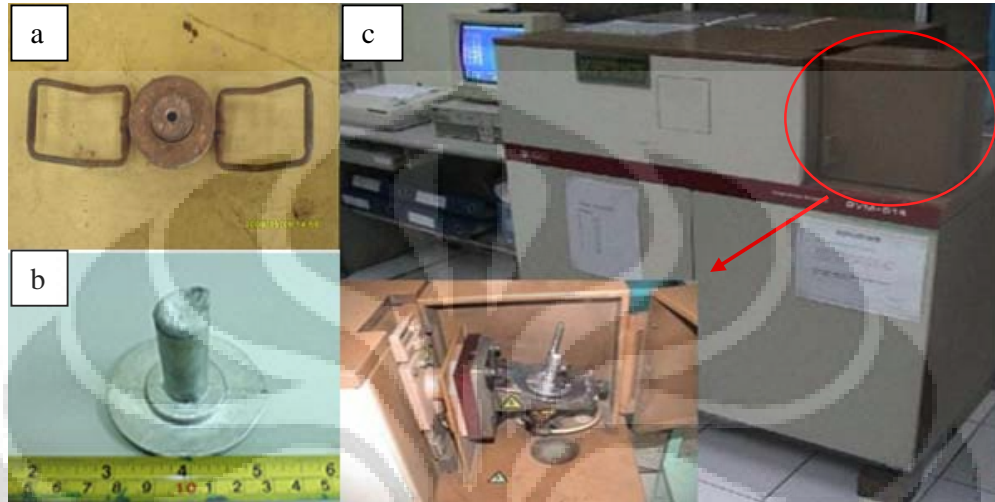
Gambar 3.10 mesin persiapan sampel; a) Mesin amplas dan b) mesin poles.

3.3.3 Karakterisasi Sampel

3.3.3.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dalam tiga kali pengambilan, yaitu pada saat sebelum penambahan, setelah penambahan, dan 120 menit setelah penambahan. Sampel pengujian komposisi diambil dari aluminium cair yang berada dalam *holding furnace* mesin LPDC yang dituang pada cetakan uji komposisi (Gambar 3.11a), sehingga menghasilkan sampel yang berbentuk lingkaran dengan sebuah pegangan silinder kecil seberat ± 75 gram (Gambar 3.11b). Setelah membeku, sampel diambil dan dibubut terlebih dahulu sampai permukaannya rata, agar pengujian dapat berjalan dengan baik. Pengujian

berlangsung dengan menggunakan mesin uji spektrometri (Gambar 3.11c). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar aktual dari unsur-unsur yang ada dalam aluminium cair.



Gambar 3.11 a) Cetakan sampel uji spektrometri, b) Sampel uji komposisi kimia, c) Mesin uji spektrometri.

3.3.3.2 Pengujian Porositas

Pengujian porositas dilakukan dengan tiga kali pengambilan sampel, yaitu pada saat sebelum penambahan, setelah penambahan, dan 120 menit setelah penambahan. Pengambilan sampel uji porositas dengan menggunakan wadah tertentu yang nantinya akan dimasukkan ke dalam mesin pengujian yang dikondisikan dalam keadaan vacum selama ± 15 menit (Gambar 3.12). Kemudian sampel dipotong menjadi dua bagian. Setiap penampang potongan diampelas untuk melihat lebih jelas penyebaran porositas dari sampel. Hasil yang didapatkan difoto makro dengan menggunakan mikroskop optik Olympus. Untuk mengetahui nilai kuantitatif dari porositas yang terbentuk dilakukan perhitungan fraksi volume porositas dari paduan dengan menggunakan standar ASTM E562.



Gambar 3.12 Alat vakum OSTEK.

3.3.3.3 Pengujian Kekuatan Tarik dan Fluiditas

Persiapan sampel uji tarik dan fluiditas dilakukan pada dapur *crucible* yang dapat terlihat pada Gambar 3.13. Dapur *crucible* disiapkan dengan kapasitas aluminum cair sebanyak 200 Kg, temperatur peleburan mencapai ± 800 °c, dan temperatur logam cairnya 710 ± 10 °c. Proses penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi dilakukan langsung kedalam dapur dan proses GBF dilakukan dengan mesin otomatis selama 8 menit. Sebelum penambahan dilakukan pengujian komposisi aluminium cair dan target yang ingin dicapai sama dengan target pada saat perhitungan pada *holding furnace*, yakni komposisi akhir pada paduan AC4B sebesar 0.110 wt.% Ti dan 0.02 wt. % Sr. Kadar titanium pada sebelum penambahan sebesar wt.% dan stronsium sebesar wt.%. Sehingga, jumlah penambahan yang dilakukan sesuai dengan perhitungan sebagai berikut:

- Sr yang ditambahkan :
 - = $200 \text{ kg} \times (0.020 - 0.000) \%$
 - = 0.04 kg

Karena Sr yang digunakan dalam bentuk *master alloy* Al-10 Sr, maka Sr yang ditambahkan menjadi :

$$= 0.04 \text{ kg} \times 100/10$$

$$= 400 \text{ gram}$$

- Ti yang ditambahkan adalah :
 $= 200 \text{ kg} \times (0.110 - 0.040) \%$
 $= 0.12 \text{ kg}$

Karena asumsi kadar Ti dalam flux sebesar 15%, maka Ti yang ditambahkan menjadi :

$$= 0.12 \text{ kg} \times 100/15$$

$$= 800 \text{ gram}$$

Jadi penambahan yang dilakukan sebanyak, 400 gram *master alloy* Al-10Sr dan 800 gram penghalus butir *Coveral* GR-2815.



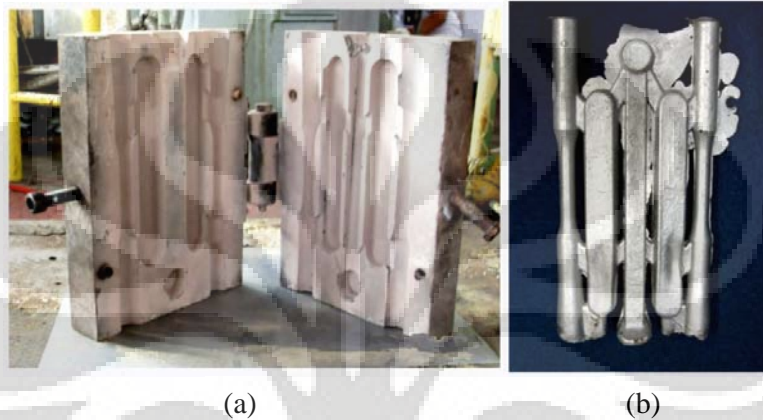
Gambar 3.13 Dapur *crucible*.

3.3.3.3.1 Pengujian Kekuatan Tarik

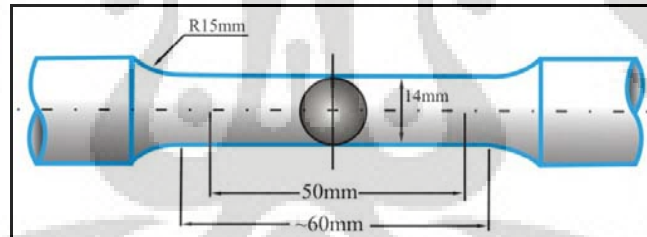
Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan nilai UTS dari aluminium AC4B. Pengujian kekuatan tarik dilakukan sebanyak tiga kali, yaitu pada saat sebelum penambahan, 0 menit, dan 120 menit setelah penambahan. Sampel yang telah siap pada dapur *crucible* dilakukan proses *skimming* terlebih dahulu, kemudian cairan aluminium dimasukkan ke dalam cetakan uji tarik seperti terlihat pada Gambar 3.14a. Cetakan uji tarik terlebih dahulu di-*coating* dan dilakukan

Universitas Indonesia

pemanasan awal. Satu kali penuangan logam cair akan menghasilkan dua sampel uji tarik. Sampel uji tarik yang diambil sebanyak empat sampel. Sampel yang dihasilkan dari cetakan uji tarik, sebelum diuji terlebih dahulu dilakukan pengamplasan pada permukaannya agar lebih rata dan halus. Standar pengujian tarik yang dipergunakan JIS Z 2201, yang terlihat pada Gambar 3.15.



Gambar 3.14 (a) Cetakan uji tarik, (b) sampel uji tarik yang baru dikeluarkan dari cetakan.



Gambar 3.15 Bentuk dan ukuran sampel uji tarik yang disesuaikan dengan standar JIS 2201.

Proses pengujian kekuatan tarik yang dilakukan dengan menggunakan mesin Uji Tarik Shimadzu AG-1 100 KN dengan beban sebesar 200 kg di PT AHM, dapat terlihat pada Gambar 3.16. Prinsip pengujian tarik adalah pemberian beban tarik secara searah (*uniaxial*) pada sampel hingga putus. Sampel diletakkan pada mesin uji tarik, dimana kedua ujungnya akan mengalami penjepitan. Data yang didapat dari pengujian ini berupa nilai UTS, % elongasi, dan grafik beban, versus perubahan panjang.



Gambar 3.16 Mesin uji tarik Shimadzu.

3.3.3.3.2 Pengujian Fluiditas

Pengujian fluiditas dilakukan untuk mengukur mampu alir dari logam cair untuk masuk ke dalam rongga cetakan. Proses pengambilan sampel uji fluiditas terlihat pada Gambar 3.17. 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. Nantinya nilai fluiditas dari paduan aluminium diukur dari seberapa panjang lingkaran yang bisa dibentuk oleh aluminium cair. Sebelum dilakukan pengujian, maka perlu dilakukan pemanasan awal terhadap cetakan fluiditas pada temperatur ± 290 °C. Tujuannya agar aluminium cair yang dituang ke dalam cetakan tidak mengalami *thermal shock*, sehingga mengakibatkan aluminium cair membeku dengan cepat sebelum sempat mengalir mengisi rongga cetakan. Sampel yang diambil sebanyak lima buah, dengan waktu pengambilan berupa sebelum penambahan, 0 menit setelah penambahan, dan 120 menit setelah penambahan. Pada cetakan fluiditas juga dilakukan proses *coating* terlebih dahulu. Satuan dari nilai fluiditas adalah meter atau inch.



Gambar 3.17 a) Proses penuangan aluminium cair ke cetakan uji fluiditas, b) cetakan uji fluiditas, dan c) proses pengeluaran sampel dari cetakan.

3.3.3.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan di laboratorium metalografi PT.AHM. Sampel yang digunakan berasal dari pemotogan bagian tebal dan tipis komponen *cylinder head*. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode penjejakan Rockwell B. Dengan metode pengujian ini material uji akan mengalami penjejakan menggunakan indenter bola baja berdiameter 1/16 inci dan beban 100 kg (ASTM E18). Sampel yang telah dijejakan akan langsung memperlihatkan hasil pada layar yang terdapat pada mesin Rockwell, dapat terlihat pada Gambar 3.18. Penjejakan dilakukan sebanyak lebih kurang lima kali. Hasil nilai kekerasan diambil melalui nilai rata-rata dari kelima penjejakan tersebut.



Gambar 3.18 Alat uji kekerasan Rockwell.

3.3.3.5 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus yang terlihat pada Gambar 3.19. Pengamatan struktur mikro ini bertujuan untuk mengamati fasa-fasa yang terbentuk, karakteristik dari aluminium silikon berupa struktur dendrit, serta untuk mengamati pengaruh penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi terhadap nilai *Dendrite Arm Spacing*, dan hubungannya terhadap efek pemudaran unsur tersebut. Pengamatan struktur mikro dilakukan di Laboratorium Metalografi Departemen Metalurgi Dan Material Universitas Indonesia. Proses pengamatan dilakukan pada bagian tebal dan tipis dari komponen *cylinder head*. Sampel yang telah dipotong terlebih dahulu melewati serangkaian proses persiapan berupa proses *mounting*, pengamplasan, poles, dan pemberian zat etsa. Zat etsa yang digunakan berupa larutan HF 5 % yang dilanjutkan dengan Reagen Tucker (15 ml HNO₃ + 45 ml HCl + 15 ml HF (45 %) + 25 ml H₂O) untuk mendapatkan struktur mikro dendrit yang jelas.

Pengamatan dimulai dengan menggunakan perbesaran yang paling kecil terlebih dahulu yaitu 50x, setelah mendapatkan daerah yang bagus dan bersih dari goresan, pengamatan dilanjutkan dengan perbesaran 100 x, 200 x dan seterusnya. Foto diambil dengan perbesaran 50 x, 100x, dan 200 x untuk setiap sampel. Pengukuran nilai DAS dilakukan dengan mengukur jarak dari lengan dendrit pada

daerah struktur mikro yang representatif, terhadap hasil foto mikrostruktur paduan menggunakan mikroskop optik perbesaran 200 kali.



Gambar 3.19 Mikroskop optik olympus.

3.3.3.6 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Analysis* (EDX)

Pengujian SEM dilakukan terhadap sampel tebal dan tipis dengan menggunakan mesin SEM LEO 420i seperti terlihat pada Gambar 3.20. Pengujian ini dilakukan dengan *collector bias* sebesar 400 kV, kontras 40 %, *brightness* 30 %, dan EHT (M) sebesar 12 kV. Pengujian SEM bertujuan untuk mengetahui bentuk dan komposisi fasa yang ada dan mencari fasa TiAl_3 , TiB_2 , AlB_{12} , SrBr_6 , dan Al_4SrSi_2 sebagai dampak penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi. Pencarian dilakukan dengan menembak partikel yang diduga dengan EDX untuk diketahui komposisinya. Jika nilai komposisinya menunjukkan komposisi fasa TiAl_3 , TiB_2 , AlB_{12} , SrBr_6 , dan Al_4SrSi_2 maka fasa tersebut diambil gambarnya.



Gambar 3.20 Scanning Electron Microscope (SEM).

3.3.3.7 Pengujian X-Ray Diffractometer (XRD)

Pengujian XRD dilakukan di BATAN, dengan mesin Philip type PW 2213/20, dengan arus 10-80 mA, tipe detektor *proportional*, dengan maksimum *count rate* 500000 c/s (Gambar 3.21). Pengujian ini bertujuan untuk menentukan jenis senyawa dari penghalus butir *Flux Coveral GR-2815 dan Master Alloy Al-10Sr* berdasarkan pada difraksi sinar-x. Difraktometer sinar-x adalah sebuah peralatan ukur untuk mendapatkan karakteristik fasa dan struktur kristal suatu material kristalit dan nonkristalit. Sampel yang akan diambil datanya dengan menggunakan sampel holder, bila sampel berbentuk padatan maka harus diperhatikan tebal dan diameter sampel agar tidak melebihi batas ruang sampel holder dan jika tidak memungkinkan sampel padatan tersebut diserbukkan dahulu. Dengan hasil yang didapatkan pengkarakterisasian dari penghalus butir *Flux Coveral GR-2815 dan Master Alloy Al-10Sr* dapat dilakukan, sehingga dapat diketahui unsur penyusun dari keduanya. Kandungan yang ingin dideteksi adalah titanium dan boron dalam penghalus butir serta stronsium dalam unsur modifikasi.

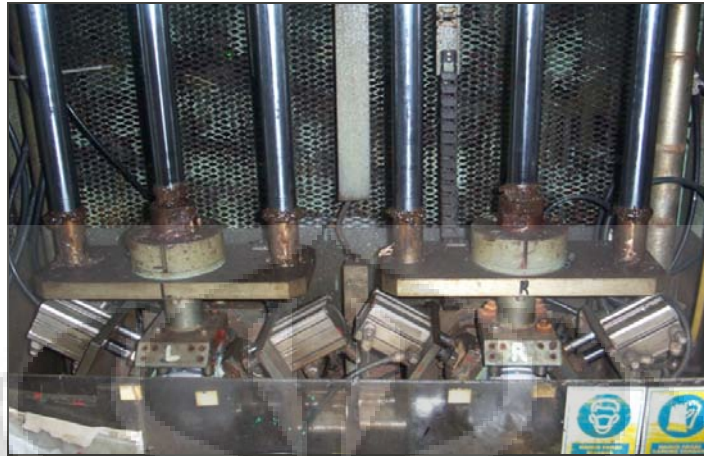


Gambar 3.21 Mesin difraktometer sinar-x.

3.3.3.8 Pengujian kebocoran

Pengujian bocor dilakukan pada bagian *machining* di PT AHM. Pengujian bocor bertujuan untuk melihat adanya kebocoran fluida karena keropos. Pengujian ini dilakukan setelah komponen *cylinder head* mengalami serangkaian proses pada *plant* LPDC, seperti proses *chipping*, *cutting*, *blasting* dan *machining*. *Chipping* yaitu proses penghancuran pasir inti. *Cutting gate* yaitu pemotongan saluran tuang yang nantinya dapat dijadikan bahan baku untuk peleburan selanjutnya. Kemudian dilakukan proses *trimming*, yang bertujuan untuk membersihkan *cylinder head* dari deposit logam hasil pemotongan saluran tuang. Lalu dilanjutkan ke proses penghalusan permukaan.

Setelah semua proses permesinan dilalui, maka proses selanjutnya adalah pengujian kebocoran untuk mengetahui adanya kebocoran pada *cylinder head*. Pertama, lubang pada *cylinder head* ditutup terlebih dahulu untuk mencegah masuknya air. Setelah itu *cylinder head* dicelupkan ke dalam air selama beberapa menit sambil ditiupkan udara dengan tekanan tertentu. Apabila muncul gelembung udara maka berarti terdapat cacat / lubang pada komponen *cylinder head*, yang mengindikasikan terjadinya kebocoran pada komponen *cylinder head*. Komponen *cylinder head* yang bocor dikategorikan sebagai komponen yang gagal atau *reject* yang harus dilebur kembali. Mesin pengujian bocor dapat dilihat pada Gambar 3.20.



Gambar 3.20 Alat uji bocor.



BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Komposisi Paduan Aluminium AC4B

Hasil pengujian komposisi kimia paduan AC4B terhadap penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi, dapat dilihat pada Tabel 4.1. Dari tabel terlihat bahwa kadar titanium dari 0.040 wt. % meningkat menjadi 0.120 wt. %, yang berarti telah terjadi peningkatan sebesar 0.080 wt. %. Sedangkan untuk kadar stronsium dari 0.000 wt. % mengalami peningkatan menjadi 0.018 wt. %, yang berarti telah terjadi peningkatan sebesar 0.018 wt. %.

Tabel 4.1 Hasil uji komposisi paduan AC4B

Unsur	Komposisi paduan aluminium AC4B awal (wt. %)	Komposisi paduan aluminium AC4B 0.120 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr pada 0 menit (wt. %)	Komposisi paduan aluminium AC4B 0.120 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr pada 120 menit (wt. %)	Komposisi standar paduan AC4B PT AHM (wt. %)	
Si	7.844	7.625	8.696	7.00 -10.00	
Cu	2.100	2.119	2.399	2.00 - 4.00	
Mg	0.283	0.138	0.137	0.50	maks
Fe	0.860	0.819	0.754	0.80	maks
Mn	0.271	0.277	0.256	0.50	maks
Ni	0.069	0.062	0.058	0.35	maks
Ti	0.040	0.120	0.106	0.20	maks
Pb	0.060	0.059	0.073	0.20	maks
Sn	0.036	0.036	0.044	0.10	maks
Cr	0.035	0.032	0.03	0.20	maks
Zn	0.608	0.584	0.636	1.00	maks
Sr	0.000	0.018	0.011	-	
Al	Sisa	Sisa	Sisa	Sisa	

Peningkatan yang terjadi pada kadar titanium dan stronsium mengalami sedikit menyimpang dari target awal, hal ini diperkirakan terjadi karena perhitungan massa aluminium dalam *holding furnace* yang kurang akurat, proses pemberian unsur modifikasi yang kurang sempurna dimana ada sebagian dari unsur modifikasi yang terbakar dipermukaan sebelum teraduk pada awal proses

pencampuran. Serta proses pencampuran yang kurang merata dimana dimungkinkan terjadi konsentrasi unsur yang ditambahkan kebagian tertentu dari *holding furnace*, mengingat pencampuran ini dilakukan langsung kedalam *holding furnace* mesin LPDC. Setelah waktu tahan 120 menit, kadar titanium dan stronsium mengalami penurunan. Unsur titanium mengalami penurunan menjadi 0.106 wt. %, sedangkan unsur stronsium turun menjadi 0.011 wt. %. Penurunan yang terjadi terhadap kedua unsur menandakan berlangsungnya mekanisme pemudaran, sehingga efektifitas dari penghalus butir dan unsur modifikasi mengalami penurunan. Proses penurunan kadar titanium dalam paduan diperkirakan terjadi oleh pengendapan^[29], sebagai akibat reaksi dengan unsur boron membentuk partikel TiB_2 dengan densitas sebesar 4.495 g/cm^3 atupun dengan aluminium dengan membentuk $TiAl_3$ dengan densitas 3.3 g/cm^3 . Densitas kedua unsur ini lebih besar dari densitas aluminium sebesar 2.77 g/cm^3 . Sedangkan penurunan yang terjadi pada unsur stronsium diasumsikan karena proses oksidasi dan penguapan pada permukaan cairan, serta akibat interaksi boron sebagai penghalus butir membentuk senyawa SrB_6 yang memiliki berat jenis yang cukup tinggi sekitar 3.422 g/cm^3 yang akan mengendap ke dasar *furnace*^[29].

Selama proses pengamatan mekanisme pemudaran, kandungan unsur lain dalam paduan baik setelah dilakukan penambahan maupun 120 menit waktu tahan, tidak mengalami perubahan yang signifikan. Kadar Cu pada sebelum penambahan sebesar 2.100 wt. %, ketika dilakukan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi kadar Cu mengalami kenaikan cukup kecil menjadi 2.119 wt. % dan pada 120 menit waktu tahan menjadi 2.399 wt. %. Dengan persentase perubahan yang terjadi, pengaruh yang diberikan Cu tidak terlalu terlihat. Unsur Cu sebagai paduan akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium apabila ditambahkan hingga kisaran 4-5.5 %^[7]. Begitu juga dengan unsur Fe pada awal mempunyai kadar 0.86 wt. % menjadi 0.819 wt. % dan pada 120 menit waktu tahan menjadi 0.754 wt. %, Mg dari kadar 0.283 wt. % mengalami penurunan menjadi 0.138 wt. %, dan Si dari kadar 7.844 wt. % menjadi 7.625 wt. %, serta unsur lainnya. Kadar dari unsur lain ini sangat penting

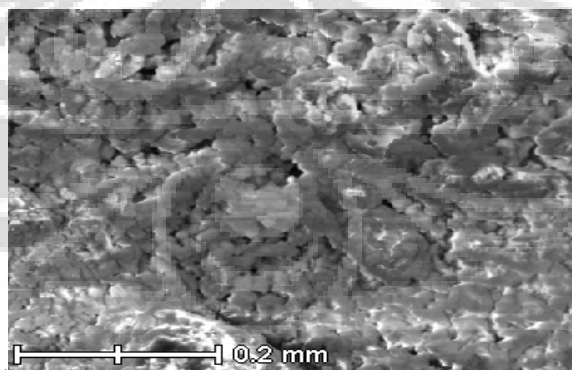
untuk diperhatikan mengingat, unsur-unsur tersebut mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap sifat-sifat mekanis dan karakteristik dari paduan AC4B.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa seluruh unsur yang terdapat pada aluminium cair selama pengamatan mekanisme pemudaran pada penelitian ini, masih berada pada rentang komposisi standar PT AHM. Serta dengan terjadinya penurunan Ti dan Sr mengindikasikan bahwa kedua unsur ini mengalami mekanisme pemudaran. Hal ini akan dijelaskan lebih lanjut pada subbab selanjutnya.

4.2 Karakterisasi *Flux Coveral GR-2815* dan *Master Alloy Al-10Sr*

4.2.1 Karakterisasi *Flux Coveral GR-2815*

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat struktur mikro dari penghalus butir *Flux Coveral GR-2815* yang ditambahkan terhadap paduan AC4B. Pada gambar terlihat struktur yang mirip dengan struktur garam. Hal ini diperkuat oleh analisa SEM pada Tabel 4.2 yang menunjukkan bahwa terdapat kandungan unsur penyusun garam, yaitu K, Na, F, dan Cl. Kandungan dari boron tidak terdeteksi, ada dua kemungkinan terhadap hal ini, pertama tidak adanya kandungan unsur boron pada penghalus butir ini, kedua ada kemungkinan dengan bentuk penghalus butir yang serbuk membuat distribusi boron tidak merata. Pada tabel juga terlihat bahwa kadar Ti pada penghalus butir *Coveral GR-2815* sebesar 14.95 %.



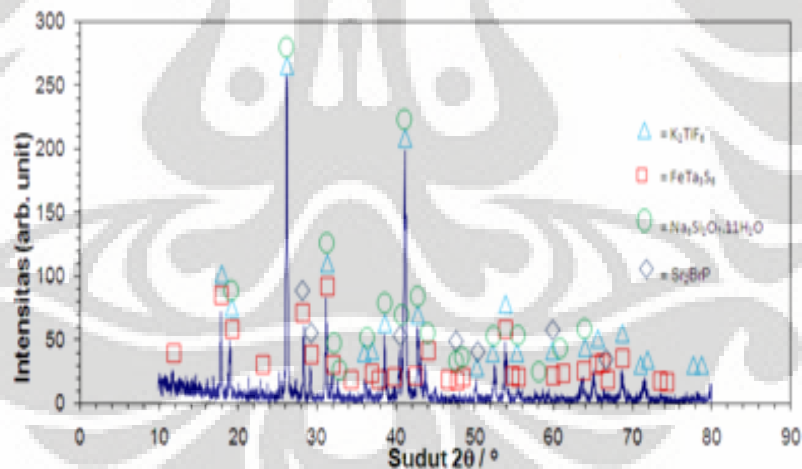
Gambar 4.1 Mikrostruktur dari penghalus butir *Coveral GR-2815*^[33].

Pada Gambar 4.2 terlihat hasil pengujian XRD dari penghalus butir *Coveral GR-2815*. Pengujian XRD bertujuan untuk mengetahui formulasi dari unsur

penyusun penghalus butir *Coveral* GR-2815 dan mensinkronkan dengan hasil yang didapatkan dengan SEM. Dari Gambar 4.2 terlihat bahwa penghalus butir ini terkandung atas senyawa K_2TiF_6 , $FeTa_3S_6$, $Na_6SiO_2 \cdot 11H_2O$, dan Sr_2BrP . Hal ini sesuai dengan hasil yang didapatkan dengan SEM, dimana unsur K dan F memiliki persentase paling banyak. Namun, unsur lain seperti Fe, Ta, Br, Si, dan P tidak ditemukan pada pengujian SEM, hal ini diperkirakan paada saat pengambilan data dengan SEM radius penembakan pada sampel tidak terlalulu luas, sehingga unsur yang penyebarannya tidak merata tidak seutuhnya terditeksi. Dari hasil XRD unsur boron masih tidak dapat ditemukan.

Tabel 4.2. Komposisi kimia *grain refiner* berdasarkan analisa SEM^[33]

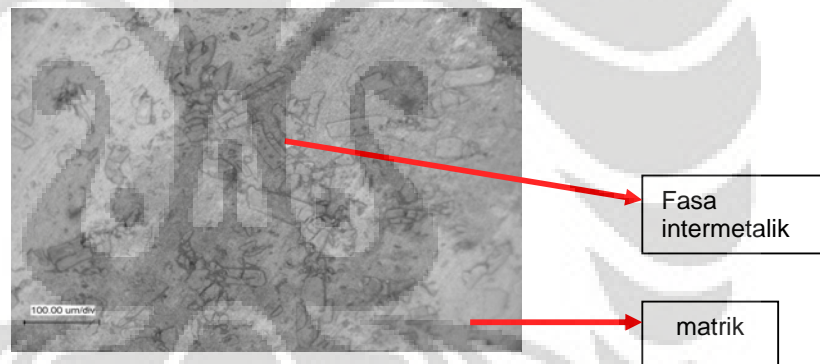
Unsur	Komposisi (wt. %)
F	34,15
Na	0,55
Cl	1,34
K	32,84
Ti	14,95



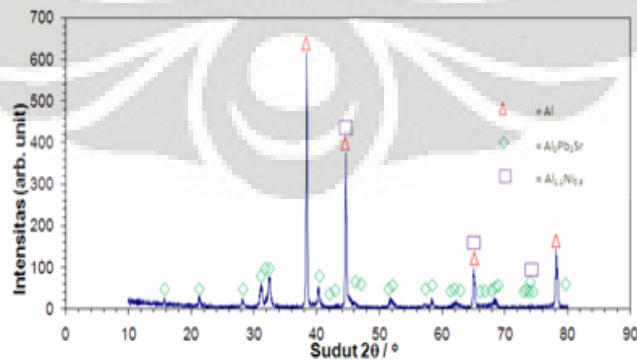
Gambar 4.2 Hasil XRD *flux Coveral* GR 2815.

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

Pada Gambar 4.3 terlihat hasil pengamatan struktur mikro dari *master alloy* Al-10Sr. Dari gambar terlihat adanya 2 jenis bentuk penampakan dari *master alloy* Al-10Sr, partikel-partikel besar yang berbentuk balok diperkirakan fasa intermetalik dari Al_4Sr . Serta, matrik utama dari *master alloy* Al-10Sr yang berwarna abu-abu terang yang merupakan fasa eutektik dari Al- Al_4Sr . Pada literatur, *master alloy* Al-10Sr terdiri atas eutektik Al- Al_4Sr dan pelat-pelat besar intermetalik Al_4Sr . Pada Gambar 4.4 terlihat hasil pengujian XRD dari *master alloy* Al-10Sr. pada gambar terlihat bahwa *master alloy* Al-10Sr tersusun atas Al, $\text{Al}_2\text{Pb}_2\text{Sr}$, dan AlNi . Bila dibandingkan dengan literatur, stronsium dalam *master alloy* Al-10-Sr berada didalam persenyawaan Al- Al_4Sr dan Al_4Sr , hal ini berbeda dengan hasil yang didapatkan pada XRD^[4]. Ketika *master alloy* ini ditambahkan ke paduan Al-Si cair akan terjadinya pelarutan $\text{Al}_2\text{Pb}_2\text{Sr}$ sehingga stronsium dapat memodifikasi kristal silikon.



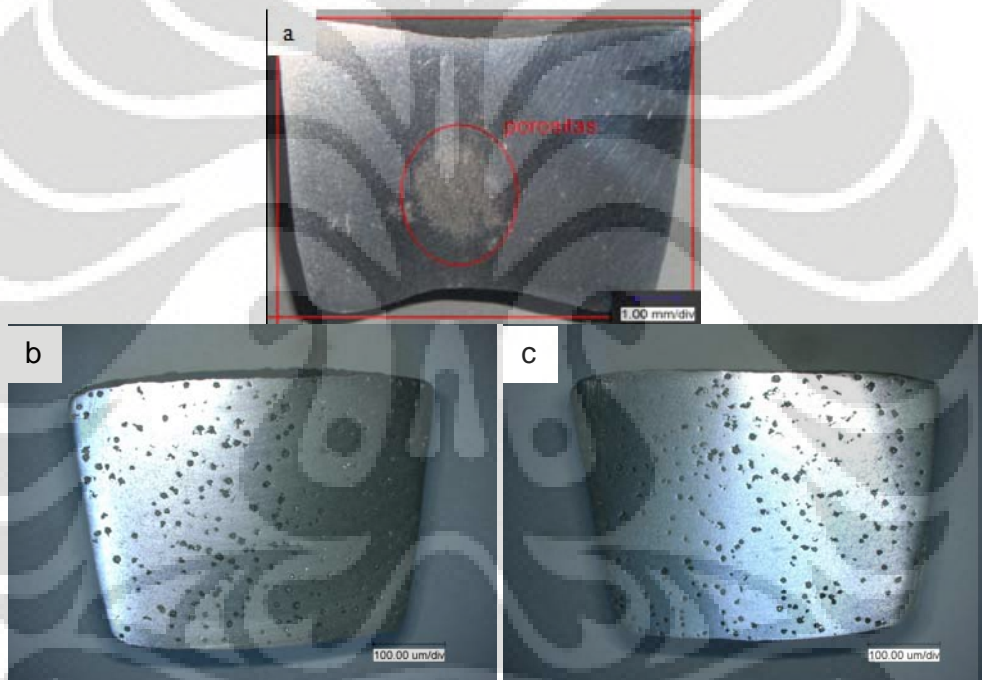
Gambar 4.3 Struktur mikro master alloy Al-10Sr.



Gambar 4.4 Hasil XRD master alloy Al-10 Sr.

4.3 Analisa Pemudaran Pengaruh Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Porositas Paduan Aluminium AC4B

Pada Gambar 4.5 terlihat foto makro hasil pengujian porositas pada paduan aluminium AC4B dengan komposisi normal, serta pada 0 menit dan 120 menit waktu tahan dari paduan AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr. Pada gambar terlihat hasil yang didapatkan baik pada 0 menit maupun 120 menit waktu tahan, porositas yang terbentuk terdistribusi secara merata pada bagian benda uji. Sedangkan, pada keadaan normal porositas yang terbentuk terkonsentrasi hanya pada satu daerah tertentu dari benda uji.



Gambar 4.5 Penampang potongan sampel uji porositas paduan AC4B; (a) komposisi normal, dan pada komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr (b) 0 menit waktu tahan, (c) 120 menit waktu tahan.

Hasil pengujian metalografi kuantitatif terhadap fraksi volume porositas pada permukaan benda uji vacuum disajikan Tabel 4.3. Dari tabel tersebut terlihat bahwa, pada komposisi normal paduan AC4B didapatkan fraksi volume porositas sebesar 3, sedangkan pada komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr baik pada 0 menit dan 120 menit waktu tahan, fraksi volume porositas ditemukan sebesar 16 dan 11. Sehingga dapat terlihat bahwa terjadi peningkatan fraksi porositas sebesar 433 % pada paduan AC4B komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap

Universitas Indonesia

paduan dengan komposisi normal. Dan pada 120 menit waktu tahan, porositas mengalami penurunan sebesar 25 % terhadap 0 menit penambahan. Serta bila mengacu pada standar ASM pengujian vacuum^[4], paduan AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr baik pada 0 menit ataupun 120 menit waktu tahan, porositas yang terbentuk berada pada kelas # 5.

Tabel 4.3 Hasil penghitungan fraksi volume porositas dengan metode grid (ASTM E562)

Karakteristik paduan AC4B	Fraksi volume porositas (%)
0 wt. %	3
0.120 wt. % + 0.018 wt. % Sr (0 menit)	16
0.120 wt. % + 0.018 wt. % Sr (120 menit)	11

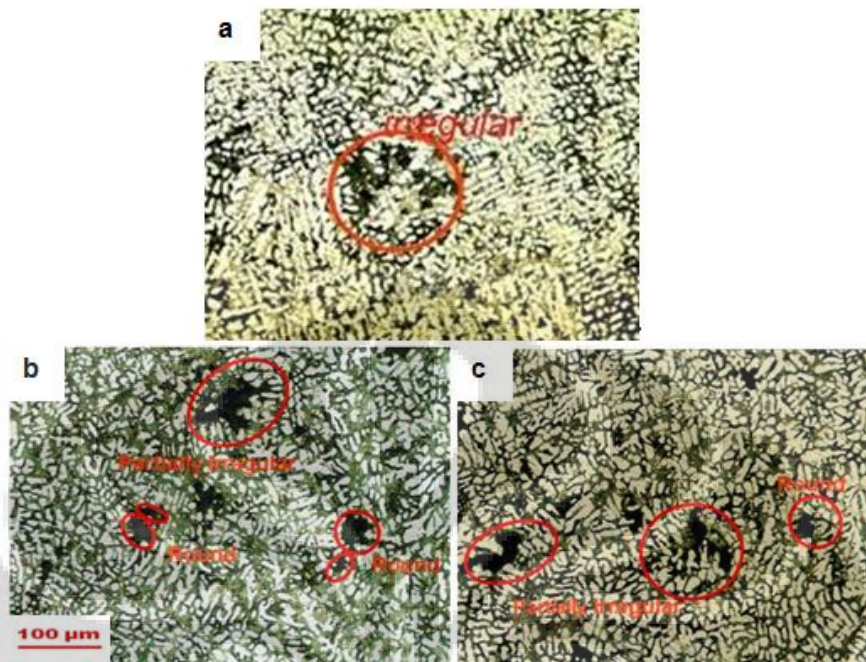
Porositas dalam pengecoran logam akan berpengaruh terhadap penurunan sifat mekanis dari material. Terutama berdampak buruk bagi keuletan, ketangguhan, sifat fatik, dan sifat permukaan material^[36]. Dari literatur dijelaskan bahwa penambahan unsur modifikasi Sr secara signifikan mengubah distribusi dan morfologi porositas dalam paduan, sehingga penambahan dari Sr mengurangi porositas di satu tempat wilayah benda coran dan porositas yang terbentuk menjadi lebih baik (tersebar merata dan bulat)^[37]. Hal ini terbukti dimana pada Gambar 4.5 dapat kita lihat bahwa persebaran dari porositas terjadi secara merata pada bagian benda uji. Fang dan Granger^[36] dalam penelitiannya menemukan bahwa penambahan modifikasi stronsium pada paduan A356 meningkatkan fraksi volume dan ukuran pori dalam konten hidrogen yang sama, bila dibandingkan dengan tanpa modifikasi. Unsur modifikasi akan menurunkan tegangan permukaan pada aluminium cair, yang mempermudah terjadinya nukleasi pori. Sehingga dengan jumlah kandungan inklusi yang tinggi akibat pengaruh modifikasi menyebabkan semakin mudahnya pori yang terbentuk pada paduan.

Sementara itu, dengan hadirnya penghalus butir akan menurunkan volume porositas dan pemerataan distribusi porositas di dalam logam aluminium paduan^[32]. Sigworth^[36] dalam penelitiannya menegaskan, keuntungan dari penambahan penghalus butir yang utama adalah perbaikan volume dan distribusi

porositas, serta penyusutan pada paduan yang cenderung membentuk mikroporositas. Pada penelitian ini peningkatan kandungan porositas yang terjadi tidak sebatas karena penambahan kedua unsur. Hal lain yang dapat memicu peningkatan porositas adalah banyaknya kontak langsung antara aluminium cair dengan udara luar baik pada saat penambahan maupun saat pengambilan spesimen uji.

Gambar 4.6 memperlihatkan bentuk morfologi dari porositas pada paduan aluminium AC4B hasil dari pengamatan dengan menggunakan mikroskop optik dari sampel uji fluiditas pada paduan dengan komposisi normal dan pada paduan dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr. Dari gambar terdapat tiga jenis bentuk morfologi dari mikro porositas paduan aluminium, yaitu berbentuk *irregular* (tidak beraturan), *partially irregular* dan *round* (bulat). Pada sampel paduan AC4B dengan komposisi normal, terlihat bentuk morfologi porositas yang dominan berbentuk *irregular*. Sedangkan pada komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr, morfologi porositas terbentuk berubah menjadi campuran dari bentuk bulat dan sebagian berbentuk *partially irregular*. Pada pengamatan 120 menit waktu tahan morfologi porositas yang dominan berbetuk *partially irregular*.

Bentuk morfologi dari porositas ini dipengaruhi oleh bentuk dendrit dan fasa eutektik yang terbentuk pada proses pembekuan aluminium paduan. Dengan kehadiran penghalus butir Ti dan unsur modifikasi Sr, porositas yang awalnya bertumbuh pada bagian *interdendritik* mengikuti pola dendrit yang kasar dan bercabang. Namun, setelah penambahan kedua unsur, dendrit menjadi halus membuat porositas yang terbentuk mengikuti pola dendrit sehingga morfologi yang terbentuk menjadi bulat dan *partially irregular*. Namun, dengan semakin berkurangnya keefektifan dari kedua unsur yang ditambahkan, membuat dendrit kembali berbentuk sedikit kasar, sehingga porositas pun cenderung berbentuk *partially irregular*.



Gambar 4.6 Perbandingan morfologi mikro porositas pada sampel fluiditas paduan AC4B; (a) komposisi normal dan pada komposisi 0.12 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr (b) 0 menit waktu tahan, (c) 120 menit waktu tahan.

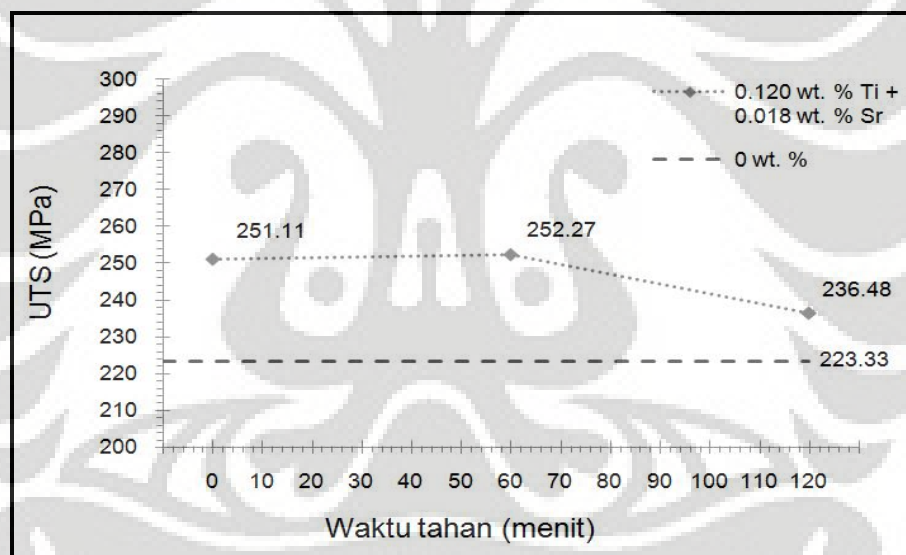
Dari pengamatan terhadap pemudaran kedua unsur ini juga terlihat bahwa, dengan berkurangnya kadar dari penghalus butir Ti dan unsur modifikasi Sr. Maka keefektifan kedua unsur juga ikut berkurang, yang berdampak terhadap semakin menurunnya porositas dari cairan aluminium bila dibandingkan dengan keadaan pada awal pengamatan proses pemudaran.

4.4 Analisa Pemudaran Pengaruh Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium AC4B

4.4.1 Analisa Pemudaran Pengaruh Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Sifat Kekuatan Tarik Paduan Aluminium AC4B

Pada Gambar 4.7 terlihat nilai UTS dari paduan AC4B pada keadaan komposisi normal sebesar 223.33 MPa dan ketika komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr sebesar 251.11 MPa. Dengan kata lain terjadi peningkatan UTS paduan AC4B sebesar 27.78 MPa atau 12.4 %. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kedua unsur secara bersamaan, baik penghalus butir maupun unsur modifikasi dapat meningkatkan kekuatan tarik dari paduan. Pengalus butir Ti

berperan dalam mereduksi ukuran butir yang nantinya berakibat terhadap semakin meningkatnya jumlah batas butir sehingga dislokasi menjadi menumpuk atau terhalang dan mengakibatkan sifat mekanis dari paduan meningkat termasuk nilai UTS paduan. Sedangkan efek yang ditimbulkan dari unsur modifikasi Sr berkenaan dengan kondisi struktur mikro dari paduan. Kristal silikon pada paduan yang berbentuk pelat kasar yang tajam (*acicular*), akan berpotensi menjadi konsentrasi tegangan sehingga menyebabkan material dengan struktur ini cenderung bersifat getas. Namun, ketika unsur modifikasi Sr ditambahkan, terjadi perubahan struktur silikon primer yang semula berbentuk *acicular* menjadi *fibrous* atau *lamellar*. Struktur ini akan menyebabkan peningkatan dalam jumlah partikel serta menurunkan jarak antar partikel, sehingga meningkatkan sifat mekanis dari paduan^[31].

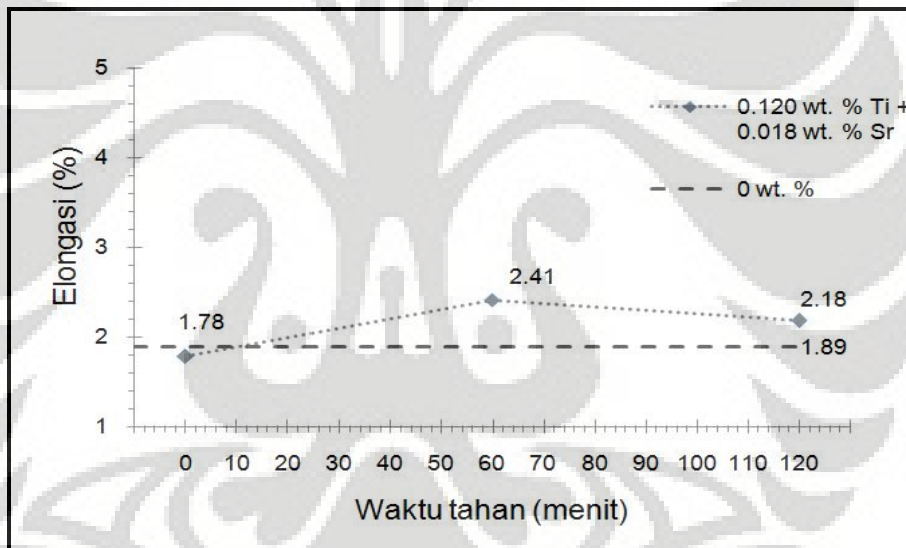


Gambar 4.7 Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap nilai UTS paduan AC4B.

Dari Gambar 4.7 juga dapat diamati efek pemuatan dari komposisi 0.120 wt.% Ti dan 0.018 wt.% Sr. Pada 60 menit waktu tahan nilai UTS mengalami sedikit peningkatan sebesar 1.16 MPa atau 0.46 % yaitu menjadi 252.27 MPa terhadap kondisi 0 menit waktu tahan/awal penambahan. Ketika 120 menit waktu tahan penurunan nilai UTS terjadi, dimana nilai UTS yang didapatkan sebesar 236.48 MPa, mengalami penurunan sebesar 14.63 MPa atau 5.8 % dari 0 menit waktu tahan. Dari data terdapat sedikit penyimpangan, semestinya seiring dengan

meningkatnya waktu tahan, maka intensitas dari penambahan kedua unsur akan mengalami penurunan, sehingga efektifitas dari kedua unsur akan berkurang.

Ketidak sesuai ini diperkirakan terjadi akibat terdapatnya inklusi/pengotor pada sampel uji tarik awal penambahan. Inklusi menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada sampel uji, yang menjadi awal inisiasi retak untuk muncul. Serta, keberadaan inklusi pada sampel uji tarik, menyebabkan perpatahan pada saat pengujian terjadi di luar daerah *gauge length*. Kehadiran inklusi pada sampel uji tarik diperkirakan karena proses *skimming* yang kurang sempurna pada cairan aluminium dalam proses pembuatan sampel uji tarik tersebut, sehingga terak dan pengotor lainnya yang berada pada permukaan cairan aluminium ikut terangkat.



Gambar 4.8 Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap % elongasi paduan AC4B.

Pada Gambar 4.8 dapat terlihat nilai elongasi dari pengujian tarik paduan AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr. Dimana, dengan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi mengakibatkan terjadinya penurunan terhadap nilai elongasi paduan AC4B dari sebesar 1.89 % menjadi 1.78 % terhadap paduan AC4B pada komposisi normal. Pada pengamatan 60 menit waktu tahan nilai elongasi mengalami peningkatan yang sangat signifikan bahkan melebihi nilai elongasi tanpa penambahan yaitu menjadi 2.41 % dan pada 120 menit waktu tahan % elongasi kembali mengalami penurunan menjadi 2.18 %.

Universitas Indonesia

Data yang didapatkan ini tidak sesuai dengan literatur yang ada, seharusnya dengan penambahan kedua unsur ini akan meningkatkan nilai elongasi dari paduan AC4B. Ketidaksesuaian hasil yang didapatkan dengan literatur diperkirakan terjadi akibat keberadaan inklusi sebagai mana telah dijelaskan sebelumnya.

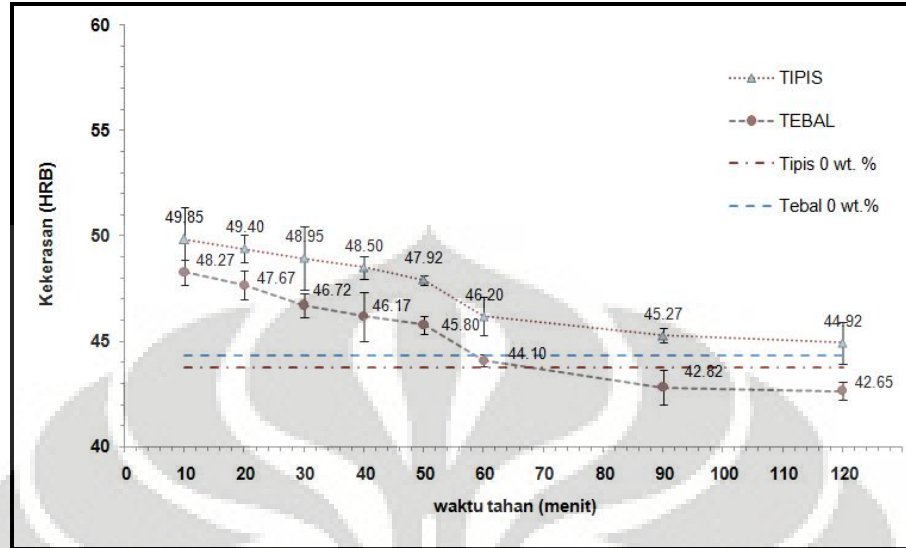


Gambar 4.9 Penampang patahan uji tarik komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr pada awal penambahan.

Sehingga dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr dapat meningkatkan nilai UTS paduan AC4B bila dibandingkan dengan paduan AC4B pada komposisi normal. Namun, mekanisme pemudaran dari keberadaan kedua unsur, belum seutuhnya menggambarkan proses pemudaran yang terjadi karena data yang didapatkan belum mempresentasikan pemudaran tersebut. Adapun faktor yang mempengaruhi hal ini diperkirakan karena keberadaan inklusi serta parameter proses pengambilan sampel uji tarik yang tidak terkontrol.

4.4.2 Analisa Pemudaran Pengaruh Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap Kekerasan Paduan Aluminium AC4B

Pada Gambar 4.10 terlihat pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap paduan AC4B dengan komposisi normal. Pada bagian tipis terlihat terjadinya peningkatan kekerasan sebesar 5.5 HRB atau 12.4 %, dari 44.35 HRB menjadi 49.85 HRB. Begitu juga dengan kekerasan pada daerah tebal, kenaikan kekerasan dari 43.75 HRB menjadi 48.27 HRB, dengan kata lain mengalami kenaikan sebesar 4.52 HRB atau 10.3 %.



Gambar 4.10 Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap nilai kekerasan komponen cylinder head AC4B.

Terjadinya peningkatan kekerasan akibat dampak dari penambahan penghalus butir Ti dan unsur modifikasi Sr, dimana unsur modifikasi berperan dalam perubahan struktur silikon primer yang semula berbentuk *acicular* menjadi *fibrous* atau menjadi lebih halus, bulat dan penyebarannya merata. Dengan bentuk silikon primer yang *fibrous* mengakibatkan konsentrasi tegangan pada paduan AC4B menjadi lebih rendah sehingga menyebabkan semakin meningkatnya sifat mekanis dari paduan, termasuk peningkatan kekerasan. Didukung dengan hadirnya unsur penghalus butir yang menyebabkan semakin halusnya ukuran butir, berakibat terhadap terhambatnya dislokasi sehingga kekerasan meningkat. Hal ini sesuai dengan literatur, dimana penambahan kedua unsur modifikasi dan penghalus butir secara bersamaan akan berdampak terhadap kenaikan nilai kekerasan dari paduan aluminium^[31].

Pengamatan terhadap mekanisme pemuatan juga dapat terlihat pada Gambar 4.10, dimana dengan seiring berjalannya waktu tahan kekerasan paduan semakin mengalami penurunan. Pada waktu pengamatan 10 menit hingga 50 menit, penurunan kekerasan tidak terlalu signifikan, baik pada bagian tipis maupun bagian tebal komponen *cylinder head*. Adapun nilai kekerasan bagian tipis komponen *cylinder head* pada pengamatan 10 sampai 50 menit yaitu; 49.85

HRB, 49.40 HRB, 48.95 HRB, 48.50 HRB, 47.92 HRB. Dan nilai kekerasan dari bagian tebal komponen *cylinder head*, 10 hingga 50 menit waktu tahan yaitu; 48.27 HRB, 47.67 HRB, 46.72 HRB, 46.17 HRB, 45.80 HRB.

Pada pengamatan 60 menit waktu tahan terlihat terjadi penurunan yang signifikan terhadap kekerasan komponen *cylinder head* pada kedua bagian. Nilai kekerasan pada 60 menit waktu tahan pada bagian tipis mengalami penurunan nilai kekerasan 3.65 HRB atau 7.3 % sehingga kekerasan menjadi 46.20 HRB terhadap nilai kekerasan 10 menit waktu tahan. Penurunan terus berlanjut hingga di akhir pengamatan mekanisme pemudaran, dengan nilai kekerasan pada 90 menit dan 120 menit masing-masingnya sebesar 45.27 HRB dan 44.92 HRB. Sedangkan pada bagian tebal, penurunan nilai kekerasan yang terjadi sebesar 4.17 HRB atau 8.6 % menjadi 44.1 HRB terhadap nilai kekerasan 10 menit waktu tahan. Nilai kekerasan bagian tebal pada pengamatan 90 menit dan 120 menit masing-masing 42.82 HRB dan 42.65 HRB.

Penurunan nilai kekerasan yang terjadi mengindikasikan bahwa keefektifan dari penghalus butir dan unsur modifikasi dalam paduan mulai berkurang, dengan kata lain mekanisme pemudaran pada paduan telah berlangsung. Seiring dengan terjadinya penurunan nilai kekerasan yang signifikan, menandakan bahwa kecepatan pemudaran dari kehadiran kedua unsur pada paduan AC4B berjalan lebih cepat. Namun, antara waktu tahan 90 menit dengan 120 menit tidak terlalu terlihat penurunan nilai kekerasan. Hal ini diperkirakan terjadi akibat kondisi cairan aluminium dalam *holding furnace* pada mesin LPDC dalam kondisi yang minimum, sehingga ada kecenderungan terjadinya sedikit pengadukan akibat tekanan yang dilakukan mesin dalam memproduksi *cylinder head*, dimana pada pengamatan 120 menit waktu tahan tekanan mesin LPDC mempunyai tekanan sebesar 268 kPa lebih besar 12 kPa dari keadaan awal yakni sebesar 256 kPa. Namun, pengadukan yang terjadi pada cairan aluminium tidak secara keseluruhan, dimana unsur modifikasi dan penghalus butir yang telah mengendap pada dasar *holding furnace* (yang merupakan mekanisme pemudaran yang telah yang diperkirakan dan diterangkan pada subbab sebelumnya) sebagian kembali teraktifasi dan sebagian tetap mengendap pada dasar *holding furnace*.

Dengan demikian dengan seiring berjalannya waktu tahan nilai kekerasan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr akan mengalami penurunan. Terjadinya penurunan kekerasan secara signifikan menandakan proses pemudaran yang terjadi berjalan lebih cepat.

4.5 Analisa Pemudaran Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Fluiditas Aluminium AC4B

Pada Gambar 4.11 terlihat hasil pengujian fluiditas terhadap paduan AC4B komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr. Secara visual dapat terlihat bahwa dengan semakin lamanya waktu pengamatan maka fluiditas yang dihasilkan semakin menurun dari keadaan pada saat awal pengamatan proses pemudaran.

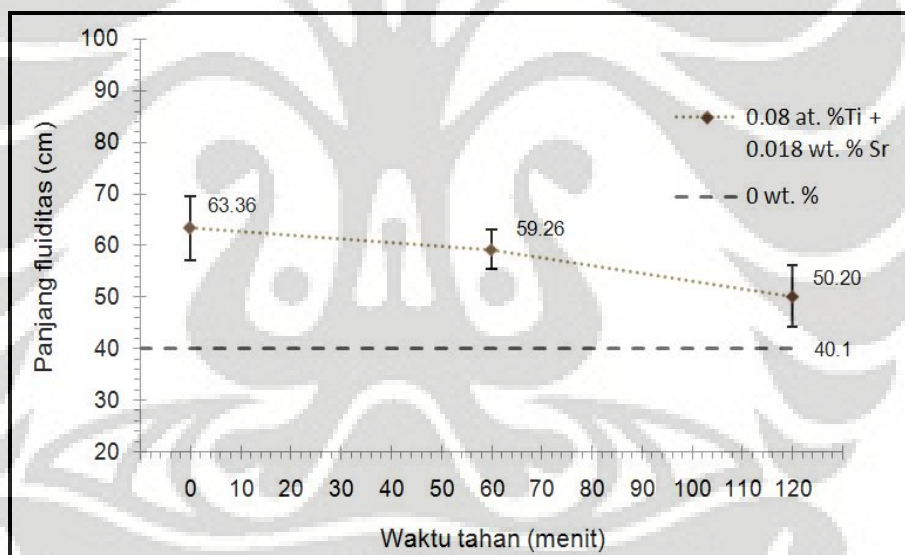


Gambar 4.11 Perbandingan nilai fluiditas paduan AC4B komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr pada pengamatan; (a) 0 menit; (b) 60 menit dan; (c) 120 menit.

Pada Gambar 4.12 terlihat nilai fluiditas dari paduan AC4B baik sebelum komposisi normal maupun setelah komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr. Dari gambar, terlihat bahwa pada komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr nilai fluiditas mengalami peningkatan dari 40.1 cm menjadi 61.7 cm terhadap komposisi normal paduan, dengan kata lain mengalami peningkatan sebesar 21.6 cm atau 53.8 %. Peningkatan nilai fluiditas ini merupakan dampak dari

Universitas Indonesia

penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi. Unsur modifikasi yang dalam hal ini stronsium, berperan dalam menurunkan temperatur eutektik nukleasi dan pertumbuhan pada paduan, yang menyebabkan *range* pembekuan akan menjadi lebih pendek sehingga diperoleh peningkatan kemampuan alir dari paduan^[5]. Sedangkan dengan adanya penghalus butir berdampak terhadap penurunan dari fluiditas paduan, penghalus butir Ti meningkatkan temperatur nukleasi, sehingga pada saat nukleasi awal terdapat aliran *slurry* (padatan dengan cairan). *Slurry* mengalir lebih lambat dari cairan biasa, hal inilah yang menyebabkan fluiditas menurun. Namun, dari literatur didapatkan bahwa penambahan kedua unsur akan memperbaiki fluiditas dari paduan pada keadaan tanpa penambahan, dengan penambahan unsur modifikasi saja, ataupun dengan penambahan penghalus butir saja^[40].



Gambar 4.12 Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap panjang fluiditas paduan AC4B.

Pada Gambar 4.12 juga dapat terlihat nilai fluiditas paduan terhadap efek pemudaran, dimana pada 60 menit pengamatan terlihat terjadinya penurunan nilai fluiditas dari paduan menjadi 59.625 cm, penurunan tersebut terus berlangsung hingga pada 120 menit pengamatan menjadi 49.375 cm. Penurunan nilai fluiditas dari paduan AC4B menandakan keefektifan dari penambahan kedua unsur mengalami penurunan seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya. Namun,

penurunan yang terjadi pada nilai fluiditas paduan tidak semata-mata di karenakan oleh unsur kandungan pada paduan, melainkan terdapat tiga parameter yang mempengaruhi fluiditas dari paduan. Ketiga parameter ini harus bisa dijaga guna mendapatkan fluiditas yang baik, adapun ketiga parameter ini, yaitu variabel logam (seperti komposisi kimia, range pembekuan, viskositas, dan difusi panas), variabel cetakan (koefisien transfer panas, konduktifitas termal logam dan cetakan, *specific heat* , dan tegangan permukaan), serta variabel pada saat pengujian (diameter channel, temperatur tuang, serta kandungan inklusi)^[38].

Dengan demikian komposisi 0.120 wt.% Ti dan 0.018 wt.% Sr pada paduan AC4B dapat meningkatkan nilai fluiditas paduan. Dan seiring dengan berjalannya waktu tahanan, menyebabkan keefektifan dari penghalus butir dan unsur modifikasi ikut berkurang, yang berdampak terhadap penurunan nilai fluiditas dari paduan AC4B.

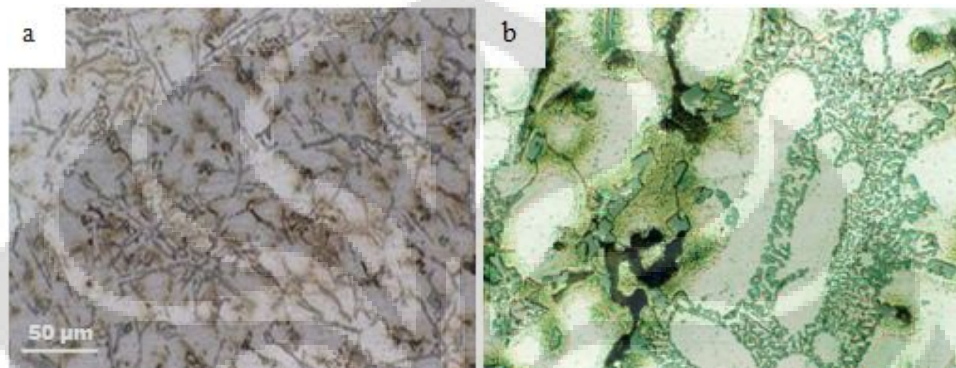
4.6 Analisa Pemudaran Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr Terhadap Struktur Metalografi Aluminium AC4B

4.6.1 Pengamatan Mikroskop Optik

Pada Gambar 4.13 terlihat perbedaan struktur mikro dari paduan AC4B pada komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr dengan paduan AC4B pada komposisi normal. Pada gambar, terlihat bahwa terjadinya perubahan pada struktur silikon eutektik yang semula berbentuk pelat-pelat yang tajam menjadi *fibrous* yang halus dan tersebar merata. Berdasarkan standar ASM mengenai derajat modifikasi yang terjadi, komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr paduan AC4B berada pada tingkatan derajat modifikasi kelas E dengan struktur silikon *fibrous*^[1].

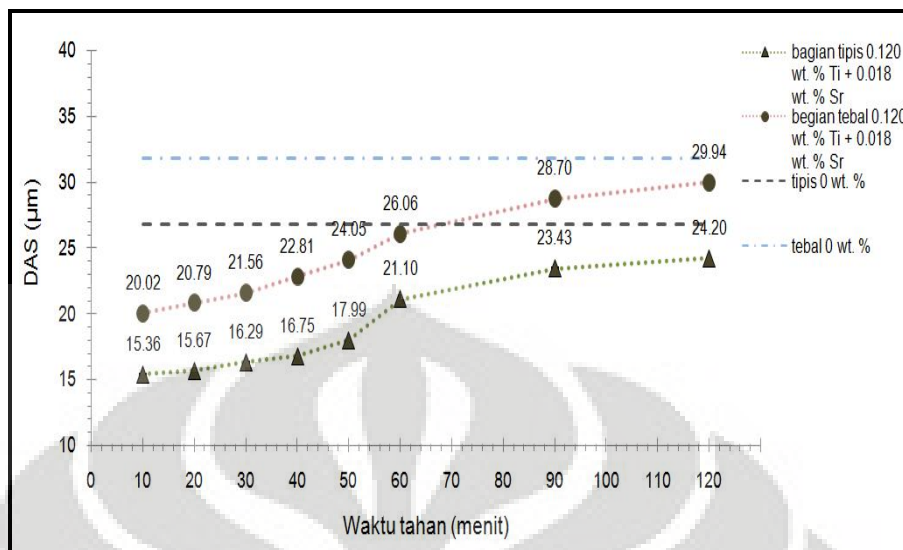
Analisa kuantitatif pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr, dilakukan dengan penghitungan nilai *dendrit arm spacing* (DAS) pada paduan. Nilai DAS dari komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr, dapat dilihat pada Gambar 4.13. Pada gambar terlihat bahwa nilai DAS AC4B komposisi normal pada daerah tipis sebesar 26.76 μm dan pada daerah tebalnya sebesar 31.81 μm . Bila dibandingkan dengan keadaan setelah penambahan, nilai DAS mengalami penurunan. Pada daerah tipis nilai DAS menurun sebesar 42.6 % sehingga nilai

DAS menjadi 15.36 μm . Sedangkan pada daerah tebal terjadi penurunan sebesar 37 %, dengan nilai DAS-nya menjadi 20.02 μm . DAS merupakan jarak antar lengan dendrit, yang dapat mempengaruhi sifat mekanis paduan aluminium. Dimana, semakin kecil DAS maka nilai kekuatan paduan aluminium semakin meningkat dan elongasinya juga bertambah besar^[14].



Gambar 4.13 Struktur mikro paduan AC4B, (a) komposisi normal, (b) komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.

Data yang didapatkan sesuai dengan literatur, penelitian yang dilakukan A.K Prasada Rao *et al*^[31] pada paduan Al-7Si diberikan kombinasi antara penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi. Didapat bahwa, dengan kombinasi penambahan kedua unsur tersebut nilai DAS yang diperoleh akan menjadi lebih rendah bila dibandingkan dengan tanpa penambahan apapun, penambahan penghalus butir saja, ataupun dengan penambahan modifikasi saja. Nilai DAS dari suatu paduan aluminium dipengaruhi oleh cepat lambatnya proses pembekuan pada proses pengecoran. Nilai DAS mengecil dengan laju pembekuan yang cepat dapat terjadi dengan melakukan penambahan penghalus butir Ti, dimana telah dijelaskan sebelumnya keberadaan penghalus butir Ti dapat meningkatkan temperatur nukleasi yang membuat laju pembekuan berjalan cepat. Dengan cepatnya laju nukleasi berjalan menyebabkan butir akan semakin halus.



Gambar 4.14 Pengaruh komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap nilai DAS AC4B.

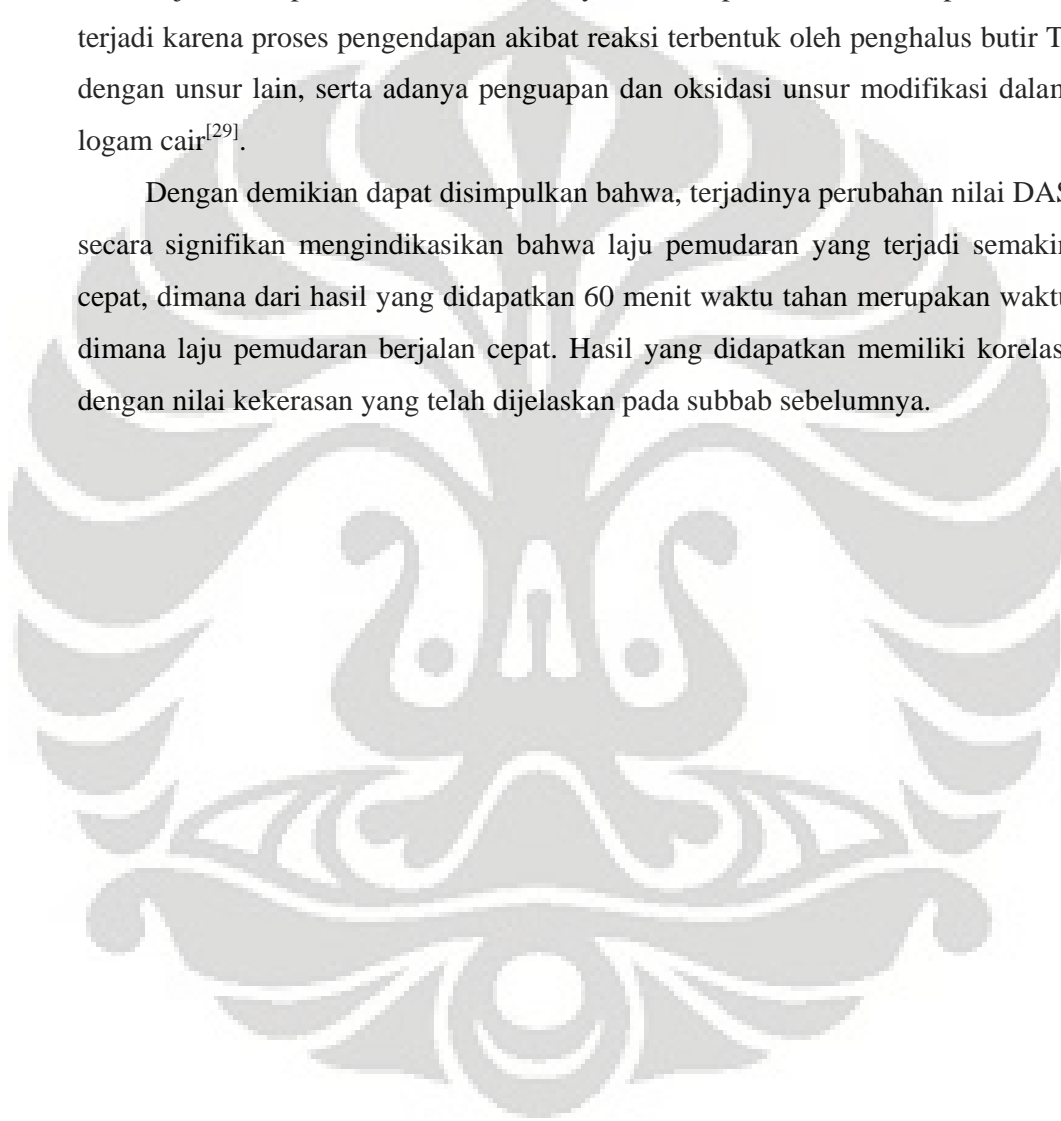
Pada Gambar 4.15 dapat terlihat bentuk mikrostruktur dari paduan AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terhadap peningkatan waktu tahan pada dengan proses LPDC. Gambar 4.14 memperlihatkan pengaruh pemudaran terhadap nilai DAS yang terbentuk. Dimana dapat terlihat terjadinya kecenderungan peningkatan nilai DAS seiring dengan bejalannya waktu tahan baik pada bagian tipis maupun bagian tebal dari komponen *cylinder head*. pada bagian tipis *cylinder head*, peningkatan nilai DAS cenderung konstan pada 50 menit awal pengamatan, adapun nilai DAS bagian tipis, dari 10-50 menit pengamatan berturut-turut; 15.36 µm, 15.67 µm, 16.29 µm, 16.75 µm, dan 17.99 µm. Dan nilai DAS dari bagian tebal pada 10-50 menit pengamatan yaitu; 20.02 µm, 20.79 µm, 21.56 µm, 22.81 µm, dan 24.05 µm.

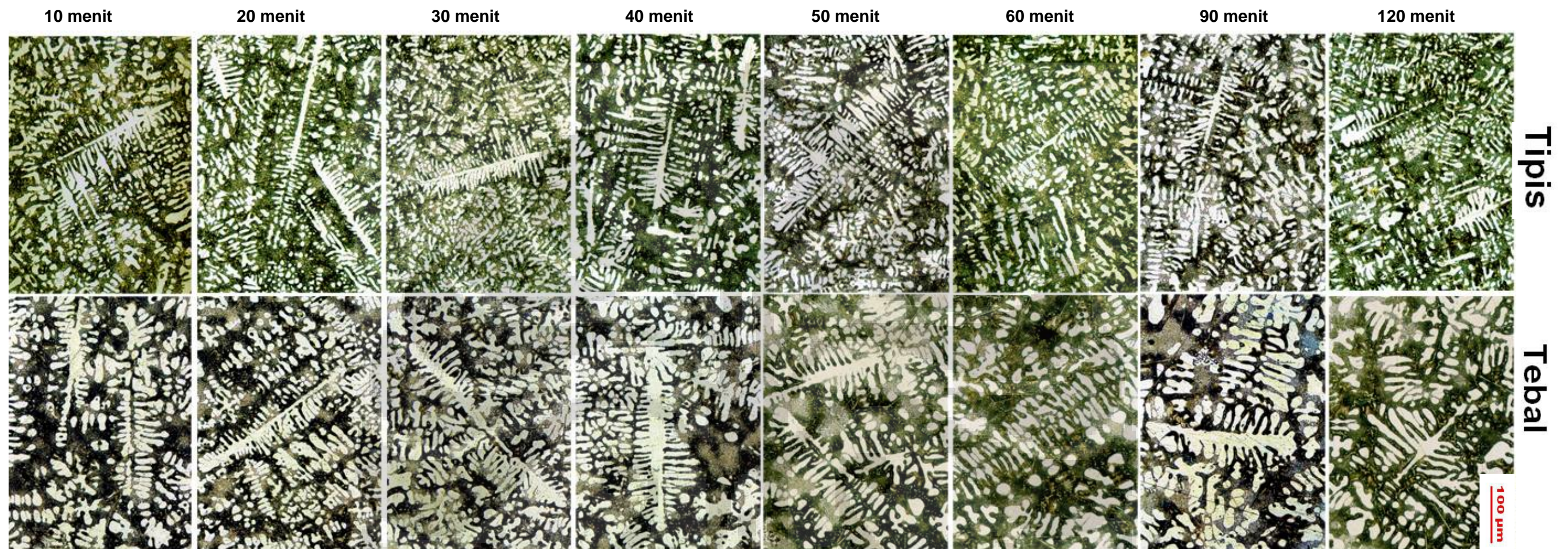
Pola kenaikan nilai DAS pada bagian tipis maupun bagian tebal terlihat signifikan setelah 60 menit waktu tahan. Dimana pada bagian tipis terjadi peningkatan sebesar 37.4 % menjadi 21.10 µm terhadap nilai DAS pada 10 menit waktu tahan. Hingga akhir pengamatan nilai DAS tetap mengalami kenaikan, adapun nilai DAS bagian tipis pada 90 menit dan 120 menit waktu pudar masing-masing 23.43 µm dan 24.20 µm. Sedangkan nilai DAS bagian tebal pada 60 menit waktu tahan mengalami kenaikan sebesar 30.2 % menjadi 26.06 µm terhadap nilai

DAS pada 10 menit waktu tahan. Dan nilai DAS bagian tebal pada 90 menit dan 120 menit waktu pudar masing-masing 28.70 μm dan 29.94 μm .

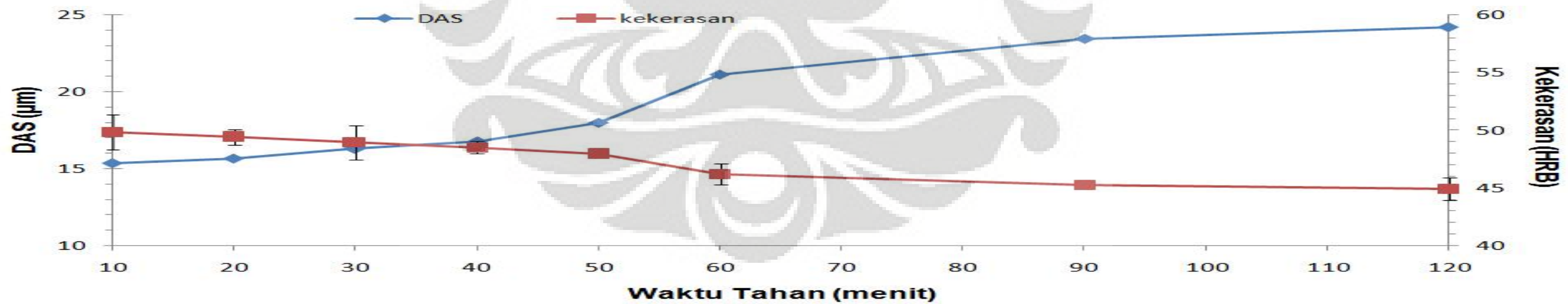
Dengan terjadinya kenaikan terhadap nilai DAS dengan seiring berjalannya waktu tahan, mengindikasikan bahwa terjadinya proses pemudaran pada aluminium AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr. Dimana telah dijelaskan pada subbab sebelumnya bahwa pemudaran ini diperkirakan terjadi karena proses pengendapan akibat reaksi terbentuk oleh penghalus butir Ti dengan unsur lain, serta adanya penguapan dan oksidasi unsur modifikasi dalam logam cair^[29].

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa, terjadinya perubahan nilai DAS secara signifikan mengindikasikan bahwa laju pemudaran yang terjadi semakin cepat, dimana dari hasil yang didapatkan 60 menit waktu tahan merupakan waktu dimana laju pemudaran berjalan cepat. Hasil yang didapatkan memiliki korelasi dengan nilai kekerasan yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya.





Gambar 4.15 Struktur mikro *cylinder head* AC4B komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr bagian tipis dan tebal pada waktu tahan 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit



Gambar 4.16 Hubungan kekerasan dan DAS *cylinder head* AC4B terhadap waktu tahan.

4.6.2 Pengamatan SEM dan EDX

Pada Gambar 4.17 terlihat hasil pengamatan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDX (*Energy Dispersive X - Ray Analysis*) terhadap komponen *cylinder head* paduan aluminium AC4B pada komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr. Analisa terhadap hasil SEM dilakukan berdasarkan bentuk morfologi dan warna yang ditampilkan, serta komposisi kimia fasa-fasa yang ada. Untuk mengetahui fasa yang mungkin hadir, dilakukan perbandingan hasil yang didapatkan dengan literatur yang ada, dengan memperhatikan komposisi mayoritas pembentuk fasa tersebut. Hasil analisa komposisi mikro menggunakan EDX pada setiap titik di Gambar 4.17 ditabulasikan pada Tabel 4.4.



Gambar 4.17 Struktur mikro (SEM) paduan aluminium AC4B komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.

Pada Gambar 4.17 ditemukannya keberadaan Ti yang bereaksi dengan Al membentuk $TiAl_3$, Ti berperan sebagai pembentuk inti dan sekaligus unsur penghalus butir. Selain juga ditemukan fasa intermetalik yang seperti Al_2Cu dan $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$. Fasa intermetalik ini merupakan fasa kedua yang mengendap pada paduan aluminium, yang terbentuk akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Terbentuknya fasa intermetalik karena adanya unsur Fe dan Mn yang berlebih, unsur Fe dan Mn pada aluminium memiliki kelarutan

yang rendah yaitu 0.052 wt % untuk Fe dan 1.82 wt % untuk Mn, sehingga Fe dan Mn tidak larut pada aluminium.

Tabel 4.4 Hasil analisa komposisi paduan aluminium AC4B kombinasi penambahan 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr

No. Titik	Unsur (wt. %)							Elemen lain	Warna	Fasa yang mungkin
	Al	Si	Ti	Sr	Cu	Fe	Mn			
1	28.9	9.94	3.4	-	73.26	37.91	-	Sisa	abu-abu	TiAl ₃ , Al ₂ Cu, AlSi
2	88.27	8.99	-	-	-	-	-	Sisa	abu-abu	Al-Si
3	26.17	0.68	-	-	70.61	-	-	Sisa	abu-abu	Al ₂ Cu, segregasi Si
4	78.31	1.29	-	-	13.1	-	-	Sisa	putih	Al ₂ Cu, Al, segregasi Si
5	45.7	5.78	-	-	12.55	22.67	5.9	Sisa	abu-abu	Al ₁₅ (Mn,Fe) ₃ Si ₂ , Al ₂ Cu

Pada Tabel 4.4 keberadaan unsur modifikasi Sr tidak ditemukan, hal bukan berarti unsur Sr tidak ada, diduga pada saat pengambilan data EDX tidak tepat mengenai tempat terdapatnya unsur Sr yang keberadaannya tidak merata di dalam paduan. Keberadaan unsur boron pada hasil EDX paduan aluminium AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr juga belum dapat diidentifikasi. Dapat diansumsikan bahwa keberadaan unsur boron sama halnya dengan Sr, tidak merata didalam paduan, atau unsur boron tidak terkandung dalam unsur penghalus butir *Coveral* GR-2815.

Sehingga pemudaran yang terjadi pada penambahan penghalus butir Ti dan unsur modifikasi yang sebelumnya diperkirakan akibat interaksi boron sebagai menghaluskan butir yang tercemar oleh stronsium yang membentuk senyawa SrB₆ yang memiliki berat jenis yang tinggi sekitar 3.422 g/cm³, serta interaksi unsur boron dengan penghalus butir titanium yang membentuk TiB₂ dengan berat jenis 4.5 g/cm³, dimana kedua senyawa ini akan mengalami pengendapan pada bagian bawah cairan sebagai akibat mempunyai berat jenis yang lebih tinggi dari aluminium yakni hanya sebesar 2.7 g/cm³^[29], tidak lagi dapat digunakan sebagai ansumsi penyebab dari proses pemudaran dari penghalus butir titanium. Namun, dengan ditemukannya TiAl₃ pada hasil SEM, mengindikasikan bahwa penyebab pemudaran dari penghalus butir pada paduan ini dapat diamsikan karena keberadaan TiAl₃ yang memiliki berat jenis yang lebih besar bila dibandingkan dengan aluminium cair yakni sebesar 3,35 g/cm³, sedangkan aluminium cair hanya memiliki berat jenis 2.7 g/cm³^[29].

Sementara itu unsur modifikasi bisa mengalami fenomena pemudaran karena terjadinya penguapan yang disebabkan tingginya tekanan uap pada temperatur peleburan, teroksidasi karena tingginya afinitas oksigen, ataupun bereaksi dengan elemen lain yang memiliki afinitas yang tinggi^[21]. Pada penelitian ini tidak ditemukan adanya interaksi antara penghalus butir dan unsur modifikasi.

4.7 Analisa Tingkat Kegagalan pada Komponen Cylinder Head terhadap Komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr paduan AC4B pada Proses Low Pressure Die Casting.

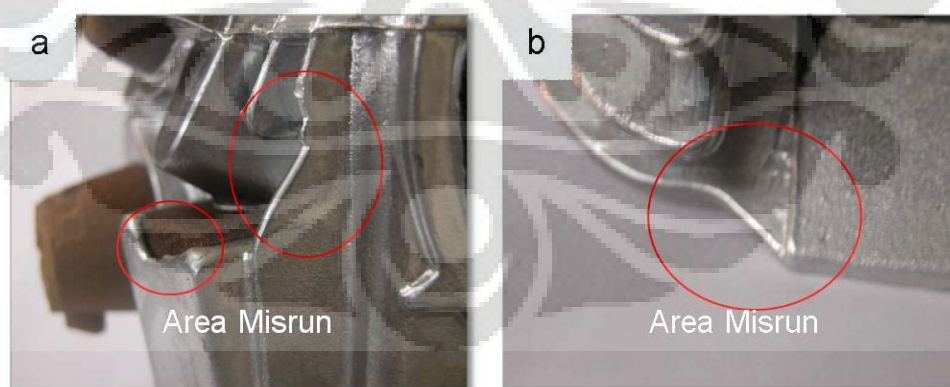
Dalam produksi komponen *cylinder head* terdapat tiga istilah dalam penanganan produk hasil produksi mesin *cylinder head*, yaitu *OK*, *reject* dan *repair*. Produk yang dinyatakan *OK* akan dilanjutkan ke proses selanjutnya, produk yang *reject* merupakan produk gagal yang siap untuk dilebur kembali, sedangkan *repair* merupakan produk yang memiliki cacat dan perlu penanganan khusus sebelum menjalani proses selanjutnya. Jenis cacat yang sering terjadi pada proses *low pressure dies casting* pada saat memproduksi komponen *cylinder head* yaitu berupa *misrun*, *shrinkage*, porositas, dan bocor. Keberadaan cacat ini sangat merugikan baik dari segi efisiensi waktu, tenaga, maupun biaya dalam proses produksi, serta merupakan pemicu kegagalan yang terjadi pada komponen *cylinder head*. Dari pembahasan subbab sebelumnya di jelaskan bahwa dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr, dapat meningkatkan sifat mekanis, mampu alir/fluiditas paduan dan ukuran butir yang semakin halus dari paduan AC4B. Dengan demikian, dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr pada paduan AC4B dirasa sangat efektif untuk diamplikasikan di PT AHM guna menanggulangi cacat ataupun kegagalan yang sering terjadi pada komponen *cylinder head* hasil proses *low pressure dies casting*, walaupun pemudaran tetap terjadi pada kedua unsur yang ditambahkan. Hal ini dapat terlihat pada Tabel 4.5, selama proses pengamatan terhadap paduan AC4B dengan komposisi 0.120 wt.% Ti dan 0.018 wt.% Sr hingga akhir pengamatan yaitu 120 menit hanya terdapat 2 cacat. Lebih kecil bila dibandingkan dengan kondisi tanpa penambahan sebanyak 8 cacat. Selama proses pengamatan waktu pudar terhadap proses produksi

komponen *cylinder head* ini dihasilkan sebanyak 44 komponen *cylinder head*, sehingga persentase cacat yang terbentuk hanya sebesar 4.5 % atau mengalami penurunan sebesar 13.6 % dari produksi komponen dengan paduan AC4B pada komposisi tanpa penambahan.

Tabel 4.5 Hasil *check sheet* produksi *cylinder head* hasil proses LPDC

Waktu (menit)	Cacat pada proses LPDC		Temperatur cairan aluminium pada saat proses LPDC (°c)	Tekanan mesin LPDC (kPa)
	0 wt. %	0.120 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr		
0 - 30	4 misrun	2 misrun	710 ± 10	256
30 - 60	-	-	710 ± 10	262
60 - 90	2 misrun	-	710 ± 10	262
90 - 120	2 misrun	-	710 ± 10	268

Dari Tabel 4.5 terlihat bahwa pada 0-30 menit awal proses telah terdapat cacat pada komponen *cylinder head*. Kecenderungan terdapatnya cacat pada awal proses ini biasanya disebabkan oleh temperatur cetakan dari mesin LPDC belum terlalu panas, sehingga cairan dari paduan aluminium tidak seutuhnya mengisi rongga pada cetakan. Namun, dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr pada paduan AC4B mampu mengurangi kecenderungan terjadinya cacat, karena kemampuan aliran dari cairan paduan aluminium menjadi meningkat sehingga cacat *misrun* dapat diminimalisir.



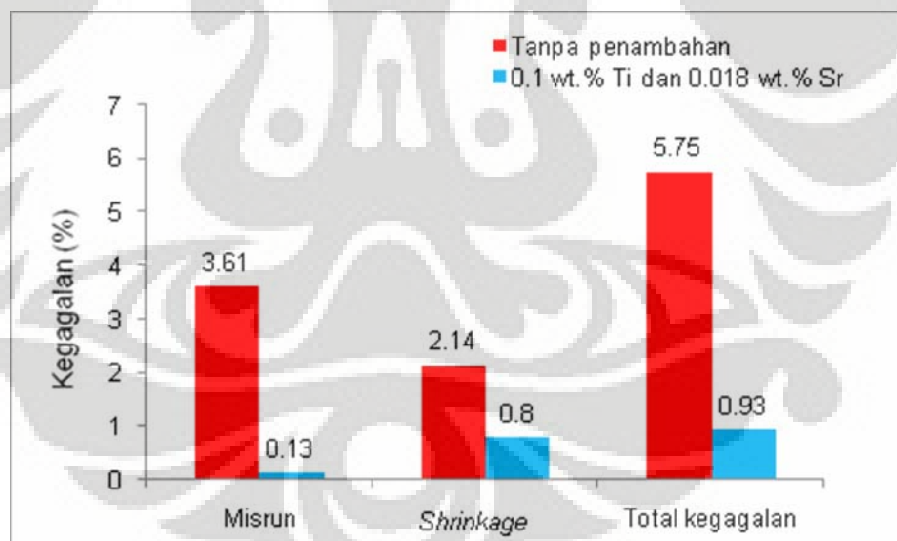
Gambar 4.18 Cacat pada komponen *cylinder head* dengan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr (a)(b) *misrun*.

Dalam rangka mengetahui keefektifan dari kombinasi penambahan penghalus butir Ti dan unsur modifikasi Sr di dalam paduan aluminium AC4B selama berjalannya proses produksi komponen *cylinder head* dengan metode

LPDC, maka dilakukanlah percobaan dengan kadar penambahan sebesar 0.07 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr atau dengan kata lain kandungan kedua unsur ini pada paduan AC4B menjadi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.

Mekanisme selama melakukan *trial* sama dengan proses produksi komponen *cylinder head* biasanya. Proses berjalan secara terus menerus, berlangsung selama 6 *shift* dengan jumlah total produksi komponen *cylinder head* sebanyak 746 komponen. Proses penambahan berlangsung ketika suplai cairan aluminium dilakukan ke mesin LPDC. Pada Gambar 4.19 terlihat perbandingan persentase kegagalan akibat cacat pada kondisi *as-cast* komponen *cylinder head* paduan AC4B.

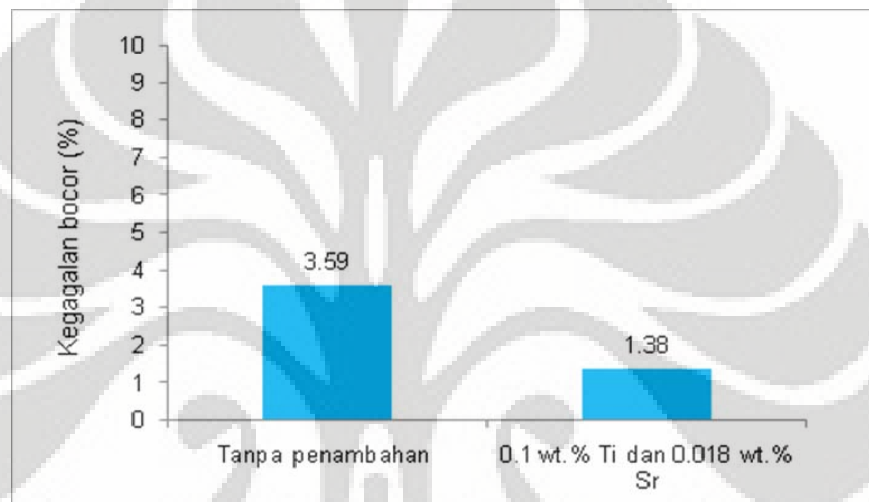
Pada Gambar 4.19 terlihat bahwa dengan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terjadi penurunan cacat *misrun* dari 3.61 % menjadi 0.13%. Selain itu juga terjadi penurunan kegagalan akibat *shrinkage* dari 2.14 % menjadi 0.8 %. Secara keseluruhan total kegagalan pada komponen *cylinder head as-cast*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



Gambar 4.19 Perbandingan presentase kegagalan akibat *misrun* dan *shrinkage* pada paduan aluminium AC4B pada komposisi tanpa penambahan dan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.

Pengecekan selanjutnya terhadap kelayakan komponen *cylinder head*, berupa pengujian bocor. Menggunakan mesin uji bocor, dengan prinsip merendam komponen *cylinder head* dalam cairan lalu diberikan tekanan udara kedalam komponen *cylinder head*, sebelumnya semua lubang yang terdapat pada *cylinder*

head telah ditutup terlebih dahulu. Yang memicu terjadinya kebocoran pada komponen *cylinder head*, karena kehadiran porositas dan *shrinkage*. Gambar 4.20 menampilkan perbandingan persentase kegagalan akibat kebocoran komponen *cylinder head* paduan AC4B. Pengujian bocor hanya dilakukan terhadap 100 komponen dari *cylinder head*. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terjadi penurunan kegagalan akibat kebocoran sebesar 61.5 % terhadap paduan AC4B komposisi tanpa penambahan.



Gambar 4.20 Perbandingan persentase kegagalan akibat kebocoran pada komponen *cylinder head* paduan AC4B pada komposisi tanpa penambahan dan komposisi 0.1 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr.

Penurunan terhadap jumlah kebocoran komponen disebabkan oleh efek yang ditimbulkan oleh kedua unsur yang ditambahkan. Porositas yang menjadi penyebab kebocoran, yang awalnya terkonsentrasi pada satu daerah, tapi dengan dilakukannya kombinasi penambahan penghalus butir Ti dan unsur modifikasi menyebabkan porositas yang terbentuk menjadi tersebar secara merata.

Hasil yang diperoleh pada *trial* ini belum bisa menunjukkan hubungan terhadap proses pemudaran. Karena dari *trial* yang dilakukan, persebaran dari cacat ataupun kegagalan dari komponen tidak merata. Namun, dengan kombinasi penambahan penghalus butir Ti dan unsur modifikasi Sr akan meningkatkan sifat mekanis aluminium AC4B, yang berdampak terhadap penurunan terhadap cacat ataupun kegagalan produk pada proses LPDC. Dengan demikian kombinasi penambahan penghalus butir Ti dan unsur modifikasi Sr dapat menjadi salah satu

alternatif untuk diaplikasikan pada dunia industri yang menggunakan paduan aluminium AC4B, guna peningkatan kualitas produk dan meminimalisir cacat dan kegagalan produk.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan dalam penelitian ini, berupa:

1. Pada komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr, mengakibatkan terjadinya peningkatan terhadap nilai kekerasan paduan AC4B baik pada bagian tipis maupun bagian tebal. Kenaikan nilai kekerasan pada bagian tipis dari 43.75 HRB menjadi 49.85 HRB dan pada bagian tebal dari 44.35 HRB menjadi 48.27 HRB.
2. Seiring dengan meningkatnya waktu tahan, menyebabkan terjadinya penurunan nilai kekerasan paduan. Jalannya proses pemudaran meningkat secara signifikan pada 60 menit waktu tahan, dimana terjadi penurunan kekerasan sebesar 7.3 % sehingga kekerasan menjadi 46.34 HRB untuk bagian tipis dan 8.6 % sehingga kekerasan menjadi 44.1 HRB untuk daerah tebal, terhadap nilai kekerasan 10 menit waktu tahan.
3. Pada komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr paduan AC4B nilai UTS mengalami peningkatan sebesar 12.4 % menjadi 251.11 MPa. Setelah 120 menit waktu tahan nilai UTS paduan mengalami penurunan sebesar 5.8 % menjadi 236.48 MPa.
4. Komposisi 0.123 wt. % Ti dan 0.003 wt. % Sr pada waktu tahan 0 menit telah meningkatkan nilai fluiditas paduan aluminium AC4B sebesar 53.8 % dari 40.1 cm menjadi 61.7 cm. Setelah waktu tahan 120 menit, fluiditas turun 20.7 % menjadi 50.20 cm.
5. Paduan AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr memiliki struktur mikro silikon eutektik *fibrous* yang halus dan tersebar merata, serta berada pada kelas E berdasarkan standar ASM.
6. Dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr pada paduan AC4B, terjadi menurunkan nilai *Dendrite Arm Spacing* (DAS). DAS menurun sebesar 42.6 % dari 26.76 μm menjadi 15.36 μm untuk bagian tipis dan 37.1 % dari 31.81 μm menjadi 20.01 μm untuk bagian tebal dari komponen *cylinder head*.

7. Nilai DAS paduan mengalami peningkatan secara signifikan pada 60 menit waktu tahan. Dimana kenaikan yang terjadi sebesar 37.4 % pada bagian tipis dan 30.2 % pada bagian tebal terhadap nilai DAS pada 10 menit waktu tahan.
8. Paduan AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr, menyebabkan porositas paduan tersebar merata dan menyebabkan terjadinya peningkatan fraksi volume porositas paduan aluminium AC4B dari 3 % menjadi 16 %. Setelah waktu tahan 120 menit, fraksi volume turun menjadi 11 %.
9. Berdasarkan hasil kekerasan dan ukuran butir, keefektifan dari penghalus butir dan unsur modifikasi pada paduan AC4B dengan komposisi 0.08 wt. % Ti dan 0.018 wt. % Sr terjadi pada 50 menit awal waktu tahan. Dan proses pemudaran dari kombinasi kedua unsur berjalan lebih cepat ketika 60 menit waktu tahan.
10. Fenomena pemudaran terjadi karena pengendapan senyawa $TiAl_3$ pada bagian bawah dapur dan oksidasi unsur modifikasi pada paduan aluminium ACB4.
11. Pada penelitian ini tidak ditemukan adanya interaksi antara penghalus butir dan unsur modifikasi

5.1 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan penulis berupa:

1. Penambahan terhadap kombinasi penghalus butir dan unsur modifikasi sebaiknya dilakukan diluar *holding furnace* mesin LPDC, sehingga kecenderungan tidak tercampurnya kedua unsur dengan rata dapat diminimalisir.
2. Menjaga faktor-faktor luar yang dapat mempengaruhi hasil dari penelitian, seperti temperatur cetakan sampel uji dijaga tetap konstan, proses *skimming* yang sempurna, kontak aluminium cair terhadap atmosfer, dan penggunaan peralatan yang bersih.

DAFTAR ACUAN

- [1] Kaufmann, Gilbert J.; Rooy, Elwin L. *Aluminium Alloy Casting : Properties, Process, and Applications*. Ohio : ASM International (The Materials Information Society). 2005.
- [2] Suharno, Bambang. (2007). *Diktat Kuliah: Pengecoran Logam Aluminium*. Depok: Departemen Metalurgi dan Material UI.
- [3] JIS Handbook. *Non Ferrous Metals & Metallurgy*. Japanese Standard Association. Tokyo. 1977.
- [4] Gruzleski, John E.; Closset, Bernard M. *The Treatment of Liquid Aluminium – Silicon Alloys*. Illinois : The American Foundrymen’s Society Inc., 1999.
- [5] Arnbeg, Lars., Bacherud, Lennart., Chai,Guocai. *Solidification Characteristic of Aluminium Alloys-Volume3: Dendrite Coherency*. American.
- [6] Suharno, Bambang. (2007). *Slide Kuliah: Pengecoran Logam*. Depok: Departemen Metalurgi dan Material UI.
- [7] Jorstad, John.L, Rasmussen, Wayne.M. *Aluminium Casting Technology-2nd edition*. Illinois : The American Foundry Society, 1993.
- [8] Hatch, John E. *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*. American Society for Metals : Metal Parks, Ohio. 1995.
- [9] Bringas, John E. (2003). *Nonferrous Metals 4th Edition*. Kanada: CASTI Publishing.
- [10] “Dendrite Arm Spacing” yang diakses dari <http://www.eaa.net/ea/education/TALAT/F3000/F3200.htm> pada tanggal 11Mei 2009
- [11] ASM Handbook.Volume 15 : *Casting*. ASM International : Metal Park, Ohio. 1988.
- [12] Modolfo, L.F. *Aluminium Alloys:Structur and Properties*. london Butterworth.1979.
- [13] Surdia, T. Chijiwa K. (1991). *Teknik Pengecoran Logam*, Jakarta: Pradnya Paramita

[14] Askeland, Donald R., Pradeep P. Phulé. The Science and Engineering of Materials, 4th ed (Chapter 8 – Principles of Solidification).

[15] Frazier, William. Benci, John. Rapid Solidification Processing of Al₃Ti and Al₃Ti Plus Copper. DTIC : ADA236600. 1990

[16] Metallurg Aluminum. (1998). Modification of Aluminium Silicon Foundry Alloys. (n.d). London and Scandinavian Metallurgical.

[17] Cook, Dr Ray. “Grain Refinement of Aluminium-Silicon Foundry Alloys”. South Yorkshire: London & Scandinavian Metallurgical Co. Limited. 1998.

[18] Limmaneevichitr, C., Eihed, W. “Fading mechanism of Grain Refinement of Aluminum-Silicon Alloy with Al-Ti-B Grain Refiners”. Material Science and Engineering A349, 197-206. 2003.

[19] 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.

[20] Gruzleski, John E.; Anson, J.P. effect of strontium concentration on microporosity in A356 aluminium alloy.

[21] Fuoco, R. , Fuoco, E.R Correa, M. de Andrade Bastos. (2001). Microporosity Morphology in A 356 Aluminium Alloy in unmodified and in Sr-modified conditions , AFS Transactions 01-168 (p 1-20) IPT =Technological research Institute-Metallurgy Divison Sao Pauli-Brazil.

[22] ASM International. (1993). ASM Specialty Handbook : Aluminum and Aluminum Alloys. Ohio: American Society for Metals.

[23] Banga, T.R. (1981). Foundry Engineering, Dehli: Khanna Publisher.

[24] Campbell, Jihn. (1994). The Fluidity of Molten metals. TALAT Lecture 205.

[25] Beeley P.R, B.Met, Ph.D, (1972). Foundry technology. London:Butter Worth.


[26] Anberg L, M Di Sabatino. (n.d). The Review of Fluidity of Al Based Alloy. Norwegia: Norwegian University of Science and Technology.

[27] Askeland, Ronald R. & Phule, Pradeep P. The Science and Engineering of Materials 4th edition: Principles of Solidification. (n.d). (n.d)



- [28] Golbahar, Behnam. (2008). Effect of grain refiner-modifier interaction on the performance of A356.2 alloy.
- [29] Lu, L., A.K. Dahle.() Effects of combined additions of Sr and AlTiB grain refiners in hypoeutectic Al–Si foundry alloys.
- [30] 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
- [31] 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.
- [32] Shivkumar, S., L. Wang, D. Apelian. (1991). Molten metal processing of advanced cast aluminum alloys. *Journal of Metal*, p. 26-32.
- [33] Lesmana, budi. skripsi studi pengaruh penambahan grain refiner 0.009 wt% Ti terhadap karakteristik paduan AC4B hasil low pressure die casting. departemen metalurgi dan material, fakultas teknik universitas indonesia, depok. 2008.
- [34] 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.
- [35] John R. Brown. Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook, Eleventh edition.
- [36] Zheyuan Ma. 2002. Effect Of Fe-Intermetallics And Porosity On Tensile And Impact Properties Of Al-Si-Cu And Al-Si-Mg Cast Alloys. University Of Quebec At Chicoutimi.
- [37] Keivan Davami. Mehrdad Shaygan. *An Investigation of Solidification Conditions and Melt Treatment on Microporosity Formation*.
- [38] Marisa Di Sabatino. 2005. *Fluidity Of Aluminium Foundry Alloys*. Norwegian University of Science and Technology.
- [39] Apelian D. 2009. Aluminium Cast Alloys: Enabling Tools For Improved Performance.
- [40] Nafisi R. *Effects Of Grain Refining And Modification On The Microstructural Evolution Of Semi-Solid 356 Alloy*.

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Hasil Pengujian Komposisi Kimia

 PT Astra Honda Motor Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Department			
LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA			
NAMA PART	: SAMPLE MELTING	TGL PENGUJIAN	: 02-Mar-09 7:52:05
NO PART / TYPE	: SAMPLESBLM(LPDC 02/03/09)	STANDARD UJI	: JIS H 5202
MATERIAL	: AC4B (2008)	MESIN UJI	: SPECTRO SHIMADZHU
SEKSI / SUB CON	: LPDC	KETERANGAN	: SHIFT 1
TEST KE	: 1		
MELTING AC4B			
<u>ACTUAL</u>		<u>STANDARD QA AHM</u>	
SI	: 7.561	SI	: 7.00 ~ 10.00
CU	: 2.108	CU	: 2.00 ~ 4.00
MG	: 0.201	MG	: 0.50 MAX
FE	: 0.783	FE	: 0.80 MAX
MN	: 0.274	MN	: 0.50 MAX
NI	: 0.062	NI	: 0.35 MAX
TI	: 0.040	TI	: 0.20 MAX
PB	: 0.054	PB	: 0.20 MAX
SN	: 0.030	SN	: 010 MAX
CR	: 0.029	CR	: 0.20 MAX
ZN	: 0.579	ZN	: 1.00 MAX
SR	: 0.000	SR	: -
<u>NOTE</u>		<u>KETERANGAN</u>	
- HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG		OK	
- LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG			
		DIBUAT	
		DIDISI	

AHM	
PT Astra Honda Motor Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Departement	
LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA	
NAMA PART : SAMPLE MELTING	TGL.PENGUJIAN : 02-Már-09 13:58:20
NO PART / TYPE : SAMPLE:(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 : 7.624	SI : 7.00 ~ 10.00
CU : 2.119	CU : 2.00 ~ 4.00
MG : 0.138	MG : 0.50 MAX
FE : 0.819	FE : 0.80 MAX
MN : 0.277	MN : 0.50 MAX
NI : 0.062	NI : 0.35 MAX
TI : 0.120	TI : 0.20 MAX
PB : 0.059	PB : 0.20 MAX
SN : 0.036	SN : 0.10 MAX
CR : 0.032	CR : 0.20 MAX
ZN : 0.584	ZN : 1.00 MAX
SR : 0.018	SR : -
NOTE	KETERANGAN
- HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG	<input checked="" type="checkbox"/> OK
- LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG	
	DIBUAT
	DIDI S

 PT Astra Honda Motor Measurement & Laboratory Section Quality Assurance Support Departement	
LAPORAN PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA	
NAMA PART : SAMPLE MELTING NO PART / TYPE : SAMPLE:EDO AKHIR(LPDC 22/04/09 S1) MATERIAL : AC4B (2008) SEKSI / SUB CON : LPDC TEST KE : 1	TGL.PENGUJIAN : 22-Apr-09 10:58:31 STANDARD UJI : HES C-101-99 MESIN UJI : SPECTRO SHIMADZHU KETERANGAN : SHIFT 1
MELTING AC4B	
<u>ACTUAL</u>	<u>STANDARD QA AHM</u>
SI : 8.696 CU : 2.399 MG : 0.137 FE : 0.754 MN : 0.256 NI : 0.059 TI : 0.106 PB : 0.073 SN : 0.044 CR : 0.030 ZN : 0.636 SR : 0.011	SI : 7.00 ~ 10.00 CU : 2.00 ~ 4.00 MG : 0.50 MAX FE : 0.80 MAX MN : 0.50 MAX NI : 0.35 MAX TI : 0.20 MAX PB : 0.20 MAX SN : 0.10 MAX CR : 0.20 MAX ZN : 1.00 MAX SR :
<u>NOTE</u> - HASIL UKUR YANG BERGARIS BAWAH = NG - LAKUKAN PERBAIKAN BILA HASIL TEST NG	KETERANGAN <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">OK</div>  DIB'S

Lampiran 2 : Hasil Pengujian Kekerasan

Bagian Tipis

Waktu tahan (menit)	kekerasan titik ke - (HRB)				Mean	SD
	1	2	3	4		
10	50.3	49.9	51.4	47.8	49.85	1.506652
20	49.5	50.2	48.6	49.3	49.4	0.658281
30	47	49.1	49.1	50.6	48.95	1.479865
40	48.4	49.1	47.8	48.7	48.5	0.547723
50	48	48.2	47.7	47.8	47.925	0.221736
60	46	47	45	46.8	46.2	0.909212
90	45.5	45.5	44.8	45.3	45.275	0.330404
120	46.3	45	44.3	44.1	44.925	0.994569

Bagian Tebal

Waktu tahan (menit)	kekerasan titik ke - (HRB)				Mean	SD
	1	2	3	4		
10	47.8	47.7	48.7	48.9	48.275	0.613052
20	48.4	46.8	47.9	47.6	47.675	0.670199
30	46.6	46.1	46.7	47.5	46.725	0.579511
40	46.6	47.6	45.5	45	46.175	1.161536
50	46	45.5	45.4	46.3	45.8	0.424264
60	43.9	44.5	44.1	43.9	44.1	0.282843
90	43.4	42	43.7	42.2	42.825	0.85
120	42.4	43.3	42.5	42.4	42.65	0.43589

Lampiran 3 : Hasil Pengujian Tarik

AC4B dengan komposisi normal

Tensile strength ke - (MPa)			Rata-rata	SD
1	2	3		
227.791	215.431	226.765	223.329	6.85908

Elongasi sampel ke - (%)		Rata-rata	SD
1	2		
2.18	1.6	1.89	0.410122

AC4B dengan komposisi 0.120 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr

waktu tahan(menit)	Tensile strength ke - (MPa)			Rata-rata	SD
	1	2	3		
10	253.054	250.099	250.162	251.105	1.688177
60	256.745	243.322	256.745	252.2707	7.749773
120	243.566	233.815	232.058	236.4797	6.199504

waktu tahan (menit)	elongasi sampel ke - (%)		Rata-rata	SD
	1	1		
10	3.16	0.4	1.78	1.951615
60	2.42	2.4	2.41	0.014142
120	1.44	2.92	2.18	1.046518

*tidak diikutsertakan dalam perhitungan

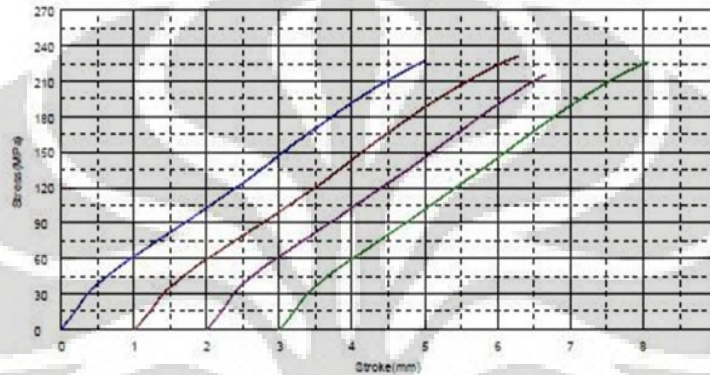
TENSILE STRENGTH

AC4B Komposisi Normal

Shape: Rod

Units	Diameter mm	Gauge Length mm
Awal - 1	14.0000	50.0000
Awal - 2	14.0500	50.0000
Awal - 3	13.9500	50.0000
Awal - 4	14.0500	50.0000

Name	Max Force N	Elongation %	Max Stress MPa
Awal - 1	35055.5	2.18000	227.791
Awal - 2	35873.4	2.26000	231.053*
Awal - 3	32926.5	1.66000	215.431
Awal - 4	34907.8	0.00000*	226.765

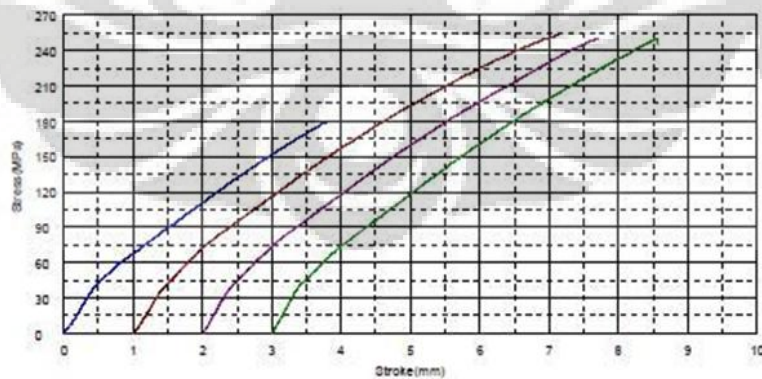


Komposisi 0.120 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr
(10 menit)

Shape: Rod

Units	Diameter mm	Gauge Length 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

Name	Max Force N	Max Stress MPa	ELONGATION %
1 - 1	26275.1	175.812*	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*

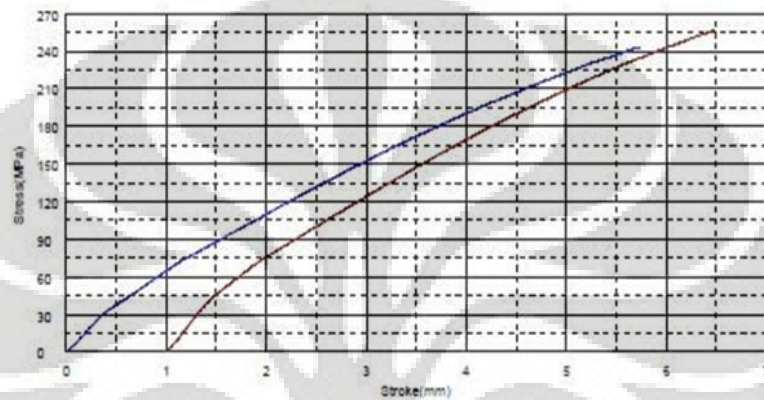


**Komposisi 0.120 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr
(60 menit)**

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1-1	14.3700	50.0000
1-2	14.0200	50.0000

Name	Max Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	MPa	%
1-1	39462.5	243.322	2.88000*
1-2	39645.3	256.806*	2.40000

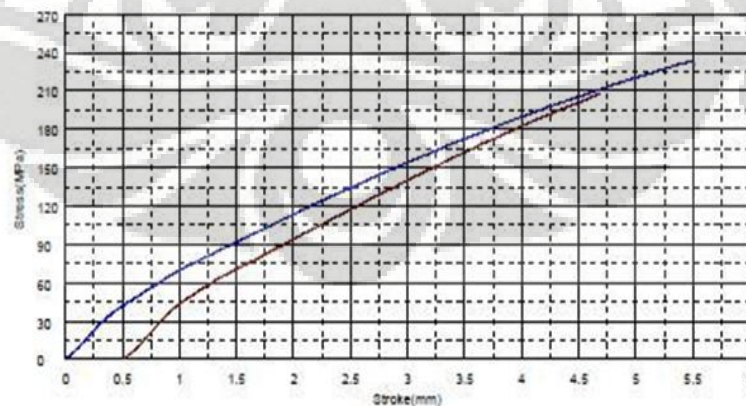


**Komposisi 0.120 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr
(120 menit)**

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1-1	14.1900	50.0000
1-2	14.1800	50.0000

Name	Max Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	MPa	%
1-1	36976.6	233.815	2.92000
1-2	32803.1	207.717*	0.76000*

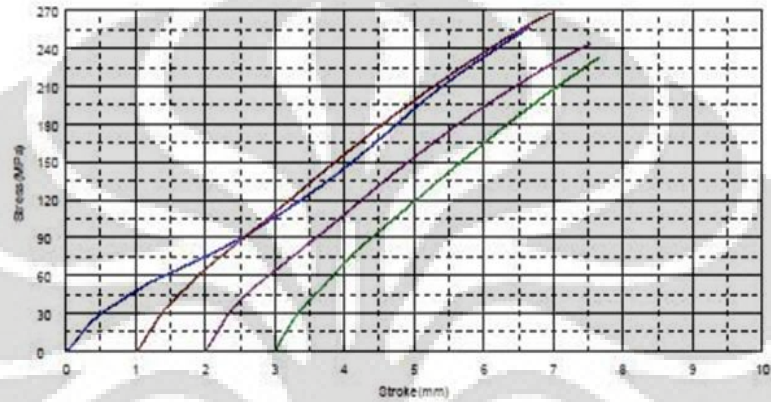


Komposisi 0.120 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr

Shape: Rod

Units	Diameter mm	Gauge Length mm
60 ment_1	14.2500	50.0000
60 ment_2	13.9700	50.0000
120 ment_1	14.2400	50.0000
120 ment_2	13.9000	50.0000

Name	Max Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	MPa	%
60 ment_1	40946.9	256.745	2.42000
60 ment_2	41092.2	258.088*	1.10000*
120 ment_1	38790.6	243.566	1.44000
120 ment_2	35214.1	232.058	1.16000*



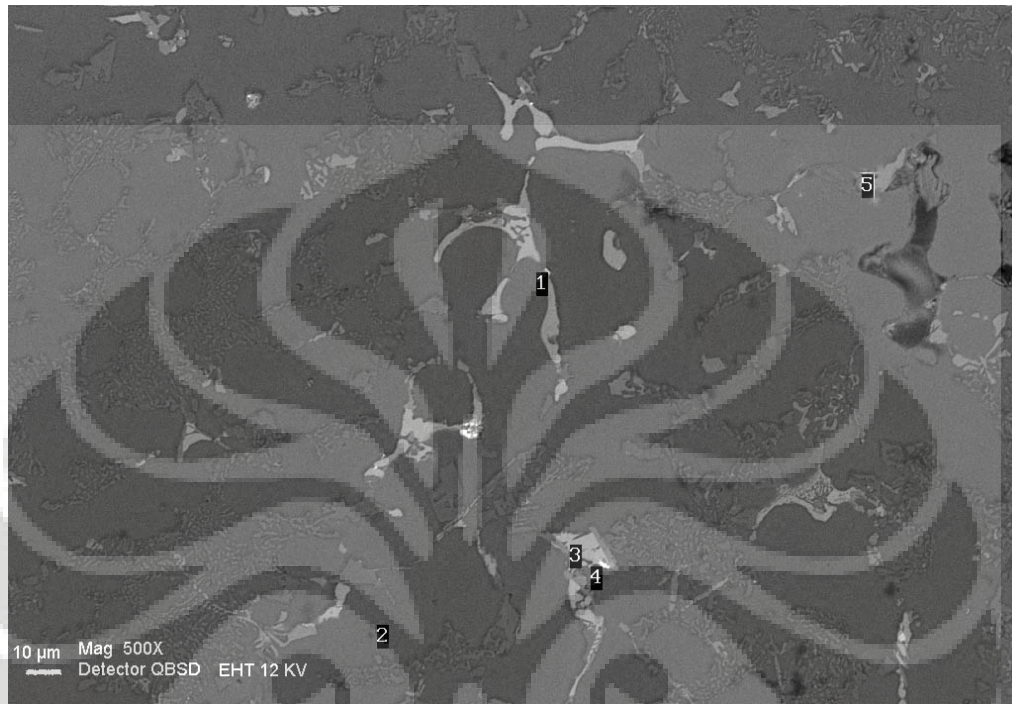
*tidak diikutsertakan dalam perhitungan

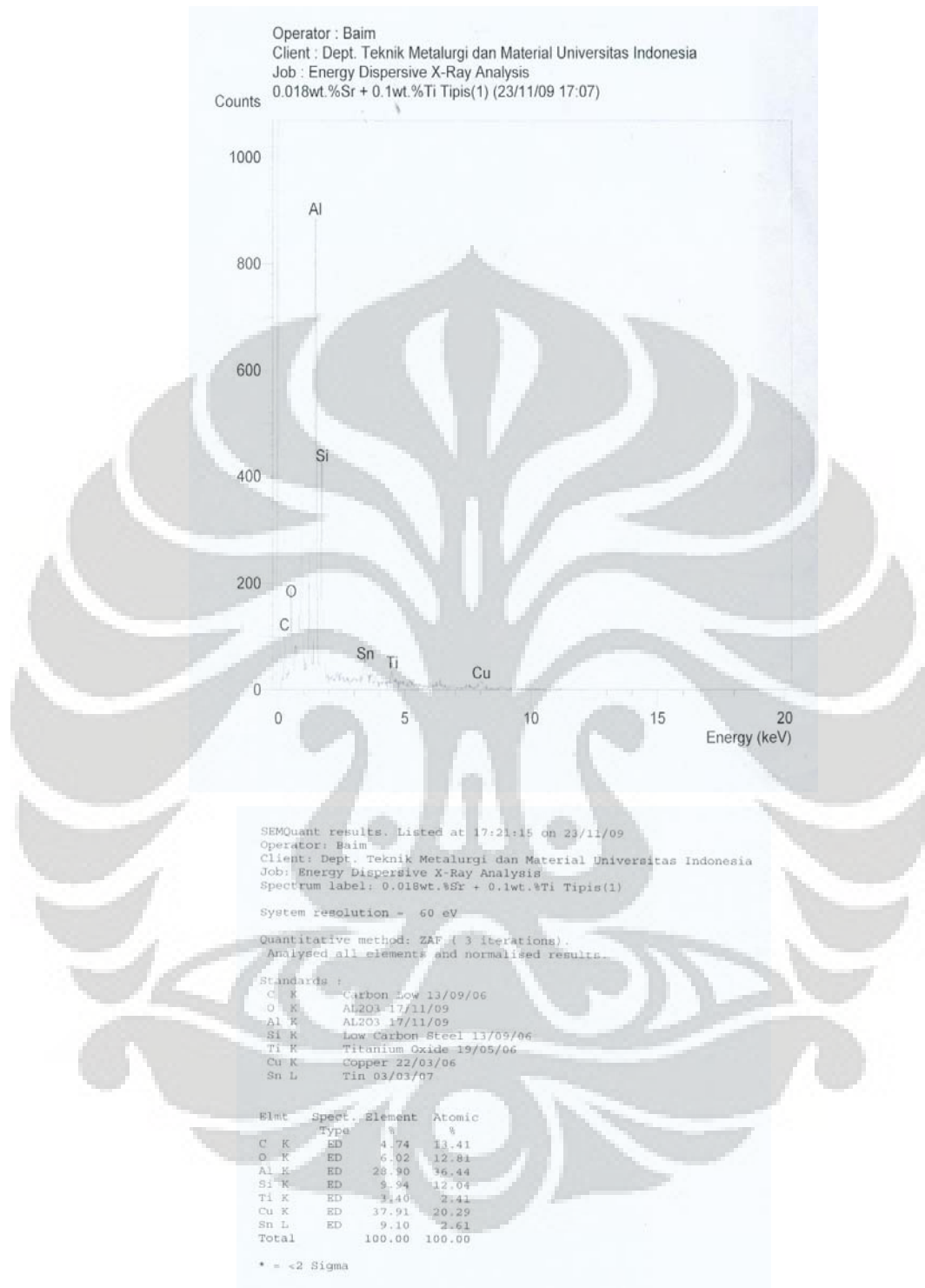
Lampiran 4 : Hasil Perhitungan Nilai DAS
Bagian Tipis

Waktu tahan (menit)	Panjang DAS dari dendrit ke - (mm)					rata-rata (mm)	rata-rata (μm)	SD
	I	II	III	IV	V			
10	0.2	0.2	0.25	0.15	0.25	0.198	15.362028	0.010954451
	0.2	0.25	0.2	0.2	0.2			
	0.2	0.15	0.2	0.2	0.2			
	0.2	0.25	0.2	0.2	0.15			
	0.15	0.2	0.2	0.2	0.15			
Rata-rata	0.19	0.21	0.21	0.19	0.19			
20	0.2	0.25	0.2	0.2	0.25	0.202	15.672372	0.0083666
	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2			
	0.2	0.2	0.2	0.25	0.2			
	0.2	0.2	0.25	0.2	0.15			
	0.2	0.25	0.15	0.2	0.2			
Rata-rata	0.19	0.21	0.2	0.21	0.2			
30	0.15	0.2	0.3	0.25	0.25	0.21	16.29306	0.01
	0.25	0.15	0.2	0.2	0.3			
	0.25	0.2	0.15	0.15	0.2			
	0.2	0.2	0.25	0.25	0.2			
	0.15	0.25	0.2	0.2	0.15			
Rata-rata	0.2	0.2	0.22	0.21	0.22			
40	0.3	0.2	0.25	0.2	0.15	0.216	16.758576	0.005477226
	0.25	0.2	0.2	0.2	0.3			
	0.15	0.25	0.15	0.25	0.25			
	0.15	0.3	0.2	0.25	0.2			
	0.2	0.15	0.3	0.15	0.2			
Rata-rata	0.21	0.22	0.22	0.21	0.22			
50	0.25	0.15	0.25	0.25	0.15	0.232	17.999952	0.013038405
	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25			
	0.2	0.35	0.25	0.15	0.25			
	0.25	0.3	0.15	0.35	0.25			
	0.25	0.2	0.25	0.25	0.2			
Rata-rata	0.23	0.24	0.22	0.25	0.22			
60	0.25	0.35	0.25	0.25	0.35	0.272	21.103392	0.0083666
	0.2	0.25	0.2	0.3	0.35			
	0.35	0.25	0.25	0.25	0.2			
	0.25	0.3	0.25	0.3	0.2			
	0.3	0.25	0.35	0.3	0.25			
Rata-rata	0.27	0.28	0.26	0.28	0.27			
90	0.3	0.35	0.25	0.3	0.2	0.302	23.430972	0.016431677
	0.35	0.25	0.3	0.35	0.3			
	0.25	0.35	0.35	0.3	0.35			
	0.4	0.25	0.35	0.4	0.35			
	0.25	0.2	0.3	0.25	0.25			
Rata-rata	0.31	0.28	0.31	0.32	0.29			
120	0.35	0.45	0.25	0.35	0.2	0.312	24.206832	0.014832397
	0.25	0.25	0.4	0.3	0.35			
	0.25	0.25	0.35	0.35	0.25			
	0.35	0.35	0.2	0.4	0.35			
	0.35	0.3	0.25	0.25	0.4			
Rata-rata	0.31	0.32	0.29	0.33	0.31			

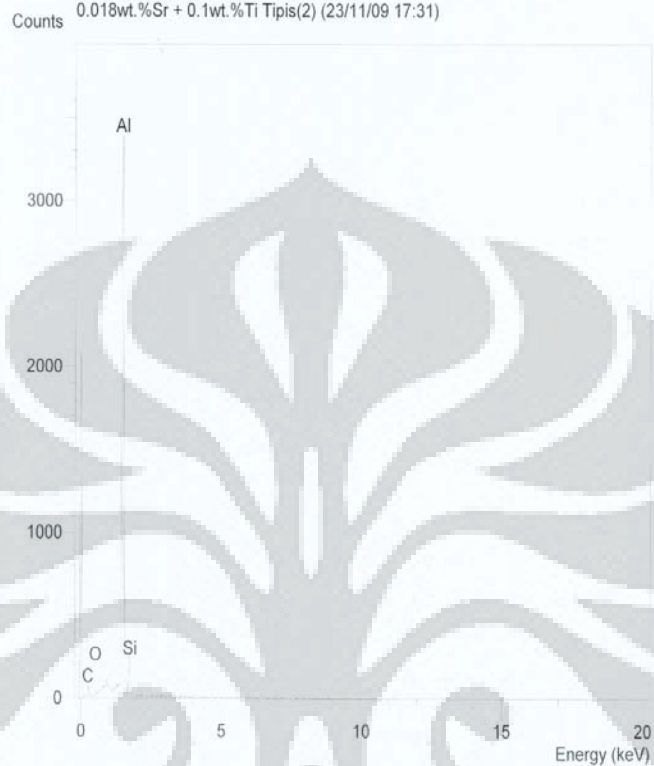
Bagian Tebal

Waktu tahan (menit)	Panjang DAS dari dendrit ke - (mm)					rata-rata (mm)	rata-rata (μm)	SD
	I	II	III	IV	V			
10	0.3	0.3	0.3	0.2	0.25	0.258	20.017188	0.010954
	0.25	0.3	0.3	0.25	0.3			
	0.3	0.3	0.25	0.25	0.3			
	0.25	0.2	0.25	0.2	0.25			
	0.2	0.2	0.25	0.3	0.2			
Rata-rata	0.26	0.26	0.27	0.24	0.26			
20	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25	0.268	20.793048	0.004472
	0.25	0.2	0.25	0.25	0.35			
	0.3	0.3	0.3	0.2	0.25			
	0.25	0.25	0.3	0.3	0.2			
	0.3	0.3	0.25	0.3	0.3			
Rata-rata	0.27	0.26	0.27	0.27	0.27			
30	0.3	0.2	0.3	0.35	0.3	0.278	21.568908	0.008367
	0.25	0.3	0.25	0.35	0.35			
	0.35	0.35	0.3	0.2	0.3			
	0.3	0.25	0.25	0.2	0.25			
	0.2	0.25	0.25	0.3	0.25			
Rata-rata	0.28	0.27	0.27	0.28	0.29			
40	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	0.294	22.810284	0.005477
	0.3	0.3	0.35	0.3	0.3			
	0.3	0.2	0.2	0.35	0.3			
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.3			
	0.3	0.3	0.3	0.3	0.35			
Rata-rata	0.29	0.29	0.3	0.3	0.29			
50	0.25	0.35	0.2	0.3	0.3	0.31	24.05166	0.012247
	0.25	0.3	0.3	0.35	0.3			
	0.35	0.3	0.4	0.35	0.3			
	0.35	0.3	0.4	0.25	0.25			
	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4			
Rata-rata	0.3	0.33	0.3	0.31	0.31			
60	0.3	0.35	0.35	0.3	0.35	0.336	26.068896	0.019494
	0.25	0.35	0.25	0.3	0.3			
	0.3	0.4	0.25	0.35	0.35			
	0.35	0.35	0.4	0.3	0.25			
	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4			
Rata-rata	0.32	0.37	0.33	0.33	0.33			
90	0.4	0.4	0.5	0.4	0.35	0.37	28.70682	0.014142
	0.35	0.4	0.3	0.35	0.35			
	0.45	0.35	0.4	0.3	0.35			
	0.4	0.3	0.25	0.5	0.3			
	0.25	0.5	0.3	0.3	0.5			
Rata-rata	0.37	0.39	0.35	0.37	0.37			
120	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.386	29.948196	0.024083
	0.4	0.35	0.4	0.45	0.5			
	0.4	0.5	0.35	0.3	0.5			
	0.4	0.4	0.3	0.35	0.35			
	0.3	0.35	0.4	0.3	0.35			
Rata-rata	0.36	0.4	0.37	0.38	0.42			

Lampiran 5 : Hasil Pengamatan SEM/EDX



Operator : Baim
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis
 0.018wt.%Sr + 0.1wt.%Ti Tapis(2) (23/11/09 17:31)



SEMQuant results. Listed at 17:36:52 on 23/11/09
 Operator: Baim
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: 0.018wt.%Sr + 0.1wt.%Ti Tapis(2)

System resolution = 59 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.92 keV

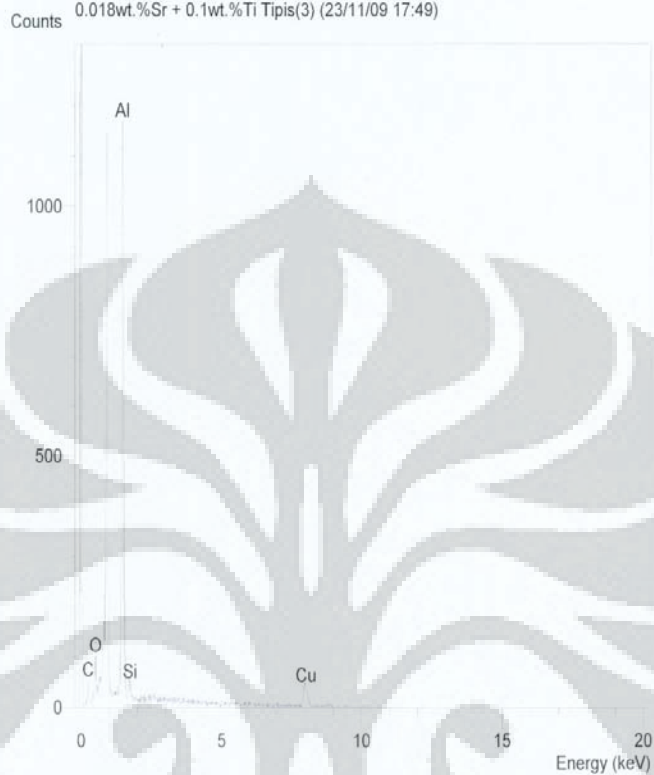
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06
 Al K AL2O3 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	2.74	5.97
Al K	ED	88.27	85.65
Si K	ED	8.99	8.38
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Operator : Baim
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis
 0.018wt.%Sr + 0.1wt.%Ti Tipis(3) (23/11/09 17:49)



SEMQuant results. Listed at 17:51:56 on 23/11/09
 Operator: Baim
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: 0.018wt.%Sr + 0.1wt.%Ti Tipis(3)

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF (2 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

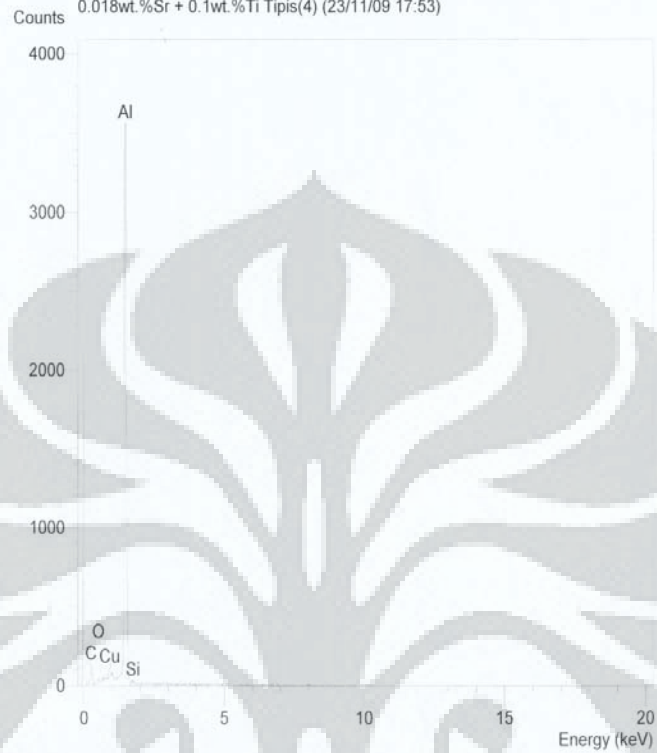
Standards :

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

Elmt	Spect	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	2.54	9.11
Al K	ED	26.17	41.86
Si K	ED	0.68	1.05
Cu K	ED	70.61	47.97
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

Operator : Baim
 Client : Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis
 0.018wt.%Sr + 0.1wt.%Ti Tipis(4) (23/11/09 17:53)



SEMQuant results. Listed at 17:56:28 on 23/11/09
 Operator: Baim
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: 0.018wt.%Sr + 0.1wt.%Ti Tipis(4)

System resolution = 60 eV

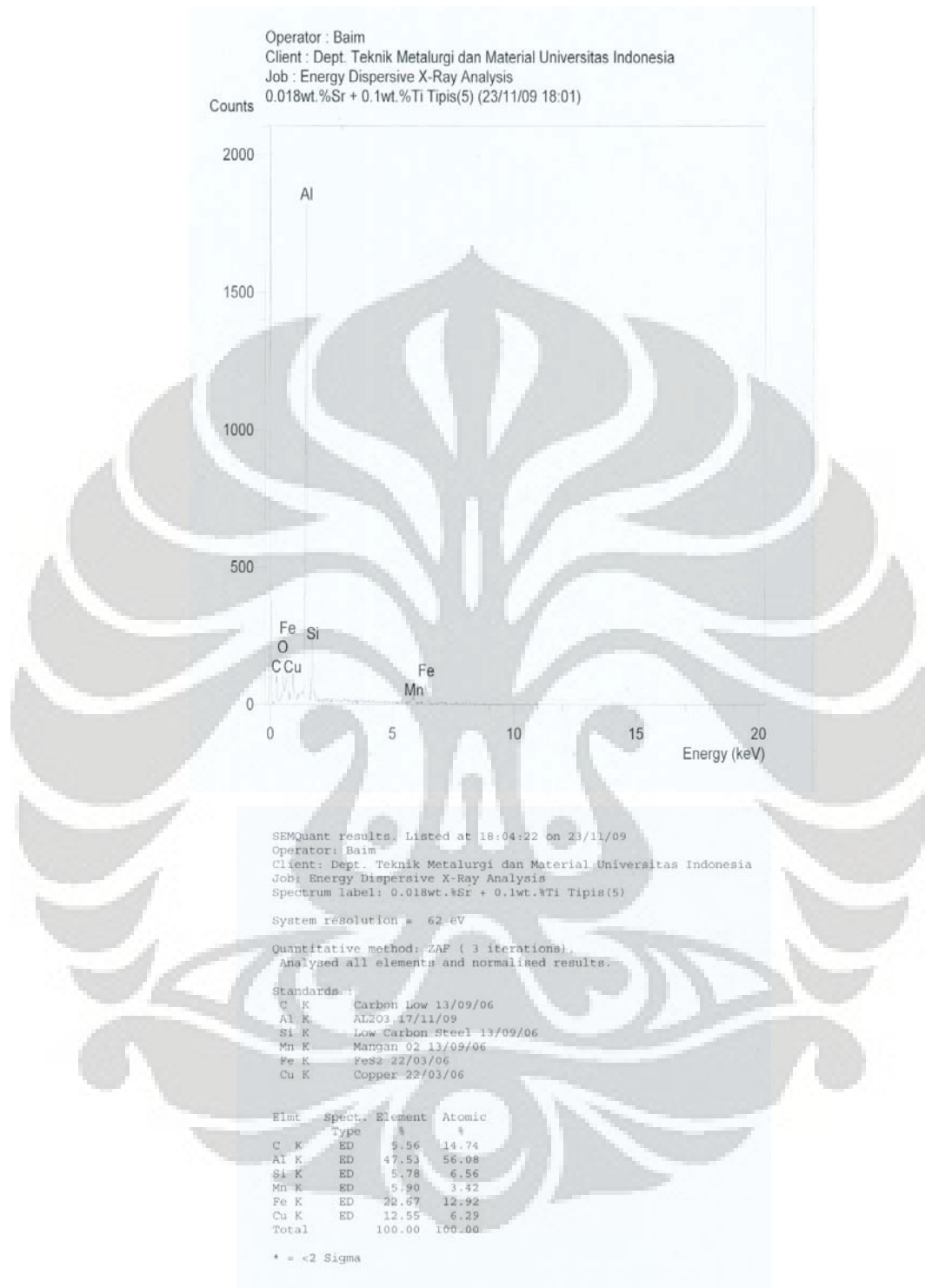
Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

Standards :

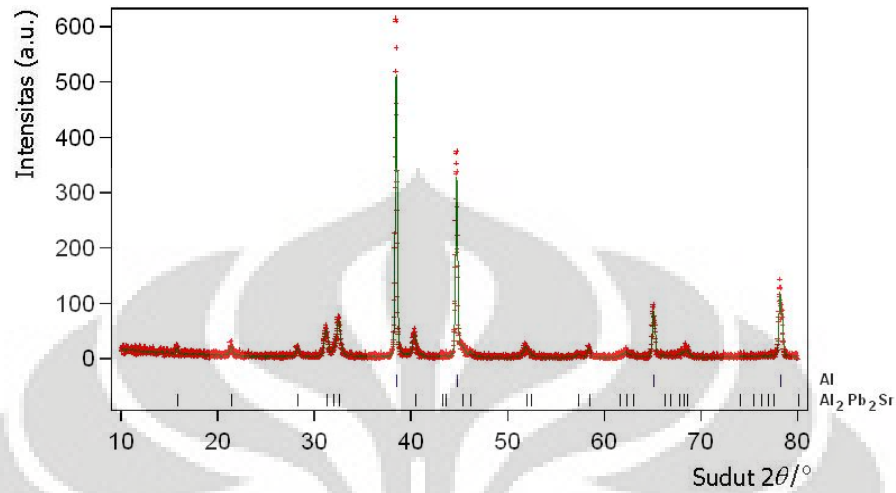
C K Carbon Low 13/09/06
 Al K AL2O3 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	7.30	16.15
Al K	ED	78.31	77.14
Si K	ED	1.29	1.22
Cu K	ED	13.10	5.48
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma



Lampiran 6 : Hasil Pengujian XRD
Master alloy Al-10Sr



PCPDFWIN - [PDF # 310023, Wavelength = 1.54056 (Å)]

PDFNumber Search Print View Data Conversion Window Clear Help

31-0023 Quality: C

CAS Number: Al2Pb2Sr
Aluminum Lead Strontium
Ref: Calvert, L., National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, ICDD Grant-in-Aid, (1979)

Molecular Weight: 555.98
Volume[CD]: 222.59
Dx: 8.295 Dm:

S.G.: I4/mmm (139)
Cell Parameters:
a 4.46 b c 11.19
α β γ

SS/FOM: F30=82(0108, 34)
I/Corr:
Rad: CuKα
Lambda: 1.54186
Filter:
d-sp: calculated

2θ	int-f	h	k	l	2θ	int-f	h	k	l	2θ	int-f	h	k	l
15.841	2	0	0	2	63.039	4	3	0	1	90.737	9	3	2	5
21.440	84	1	0	1	66.216	13	3	1	0	91.375	2	4	1	1
28.281	37	1	1	0	66.859	5	0	0	8	93.793	4	2	1	9
31.240	100	1	0	3	67.820	8	3	0	3	94.214	3	3	3	0
31.979	12	0	0	4	68.236	5	2	2	4	94.793	7	2	2	8
32.579	19	1	1	2	68.577	4	3	1	2	95.720	6	4	1	3
40.439	55	2	0	0	74.097	9	1	1	8	100.75	1	2	0	10
43.199	40	1	1	4	75.421	13	3	1	4	101.13	7	4	2	0
43.639	2	2	0	2	76.276	2	2	1	7	101.71	9	3	1	8
45.298	40	1	0	5	76.939	7	3	0	5	101.89	4	1	0	11
46.138	19	2	1	1	77.977	4	2	1	1	103.03	3	3	2	7
51.338	41	1	2	1	80.060	2	1	0	9	103.88	1	3	2	7
52.438	11	2	0	4	81.095	11	2	0	8	104.54	7	4	1	5
57.357	1	1	1	6	82.000	9	3	2	3	107.73	1	3	0	9
58.477	16	2	0	0	85.442	1	2	1	6	110.18	3	4	2	4
61.579	2	1	0	7	87.402	4	4	0	0					
62.318	27	2	1	5	90.078	1	3	0	7					

PCPDFWIN - [PDF # 040787, Wavelength = 1.54056 (Å)]

PDFNumber Search Print View Data Conversion Window Clear Help

04-0787 Quality: *

CAS Number: 7429-90-5

Molecular Weight: 26.98
Volume[CD]: 66.40
Dx: 2.699 Dm:

S.G.: Fm3m (225)
Cell Parameters:
a 4.049 b c
α β γ

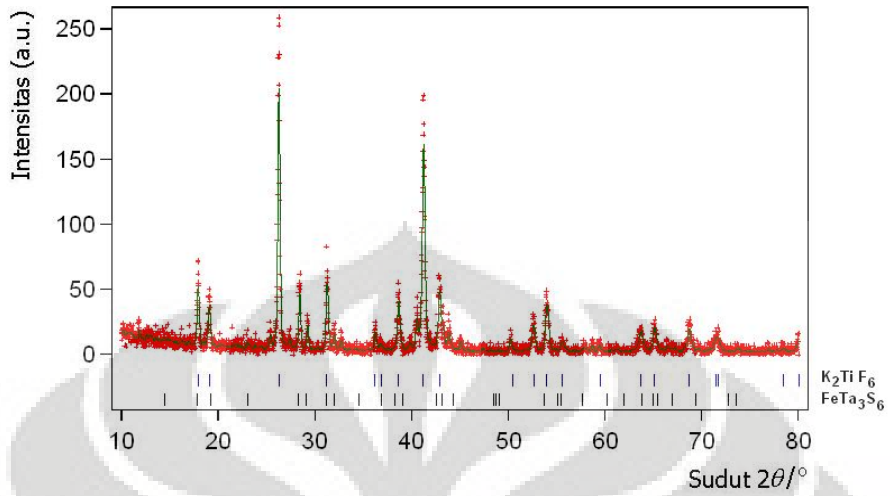
SS/FOM: F 9=93(0108, 9)
I/Corr: 3.619
Rad: CuKα1
Lambda: 1.54056
Filter: Ni
d-sp:

Mineral Name: Aluminum, syn [NR]

Al
Aluminum
Ref: Swanson, Tatge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 11 (1953)

2θ	int-f	h	k	l	2θ	int-f	h	k	l	2θ	int-f	h	k	l
38.472	100	1	1	1	78.227	24	3	1	1	112.04	8	3	3	1
44.738	47	2	0	0	82.435	7	2	2	2	116.56	8	4	2	0
65.133	22	2	2	0	99.078	2	4	0	0	137.45	8	4	2	2

Flux Coveral GR-2815



PCPDFWIN - [PDF # 220360, Wavelength = 1.54056 (Å)]

PDFNumber: 22-0360 Quality: I

CAS Number: Fe Ta3 S6
Iron Tantalum Sulfide
Ref: Vanden Berg, Shell Laboratory, Amsterdam, Netherlands, Private Communication

Molecular Weight: 791.05
Volume[CD]: 350.53
Dx: 7.495 Dm:

S.G.: P6322 (182)
Cell Parameters:
a 5.733 b c 12.28
α β γ

SS/FDM: F30=60(.0103, 49)
I/Cor:
Rad: CuKα
Lambda: 1.5418
Filter: Ni
d-sp:

2θ	int-f	h	k	l	2θ	int-f	h	k	l	2θ	int-f	h	k	l
14.414	100	0	0	2	39.080	2	2	0	2	60.197	20	0	0	8
17.832	2	1	0	0	42.527	4	2	0	3	61.935	4	1	1	7
19.237	10	1	0	1	43.101	100	1	1	4	63.783	25	3	0	4
23.022	6	1	0	2	44.209	20	0	0	6	64.930	15	2	2	0
28.217	10	1	0	3	48.430	2	2	1	0	64.980	2	2	0	7
29.062	40	0	0	4	48.734	4	1	1	5	65.442	2	2	2	1
31.137	95	1	1	0	49.013	2	2	1	1	66.924	30	2	2	2
32.006	20	1	1	1	53.648	4	2	1	3	69.346	30	2	2	3
34.466	100	1	1	2	55.042	50	1	1	6	72.673	45	2	2	4
35.967	6	2	0	1	55.403	70	3	0	0	73.526	25	3	0	6
38.268	15	1	1	3	57.596	50	3	0	2					

PCPDFWIN - [PDF # 080488, Wavelength = 1.5405 (Å)]

PDFNumber: 08-0488 Quality: I

CAS Number: K2 Ti F6
Potassium Titanium Fluoride
Ref: Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 7, 40 (1957)


Molecular Weight: 240.09
Volume[CD]: 132.42
Dx: 3.011 Dm:

S.G.: P3m1 (164)
Cell Parameters:
a 5.727 b c 4.661
α β γ

SS/FDM: F30=52(.0145, 40)
I/Cor:
Rad: CuKα1
Lambda: 1.5405
Filter: Ni
d-sp:

2θ	int-f	h	k	l	2θ	int-f	h	k	l	2θ	int-f	h	k	l
17.868	30	1	0	0	59.424	4	0	0	3	89.440	4	4	0	2
19.029	20	0	0	1	63.622	10	2	1	2	90.790	4	4	1	0
26.212	100	1	0	1	65.082	14	2	2	0	91.071	2	1	1	4
31.182	40	1	1	0	68.651	10	1	1	3	93.840	2	2	0	4
36.176	10	2	0	0	71.482	10	3	1	1	94.015	2	2	2	3
36.805	4	1	1	1	71.626	10	2	0	3	97.759	2	2	2	2
38.592	25	0	0	2	78.350	2	2	2	2	102.21	2	2	1	4
41.186	100	2	0	1	80.012	4	4	0	1	103.40	1	1	4	2
42.844	25	1	0	2	81.137	4	3	1	2	105.20	2	4	0	3
50.442	2	1	1	2	82.755	2	0	0	4	107.59	2	3	3	0
52.571	14	2	1	1	85.525	4	1	0	4	107.95	2	3	0	4
53.934	20	2	0	2	85.712	4	3	0	3	111.40	2	0	0	5
55.563	8	3	0	0	88.337	4	3	2	1	113.89	4	4	2	1

Lampiran 7 : Komposisi Penghalus Butir *Flux Coveral GR 2815*



FOSECO

Edition 01/05 Technical Data Sheet

COVERAL* GR 2815

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

General description	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.
Advantages	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.
Application	Any dross present on the melt surface should be carefully removed. The required amount of COVERAL GR 2815 is then placed on the melt surface and plunged to the bottom of the melt using a clean and preheated plunging tool and stirred vigorously into the melt. After the reaction is complete the melt surface should be drossed off using a suitable skimming tool. Any subsequent degassing by tablets or by FDU impeller treatment can be done without any detrimental effects to the grain refining efficiency.
Application temperature	700 °C and higher.
Addition rate	0.05 - 0.15 % of the metal weight, depending on alloy type.
Packing	25 kg polyethylene lined multi-ply paper sacks.
Storage	Like all fluxes, COVERAL GR 2815 should be stored in a dry place. Close opened packages or storage bins securely after use.
Labelling	Xn Harmful.
Health and safety	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.
Further remarks	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 0164735565 - Fax +33 0164735566 - www.foseco.fr

Lampiran 8 : Sheet Komponen *Cylinder Head* LPDC

Temperatur melting : 800 °c

Komposisi : 0.120 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr

Temperatur penambahan : 710 ± 10 °c

Waktu GBF : 2 menit

No Shot	No Dies	Temp. Dies °c		molten	mesin	Menit ke	LPDC
		Upper	Lower				
1	27	262	376	711	256	0	
	40	260	366				
2	27	262	348	711	256		
	40	261	350				
3	27	260	356	711	256		Misrun sirip
	40	258	351				Misrun sirip
4	27	236	362	712	256	30	
	40	235	361				
5	27	251	363	712	262		
	40	249	360				
6	27	261	373	712	262		
	40	260	371				
7	27	266	376	712	262		
	40	263	378				
8	27	267	374	712	262		
	40	265	376				
9	27	278	380	712	262		
	40	275	382				
10	27	274	377	712	262		
	40	273	376				
11	27	275	380	712	262	60	
	40	274	379				
12	27	276	383	712	262		
	40	274	380				
13	27	274	386	711	262		
	40	273	380				
14	27	276	395	711	262		
	40	274	388				
15	27	275	394	711	262		
	40	273	389				
16	27	269	392	711	262		
	40	273	390				
17	27	280	398	711	262		
	40	276	390				
18	27	273	398	711	268		
	40	275	395				
19	27	269	407	712	268		
	40	267	402				
20	27	270	391	711	268	120	
	40	275	394				

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.00 wt. %
 Temperatur molten : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 8 menit

No shot	No Dies	Temp Dies °c		Temp molten	Tekanan mesin	Menit ke	Jenis cacat LPDC
		Upper	Lower				
1	27	260	376	711	256	0	Misrun sirip
	40	258	362				
2	27	246	360	710	256		
	40	247	354				Misrun sirip
3	27	250	355	711	256		Misrun sirip
	40	256	360				Misrun sirip
4	27	255	373	711	256	30	
	40	261	365				
5	27	258	362	712	262		
	40	255	377				
6	27	262	370	712	262		
	40	260	367				
7	27	250	380	712	262		
	40	248	376				
8	27	249	380	712	262		
	40	249	383				
9	27	253	377	713	262		
	40	256	379				
10	27	260	388	712	262		
	40	255	387				
11	27	249	390	712	262	60	
	40	252	389				
12	27	260	377	712	262		Misrun sirip
	40	257	374				Misrun sirip
13	27	247	374	711	262		
	40	250	378				
14	27	253	386	712	262		
	40	256	390				
15	27	248	381	713	262		
	40	252	378				
16	27	249	386	713	262		
	40	254	381				
17	27	239	377	711	262		
	40	241	376				
18	27	249	383	711	268		
	40	254	390				
19	27	256	380	712	268		
	40	266	374				Misrun sirip
20	27	261	383	711	268	120	
	40	260	363				Misrun sirip

Lampiran 9 : Sheet Trial Komponen Cylinder Head hasil LPDC di PT AHM

Tanpa penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.00 wt. %
 Temperatur molten : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 8 menit
 Trial : 1

Waktu	No. Shot	No. Dies	Temp. Dies (°C)		Temp.LPDC		Tekanan Mesin (KPa)	Waktu (sec)	Marking	Jenis Cacat		Repair	Ket.
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer				LPDC	LPDC		
16.03	1	FI. 1											TRIAL
		FI. 2											
16.07	2	FI. 1											TRIAL
		FI. 2											
16.12	3	FI. 1	260	375	715	737	256	177	H 1				
		FI. 2	260	377									
16.16	4	FI. 1	256	380	714	736	256	177	H 2		MS.UPPER		
		FI. 2	256	388						KOPONG		REJECT	
16.20	5	FI. 1	264	391	713	741	256	177	H 3		MS.EX		
		FI. 2	263	402						KOPONG		REJECT	
16.25	6	FI. 1	257	387	713	749	256	177	H 4		MS.IN		
		FI. 2	257	397									
16.30	7	FI. 1	261	392	713	745	256	177	H 5		CUTTER		
		FI. 2	259	405							CUTTER		
16.36	8	FI. 1	230	372	714	757	256	177	H 6				DRY COATING DIES
		FI. 2	230	381									
16.41	9	FI. 1	261	397	714	743	256	177	H 7				
		FI. 2	258	396									

16.45	10	FI. 1	268	404	713	746	256	177	H 8		MS.EX	
		FI. 2	266	412								
16.50	11	FI. 1	252	386	713	754	256	177	H 9			
		FI. 2	250	394								
16.55	12	FI. 1	263	393	714	743	256	177	H 10			
		FI. 2	260	406								
17.01	13	FI. 1	263	386	714	750	256	177	H 11		MS.EX	
		FI. 2	264	398								
17.06	14	FI. 1	263	396	714	741	256	177	H 12		MS.UPPER	
		FI. 2	263	410								
17.11	15	FI. 1	267	395	714	745	256	177	H 13		MS.IN	
		FI. 2	249	408							MS.UPPER	
17.15	16	FI. 1	265	399	714	745	262	177	H 14			
		FI. 2	264	414								
17.20	17	FI. 1	262	411	713	739	262	177	H 15			
		FI. 2	264	418							MS.UPPER	
17.24	18	FI. 1	267	407	713	743	262	177	H 16			TRIAL
		FI. 2	262	416								TRIAL
17.29	19	FI. 1	268	392	715	749	262	177	H 17		MS.EX	
		FI. 2	269	399								
17.34	20	FI. 1	274	398	714	737	262	177	H 18			
		FI. 2	275	412							CUTTER	
17.38	21	FI. 1	265	399	713	740	262	177	H 19		MS.PL	
		FI. 2	265	412								
17.44	22	FI. 1	269	396	714	742	262	177	H 20			
		FI. 2	266	408							MS.UPPER	
17.48	23	FI. 1	264	396	713	740	262	177	H 21			
		FI. 2	259	408							MS.UPPER	
17.53	24	FI. 1	278	406	714	738	262	177	H 22		MS.EX	
		FI. 2	269	415								
17.58	25	FI. 1	273	400	713	741	262	177	H 23			
		FI. 2	268	413								
18.03	26	FI. 1	262	405	713	739	262	177	H 24			
		FI. 2	263	415								
18.07	27	FI. 1	271	404	712	736	262	177	H 25			

		FI. 2	268	418								
18.12	28	FI. 1	268	402	712	739	268	177	H 26			
		FI. 2	264	414								
18.17	29	FI. 1	265	402	713	740	268	177	H 27			
		FI. 2	254	413								
18.24	30	FI. 1	269	410	713	738	268	177	H 28			
		FI. 2	266	418								
18.28	31	FI. 1	271	410	713	742	268	177	H 29			
		FI. 2	267	418								
18.34	32	FI. 1	273	392	713	746	268	177	H 30		MS.EX	
		FI. 2	270	407							MS.UPPER	
18.38	33	FI. 1	274	404	713	736	268	177	H 31			reject
		FI. 2	267	418								reject
18.36	34	FI. 1	275	405	713	738	268	177	H 32	KOTOR		reject
		FI. 2	268	415								
18.45	35	FI. 1	309	417	712	738	268	177	H 33			
		FI. 2	292	418								
18.53	36	FI. 1	304	406	712	737	268	177	H 34			
		FI. 2	290	416								
18.58	37	FI. 1	301	401	713	738	268	177	H 35			
		FI. 2	288	418								
19.03	38	FI. 1	302	411	712	736	268	177	H 36			
		FI. 2	298	417								
19.08	39	FI. 1	289	408	712	737	268	177	H 37			
		FI. 2	263	418								

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.00 wt. %
 Temperatur molten : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 8 menit
 Trial : 2

Waktu	No. Shot	No. Dies	Temp. Dies (oC)		Temp.LPDC		Tekanan Mesin (KPa)	Waktu (sec)	Marking	Jenis Cacat LPDC	Repair LPDC	Ket.
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
00.28	1	FI. 1										TRIAL
		FI. 2										
00.31	2	FI. 1										TRIAL
		FI. 2										
00.33	3	FI. 1	274	375	712	734	256	177	L 1			
		FI. 2	261	376								
00.37	4	FI. 1	287	379	711	739	256	177	L 2		UNDERCUT	
		FI. 2	270	386								
00.42	5	FI. 1	290	378	711	746	256	177	L 3		UNDERCUT	
		FI. 2	275	390								
00.52	6	FI. 1	285	331	714	751	256	177	L 4		MS.IN	
		FI. 2	272	346								
00.56	7	FI. 1	267	367	713		256	177	L 5			
		FI. 2	251	376								
01.00	8	FI. 1	284	383	712	732	256	177	L 6		MS.IN	
		FI. 2	273	390								
01.05	9	FI. 1	289	392	712	742	256	177	L 7			
		FI. 2	278	398							MS.EX	
01.09	10	FI. 1	295	398	712	743	256	177	L 8			

		FL. 2	283	398								
01.15	11	FL. 1	284	392	712	745	256	177	L 9		MS.EX	
		FL. 2	275	394								
01.19	12	FL. 1	279	404	713	738	262	177	L 10			
		FL. 2	269	405								
01.23	13	FL. 1	301	406	713	741	250	177	L 11		MS.PL	
		FL. 2	287	412								
01.28	14	FL. 1	297	402	713	741	256	177	L 12			
		FL. 2	286	407						PASIR GUGUR		REJECT
01.33	15	FL. 1	307	408	713	740	256	177	L 13	PASIR GUGUR		REJECT
		FL. 2	298	418								
01.38	16	FL. 1	309	417	713	736	262	177	L 14			
		FL. 2	297	421								
01.42	17	FL. 1	304	411	713	739	262	177	L 15		MS.PL	
		FL. 2	293	426								
01.46	18	FL. 1	290	408	713	739	262	177	L 16		M.SIRIP	REJECT
		FL. 2	286	426								
01.51	19	FL. 1	308	406	712	740	262	177	L 17		M.SIRIP	REJECT
		FL. 2	19	422								
01.55	20	FL. 1	310	401	713	740	262	177	L 18			
		FL. 2	294	421								
02.00	21	FL. 1	311	423	713	740	262	177	L 19	PASIR GUGUR (LOWER)		REJECT
		FL. 2	299	430								
02.05	22	FL. 1	281	404	712	745	262	177	L 20			
		FL. 2	280	415								

02.12	23	FI. 1	260	336	713	754	256	177	L 21			
		FI. 2	259	389								
02.18	24	FI. 1	286	319	713	744	262	177	L 22			
		FI. 2	281	393								
02.23	25	FI. 1	277	320	713	738	268	177	L 23			
		FI. 2	269	409								PERBAIKAN DIES F1.1
02.31	26	FI. 1	264	317	714	747	268	177	L 24			
		FI. 2	260	375								
02.40	27	FI. 1	269	304	714	738	268	177	L 25			
		FI. 2	265	358								
02.44	28	FI. 1	260	317	713	729	268	177	L 26			
		FI. 2	258	392								
02.50	29	FI. 1	287	321	713	737	268	177	L 27			
		FI. 2	280	399								
02.55	30	FI. 1	294	321	711	734	268	177	L 28			
		FI. 2	284	406								
03.00	31	FI. 1	281	320	712	742	268	177	L 29			
		FI. 2	272	391								
03.04	32	FI. 1	283	323	712	739	268	177	L 30		MS.EX	
		FI. 2	264	399						PASIR GUGUR		REJECT
03.09	33	FI. 1	X	327	713	730	268	177	L 31			
		FI. 2	X	399								
03.13	34	FI. 1	X	318	712	738	268	177	L 32			
		FI. 2	X	404								
												DIES REPAIR

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.00 wt. %
 Temperatur molten : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 8 menit
 Trial : 3

Waktu	No. Shot	No. Dies	Temp. Dies (oC)		Temp.LPDC		Tekanan Mesin (KPa)	Waktu (sec)	Marking	Jenis Cacat LPDC	Repair LPDC	Ket.
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
07.05	1	Fl. 1										TRIAL
		Fl. 2										
07.09	2	Fl. 1										TRIAL
		Fl. 2										
07.14	3	Fl. 1	252	362	713	750	250	177	D 1			
		Fl. 2	248	374								
07.19	4	Fl. 1	246	374	712	740	250	177	D 2		MS.PL	
		Fl. 2	238	391								
07.24	5	Fl. 1	250	372	712	752	250	177	D 3		MS.UPPER	DIES COATING
		Fl. 2	243	390								
07.33	6	Fl. 1	220	345	713	757	256	177	D 4			
		Fl. 2	205	362								
07.38	7	Fl. 1	230	374	713	752	256	177	D 5			
		Fl. 2	223	390								
07.43	8	Fl. 1			713	752	256	177	D 6			
		Fl. 2										
07.49	9	Fl. 1	262	383	713	741	256	177	D 7		MS.PL	
		Fl. 2	252	403								
07.54	10	Fl. 1	248	390	713	748	256	177	D 8		MS.PL	

		FL. 2	250	405								
07.59	11	FL. 1	237	392	713	746	256	177	D 9			
		FL. 2	238	408								
08.03	12	FL. 1	242	399	713	747	256	177	D 10			
		FL. 2	230	416								
08.08	13	FL. 1	254	401	713	747	256	177	D 11		MS.PL	
		FL. 2	260	415						KOPONG		REJECT
08.13	14	FL. 1	257	402	713	749	256	177	D 12			DIES DIBERI DARK
		FL. 2	258	415								
08.18	15	FL. 1	250	394	713	748	256	177	D 13		MS.PL	
		FL. 2	241	408								
08.29	16	FL. 1	247	396	714	744	256	177	D 14		MS.PL	
		FL. 2	249	411								
08.28	17	FL. 1	264	397	713	745	256	177	D 15			
		FL. 2	257	408								
08.32	18	FL. 1	263	401	714	737	262	177	D 16		MS.PL	
		FL. 2	250	415								PENGOLESAN DARK
08.38	19	FL. 1	263	393	713	747	262	177	D 17			PENGOLESAN DARK
		FL. 2	246	402								
08.44	20	FL. 1	251	381	714	746	262	177	D 18		UNDRE CUT	
		FL. 2	243	394							MS.PL	
08.49	21	FL. 1	247	393	713	738	262	177	D 19		MS.PL	PENGOLESAN DARK
		FL. 2	241	403								PENGOLESAN DARK
08.53	22	FL. 1	260	397	713	735	262	177	D 20			

		FI. 2	260	412								
08.58	23	FI. 1	250	395	713	739	262	177	D 21		MS.PL	
		FI. 2	255	411								
09.04	24	FI. 1	254	395	713	740	262	177	D 22			PENGOLESAN DARK
		FI. 2	258	407								PENGOLESAN DARK
09.08	25	FI. 1	263	401	713	737	262	177	D 23		MS.PL	
		FI. 2	267	414								
09.13	26	FI. 1	252	390	713	742	262	177	D 24			
		FI. 2	260	403							MS.PL	
09.18	27	FI. 1	266	396	713	736	262	177	D 25			
		FI. 2	265	406								
09.23	28	FI. 1	260	400	713	736	262	177	D 26			
		FI. 2	251	412								
09.27	29	FI. 1	269	400	713	738	262	177	D 27		MS.PL	
		FI. 2	265	410								
09.32	30	FI. 1	267	405	713	736	262	177	D 28		MS.EX	
		FI. 2	265	420								
09.37	31	FI. 1	260	406	713	738	268	177	D 29		MS.PL	
		FI. 2	261	420								
09.42	32	FI. 1	267	403	713	740	268	177	D 30	PASIR GUGUR		REJECT
		FI. 2	262	412								
09.47	33	FI. 1	267	398	713	740	268	177	D 31			
		FI. 2	265	411							MS.PL	
09.52	34	FI. 1	265	395	712	736	268	177	D 32			
		FI. 2	262	409								

09.57	35	Fl. 1	263	400	712	733	268	177	D 33			
		Fl. 2	256	413							MS.PL	
10.02	36	Fl. 1	269	396	712	737	268	177	D 34			
		Fl. 2	256	407								
10.07	37	Fl. 1	254	395	712	736	268	177	D 35			
		Fl. 2	251	408								
10.12	38	Fl. 1	253	397	712	734	268	177	D 36			
		Fl. 2	260	415								

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.00 wt. %
 Temperatur molten : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 8 menit
 Trial : 4

Waktu	No. Shot	No. Dies	Temp. Dies (oC)		Temp.LPDC		Tekanan Mesin (KPa)	Waktu (sec)	Marking	Jenis Cacat	Repair	ket
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
16.10	1	Fl. 1										TRIAL
		Fl. 2										
16.14	2	Fl. 1							H 1		MS.EX	
		Fl. 2										
16.19	3	Fl. 1	266	368	714	737	250	177	H 2		MS.UPPER	
		Fl. 2	257	367								
16.24	4	Fl. 1	275	392	713	739	256	177	H 3		MS.UPPER	
		Fl. 2	264	387								

16.29	5	Fl. 1	280	319	713	746	256	177	H 4		MS.UPPER	
		Fl. 2	270	384							MS.PL	PENGERUKAN KOTORAN
16.36	6	Fl. 1	229	354	714	756	256	177				TRIAL
		Fl. 2	220	356								
16.40	7	Fl. 1	264	428	714	743	256	177				TRIAL
		Fl. 2	254	410								
16.43	8	Fl. 1	264	393	714	745	256	177	H 5			
		Fl. 2	260	392							MS.EX	
16.48	9	Fl. 1	260	394	714	739	256	177	H 6		MS.EX	
		Fl. 2	258	394								
16.53	10	Fl. 1	262	393	713	747	256	177	H 7		MS.IN	
		Fl. 2	258	395							MS.UPPER	
17.00	11	Fl. 1	227	357	714	756	256	177	H 8			COATING DIES
		Fl. 2	218	368						MISRUN		REJECT
17.05	12	Fl. 1	250	380	713	738	256	177	H 9			
		Fl. 2	248	384								
17.11	13	Fl. 1	240	375	714	749	256	177				PENGERUKAN KOTORAN
		Fl. 2	237	380								TRIAL
17.15	14	Fl. 1	257	392	714	745	256	177	H 10		MS.EX	
		Fl. 2	256	389								
17.19	15	Fl. 1	265	405	714	735	256	177	H 11			
		Fl. 2	267	397								
17.24	16	Fl. 1	267	402	713	740	256	177	H 12	MISRUN		REJECT
		Fl. 2	266	405								
17.28	17	Fl. 1	269	415	713	743	262	177	H 13		MS.EX	
		Fl. 2	266	409							MS.UPPER	

17.33	18	Fl. 1	272	402	713	744	262	177	H 14			
		Fl. 2	268	415								
17.38	19	Fl. 1	268	409	713	745	262	177	H 15		MS.EX	
		Fl. 2	267	407								
17.44	20	Fl. 1	250	378	713	754	262	177	H 16		MS.EX	
		Fl. 2	247	386							MS.EX	
17.48	21	Fl. 1	264	396	713	735	262	177	H 17			
		Fl. 2	263	409								
17.53	22	Fl. 1	272	410	713	740	262	177	H 18		MS.EX	
		Fl. 2	271	416								
17.58	23	Fl. 1	271	411	713	740	262	177	H 19			
		Fl. 2	270	413								
18.02	24	Fl. 1	277	412	713	742	262	177	H 20			
		Fl. 2	275	420								
18.07	25	Fl. 1	280	401	713	747	262	177	H 21		MS.IN	
		Fl. 2	276	412								
18.12	26	Fl. 1	260	396	714	746	262	177	H 22			
		Fl. 2	261	407								
18.17	27	Fl. 1	268	402	713	741	262	177	H 23			
		Fl. 2	267	409								
18.22	28	Fl. 1	260	400	713	743	262	177	H 24			
		Fl. 2	255	411								
18.31	29	Fl. 1		390	714	729	268	177	H 25			
		Fl. 2		389								
18.36	30	Fl. 1		390	714	729	268	177	H 26			
		Fl. 2		389								
18.43	31	Fl. 1		398	713	735	268	177	H 27		MS.EX	

		FL. 2	269	407								
18.48	32	FL. 1	275	407	712	736	268	177	H 28			
		FL. 2	274	713								
18.52	33	FL. 1	274	409	712	739	268	177	H 29		MS.EX	
		FL. 2	272	416								
18.57	34	FL. 1	277	412	712	738	268	177	H 30			
		FL. 2	276	421								
19.01	35	FL. 1	270	407	712	741	268	177	H 31	PART NEMPEL		REJECT
		FL. 2	268	419								

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.00 wt. %
 Temperatur molten : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 8 menit
 Trial : 5

Waktu	No. Shot	No. Dies	Temp. Dies (oC)		Temp.LPDC		Tekanan Mesin (KPa)	Waktu (sec)	Marking	Jenis Cacat	Repair	Ket.
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
00.13	1	FL. 1										TRIAL
		FL. 2										
00.16	2	FL. 1										TRIAL
		FL. 2										
00.19	3	FL. 1		388	711	737	256	177	L 1		MS.PL,UPPER	
		FL. 2		377								
00.24	4	FL. 1		386	712	745	256	177	L 2		MS.IN,EX	

		FI. 2	381							CONE PATAH		REJECT
00.29	5	FI. 1	384	712	754	256	177	L 3		PASIR GUGUR		REJECT
		FI. 2	378									
00.34	6	FI. 1	393	712	748	256	177	L 4			MS.IN,EX,UPPER	
		FI. 2	393							MISRUN SIRIP		REJECT
00.39	7	FI. 1	392	712	749	256	177	L 5				
		FI. 2	389									
00.46	8	FI. 1	361	713	759	256	177	L 6				
		FI. 2	364								MS.PL	
00.50	9	FI. 1	388	714	737	256	177	L 7				
		FI. 2	385									
00.56	10	FI. 1	390	713	748	256	177	L 8				
		FI. 2	387									
01.01	11	FI. 1	393	714	744	256	177	L 9				
		FI. 2	386									
01.06	12	FI. 1	388	714	744	262	177	L 10			MS.EX	
		FI. 2	386									
01.11	13	FI. 1	397	714	741	250	177	L 11				
		FI. 2	391									
01.15	14	FI. 1	401	713	742	256	177	L 12				
		FI. 2	400									
01.20	15	FI. 1	403	713	743	256	177	L 13				
		FI. 2	399									
01.25	16	FI. 1	409	713	740	256	177	L 14				
		FI. 2	406									

01.30	17	FI. 1		396	713	747	256	177	L 15		MS.EX	
		FI. 2		398								
01.35	18	FI. 1		406	714	738	262	177	L 16			
		FI. 2		408								
01.39	19	FI. 1		409	713	742	262	177	L 17			
		FI. 2		408								
01.44	20	FI. 1		406	713	741	262	177	L 18			
		FI. 2		408								
01.49	21	FI. 1		392	713	745	262	177	L 19			DI OLES DARK
		FI. 2		396								DI OLES DARK
01.55	22	FI. 1		387	713	745	262	177	L 20			
		FI. 2		391								
02.02	23	FI. 1		363	714	745	262	177	L 21		MS.IN,PL	
		FI. 2		370								
02.09	24	FI. 1		403	715	744	262	177	L 22		MS.EX	
		FI. 2		382							MS.EX,IN	
02.13	25	FI. 1		390	713	732	262	177	L 23			
		FI. 2		390								
02.18	26	FI. 1		398	713	736	268	177	L 24	MISRUN		REJECT
		FI. 2		400								
02.22	27	FI. 1		406	712	738	268	177	L 25			
		FI. 2		401								
02.27	28	FI. 1		402	712	737	268	177	L 26		MS.EX	
		FI. 2		403								
02.32	29	FI. 1		401	712	738	268	177	L 27			
		FI. 2		403								

02.36	30	Fl. 1		405	712	737	268	177	L 28	MISRUN		REJECT
		Fl. 2		409								
02.41	31	Fl. 1		409	713	742	268	177	L 29			
		Fl. 2		410								
02.45	32	Fl. 1		413	711	737	268	177	L 30			
		Fl. 2		412								
02.50	33	Fl. 1		408	712	740	268	177	L 31			
		Fl. 2		407								
02.54	34	Fl. 1		411	711	737	268	177	L 32			
		Fl. 2		411								
02.59	35	Fl. 1		407	711	740	268	177	L 32	MISRUN		REJECT
		Fl. 2		411						MISRUN		REJECT

Dengan penambahan penghalus butir dan unsur modifikasi

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr
 Temperatur penambahan : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 2 menit
 Trial : 1

Waktu	No Shot	No. Dies	Temp. Dies (°C)		Temp. LPDC (°C)		Tekanan Mesin (Kpa)	Waktu (s)	Marking	Cacat LPDC	Repair LPDC	Keterangan
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
	1	F#1										TRIAL
		F#2										
	2	F#1										TRIAL
		F#2										
20.20	3	F#1	230	394	713	737	250	177	H. 1			
		F#2	237	396								
20.26	4	F#1	255	397	713	735	250	177	H. 2			
		F#2	262	398								
20.30	5	F#1	259	401	713	721	250	177	H. 3		Ms.Ex	
		F#2	255	404								
20.35	6	F#1	265	401	714	726	250	177	H. 4			
		F#2	264	404								
20.39	7	F#1	282	405	713	724	250	177	H. 5			
		F#2	281	417								
20.44	8	F#1	281	415	713	726	250	177	H. 6			
		F#2	281	413								
20.48	9	F#1	281	412	714	725	250	177	H. 7			
		F#2	279	403								

20.53	10	F#1	282	409	713	723	250	177	H. 8		
		F#2	280	401							
20.57	11	F#1	-	402	714	718	250	177	H. 9		speedy di pinjam
		F#2	-	406							
21.02	12	F#1	-	403	714	717	250	177	H. 10		
		F#2	-	410							
21.07	13	F#1	-	405	713	718	250	177	H. 11		
		F#2	-	417							
21.11	14	F#1	302	424	713	716	256	177	H. 12		
		F#2	298	424							
21.15	15	F#1	296	425	713	718	256	177	H. 13		
		F#2	283	421							
21.20	16	F#1	304	424	713	718	256	177	H. 14		
		F#2	291	423							
21.24	17	F#1	304	427	713	721	253	177	H. 15		
		F#2	301	423							
21.31	18	F#1	301	411	713	730	256	177	H. 16		
		F#2	298	403							
21.36	19	F#1	286	425	711	713	256	177	H. 17		
		F#2	281	416							
21.40	20	F#1	295	424	713	718	256	177	H. 18		
		F#2	290	421							
21.45	21	F#1	287	425	712	717	256	177	H. 19		
		F#2	286	418							
21.49	22	F#1	297	422	713	715	256	177	H. 20		
		F#2	293	423							
21.54	23	F#1	296	427	713	718	256	177	H. 21		

		F#2	290	426								
21.59	24	F#1	291	425	712	721	256	177	H. 22			
		F#2	290	414								
22.03	25	F#1	286	430	712	712	256	177	H. 23			
		F#2	281	428								
22.08	26	F#1	290	424	711	716	256	177	H. 24			
		F#2	284	423								
22.13	27	F#1	293	422	713	722	256	177	H. 25			
		F#2	284	421								
22.18	28	F#1	296	425	712	719	262	177	H. 26			
		F#2	281	418								
22.22	29	F#1	306	430	712	715	262	177	H. 27			
		F#2	295	426								
22.27	30	F#1	307	424	712	719	262	177	H. 28			
		F#2	292	419								
22.31	31	F#1	303	423	712	715	262	177	H. 29			
		F#2	294	422								
22.38	32	F#1	301	434	711	715	262	177	H. 30			
		F#2	296	424								

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr
 Temperatur penambahan : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 2 menit
 Trial : 2

Waktu	No Shot	No. Dies	Temp. Dies (°C)		Temp. LPDC (°C)		Tekanan Mesin (Kpa)	Waktu (s)	Marking	Cacat LPDC	Repair LPDC	Keterangan
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
00.19	1	F#1										TRIAL
		F#2										
00.24	2	F#1										TRIAL
		F#2										
00.28	3	F#1	-		711	720	250	177	L 1			
		F#2	-	376								
00.33	4	F#1	-		712	719	256	177	L 2			
		F#2	-	385								
00.37	5	F#1	-		712	716	256	177	L 3			
		F#2	-	394								
00.42	6	F#1	-		711	718	256	177	L 4			
		F#2	-	398								
00.46	7	F#1	-		712	722	256	177	L 5			
		F#2	-	403								
00.50	8	F#1	-		712	722	256	177	L 6			
		F#2	-	405								
00.55	9	F#1	-		712	718	256	177	L 7			
		F#2	-	411								
00.59	10	F#1	-		712	719	256	177	L 8			

		F#2	-	412								
01.04	11	F#1	-		712	719	256	177	L 9			
		F#2	-	419								
01.08	12	F#1	-		712	7250	262	177	L 10			
		F#2	-	420								
01.12	13	F#1	-		712	721	250	177	L 11			
		F#2	-	412								
01.16	14	F#1	-		713	721	256	177	L 12			
		F#2	-	418								
01.20	15	F#1	-		712	720	256	177	L 13			
		F#2	-	410								
01.24	16	F#1	-		713	717	256	177	L 14			
		F#2	-	413								
01.29	17	F#1	-		714	720	256	177	L 15			
		F#2	-	415								
01.35	18	F#1	-		714	721	256	177	L 16		MS.PL	
		F#2	-	413								
01.39	19	F#1	-		713	721	256	177	L 17			
		F#2	-	410								
01.44	20	F#1	-		712	714	262	177	L 18			
		F#2	-	415								
01.50	21	F#1	-		712	717	262	177	L 19			
		F#2	-	420								
01.55	22	F#1	-		713	720	262	177	L 20			
		F#2	-	419								
01.59	23	F#1	-		713	716	262	177	L 21			
		F#2	-	419								

02.03	24	F#1	291	418	712	715	262	177	L 22			
		F#2	290	419								
02.08	25	F#1	291	438	712	714	262	177	L 23			
		F#2	288	422								
02.12	26	F#1	296	435	712	715	262	177	L 24			
		F#2	293	422								
02.18	27	F#1	276	422	712	726	262	177	L 25			
		F#2	274	402								
02.22	28	F#1	288	420	712	714	262	177	L 26			
		F#2	285	412								
02.27	29	F#1	291	430	711	713	262	177	L 27			
		F#2	286	420								
02.32	30	F#1	-		713	715	262	177	L 28			
		F#2	-	425								
02.36	31	F#1	-		711	718	268	177	L 29			
		F#2	-	415								
02.40	32	F#1	-		711	715	268	177	L 30			
		F#2	-	417								
02.44	33	F#1	-		713	719	268	177	L 31			
		F#2	-	413								
02.49	34	F#1	-		712	720	268	177	L 32			
		F#2	-	420								
02.54	35	F#1	-		712	718	268	177	L 33			
		F#2	-	414								
02.59	36	F#1	-		712	720	268	177	L 34			
		F#2	-	422								
03.04	37	F#1	-		713	723	268	177	L 35			

		F#2	-	412							
03.09	38	F#1	-		710	723	268	177	L 36		
		F#2	-	413							
03.14	39	F#1	-		711	717	268	177	L 37		
		F#2	-	415							
03.18	40	F#1	-		710	713	268	177	L 38		
		F#2	-	420							
03.22	41	F#1	-		710	714	268	177	L 39		
		F#2	-	420							

Temperatur melting : 800 °c

Komposisi : 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr

Temperatur penambahan : 710 ± 10 °c

Waktu GBF : 2 menit

Trial : 3

Waktu	No Shot	No. Dies	Temp. Dies (°C)		Temp. LPDC (°C)		Tekanan Mesin (Kpa)	Waktu (s)	Marking	Cacat LPDC	Repair LPDC	Keterangan
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
7.10	1	F#1										Trial
		F#2										Trial
7.14	2	F#1										Trial
		F#2										Trial
7.17	3	F#1	289	370	714	717	250	177	D1		MR Ex	
		F#2	287	374					D1		MR Upper	
7.24	4	F#1	290	377	719	713	250	177	D2			
		F#2	290	380					D2			

7.26	5	F#1	299	389	712	722	250	177	D3	Pasir Gugur		Reject
		F#2	298	386					D3			
7.31	6	F#1	287	390	713	726	250	177	D4			
		F#2	288	371					D4			
7.37	7	F#1	270	358	712	729	256	177	D5		MR Ex	
		F#2	242	379					D5			
7.41	8	F#1	243	376	713	718	256	177	D6			
		F#2	225	391					D6			
375	9	F#1	243	362	712	731	256	177	D7			setelah ini prehating
		F#2	229	381					D7			setelah ini prehating
8.21	10	F#1	240	365	716	699	256	177	D8			
		F#2	232	374					D8			
8.25	11	F#1	248	375	712	707	256	177	D9			Dioles dulu pk dark
		F#2	243	392					D9			
8.31	12	F#1	259	371	712	717	256	177	D10			
		F#2	248	389					D10			
8.35	13	F#1	261	377	712	721	256	177	D11			coating insitu upper
		F#2	258	389					D11			coating insitu upper
8.40	14	F#1	210	377	712	721	256	177	D12			coating insitu lower
		F#2	208	395					D12			MR PL
8.45	15	F#1	263	387	712	719	256	177	D13			
		F#2	254	398					D13			
8.50	16	F#1	259	388	711	719	256	177	D14			

		F#2	246	400					D14			
8.56	17	F#1	252	361	712	733	256	177	D15			
		F#2	246	376					D15			
9.01	18	F#1	249	382	713	718	256	177	D16			
		F#2	247	380					D16			
9.07	19	F#1	239	375	712	727	262	177	D17			
		F#2	237	393					D17			
9.11	20	F#1	253	384	712	716	262	177	D18			
		F#2	248	401					D18			
9.15	21	F#1	253	391	712	716	262	177	D19			
		F#2	252	402					D19			
9.21	22	F#1	265	389	712	718	262	177	D20			
		F#2	264	400					D20			
9.25	23	F#1	240	391	712	716	262	177	D21			
		F#2	239	406					D21			
9.30	24	F#1	246	399	712	715	262	177	D22			
		F#2	245	414					D22			
9.34	25	F#1	240	394	712	718	262	177	D23	Pasir Gugur		Reject
		F#2	235	400					D23			
9.39	26	F#1	239	402	712	715	262	177	D24			
		F#2	238	416					D24			
9.44	27	F#1	253	397	712	721	262	177	D25			
		F#2	249	407					D25			
9.50	28	F#1	255	394	712	719	262	177	D26			
		F#2	248	409					D26			
9.54	29	F#1	266	397	712	719	262	177	D27			

		F#2	264	407					D27			
10.03	30	F#1	-	387	713	728	262	177	D28			
		F#2	-	397					D28			
10.08	31	F#1	-	407	712	718	262	177	D29			
		F#2	-	417					D29			
10.13	32	F#1	-	392	712	720	268	177	D30			
		F#2	-	412					D30			
10.19	33	F#1	-	375	712	729	268	177	D31			
		F#2	-	391					D31		MR Ex	
10.23	34	F#1	252	370	711	727	268	177	D32			
		F#2	251	390					D32			
10.28	35	F#1	289	385	711	714	268	177	D33			
		F#2	280	397					D33			
10.34	36	F#1	270	380	711	715	268	177	D34			
		F#2	271	393					D34			

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr
 Temperatur penambahan : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 2 menit
 Trial : 4

Waktu	No Shot	No. Dies	Temp. Dies (°C)		Temp. LPDC (°C)		Tekanan Mesin (Kpa)	Waktu (s)	Marking	Cacat LPDC	Repair LPDC	Keterangan
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
16.07	1	F#1										
		F#2										
16.12	2	F#1										
		F#2										
16.16	3	F#1	265	314	712	721	250	177	H1		MR Ex	
		F#2	263	326					H1			upper dicoating dulu
16.20	4	F#1	246	340	712	714	250	177	H2		MR Ex	
		F#2	242	358					H2		MR Ex, Upper	
16.25	5	F#1	256	342	711	722	250	177	H3			
		F#2	252	360					H3		MR Upper	
16.30	6	F#1	257	347	712	723	250	177	H4	Pasir Gugur		Reject
		F#2	253	365					H4		MR Upper	
16.35	7	F#1	253	348	713	724	250	177	H5			
		F#2	252	362					H5		MR Upper	
16.39	8	F#1	267	372	712	723	250	177	H6		MR Upper	
		F#2	259	391					H6			
16.44	9	F#1	265	392	713	728	250	177	H7		MR Upper	
		F#2	257	402					H7			

16.48	10	F#1	276	380	712	727	250	177	H8		
		F#2	260	393					H8		
16.53	11	F#1	269	377	712	724	250	177	H9		
		87	259	392					H9		
16.57	12	F#1	270	388	713	726	250	177	H10		
		F#2	263	400					H10		
17.02	13	F#1	279	391	712	724	250	177	H11		
		F#2	263	405					H11		
17.07	14	F#1	272	387	713	724	256	177	H12	MR Upper	
		F#2	265	401					H12	MR Upper	
17.11	15	F#1	289	396	713	719	256	177	H13	MR Upper	
		F#2	273	410					H13	MR Upper	
17.15	16	F#1	286	395	713	721	256	177	H14		
		F#2	281	410					H14		
17.20	17	F#1	291	400	712	724	256	177	H15		
		F#2	290	413					H15	MR Upper	
17.25	18	F#1	287	398	712	721	256	177	H16		
		F#2	286	413					H16		
17.29	19	F#1	286	402	713	721	256	177	H17		
		F#2	285	419					H17		
17.34	20	F#1	290	403	712	719	256	177	H18	MR Ex	
		F#2	290	420					H18		
17.38	21	F#1	288	401	712	721	256	177	H19		
		F#2	285	416					H19		
17.43	22	F#1	304	399	712	721	256	177	H20		
		F#2	298	413					H20		
17.47	23	F#1	289	404	712	720	256	177	H21		

		F#2	287	418					H21			
17.51	24	F#1	288	406	712	720	256	177	H22			
		407	287	422					H22			
17.56	25	F#1	290	407	712	720	256	177	H23			
		F#2	288	423					H23			
18.01	26	F#1	291	409	712	720	256	177	H24			
		F#2	290	420					H24			
18.05	27	F#1	294	408	712	718	262	177	H25			
		F#2	292	420					H25			
18.10	28	F#1	291	427	713	723	262	177	H26			
		F#2	290	415					H26			
18.14	29	F#1	287	408	712	721	262	177	H27			
		F#2	286	421					H27			
18.19	30	F#1	294	405	711	719	262	177	H28			
		F#2	292	417					H28			
18.29	31	F#1	282	379	714	719	262	177	H29			
		F#2	280	360					H29			
18.33	32	F#1	282	387	712	710	262	177	H30			
		F#2	281	399					H30			
18.37	33	F#1	282	388	712	716	262	177	H31			
		F#2	282	400					H31			
18.41	34	F#1	283	389	712	717	262	177	H32			
		F#2	280	401					H32			
18.47	35	F#1	298	407	712	718	262	177	H33			
		F#2	294	419					H33			
18.51	36	F#1	296	405	712	718	262	177	H34			
		F#2	290	416					H34			

18.57	37	F#1	296	406	711	717	262	177	H35			
		F#2	292	418					H35			
19.01	38	F#1	296	404	711	716	262	177	H36			
		F#2	294	420					H36			
19.11	39	F#1	296	403	713	718	262	177	H37			
		F#2	295	421					H37			
19.15	40	F#1	298	400	713	716	268	177	H38			
		F#2	297	399					H38			
19.19	41	F#1	298	402	714	718	268	177	H39			
		F#2	296	407					H39			
19.23	42	F#1	298	403	713	719	268	177	H40			
		F#2	298	399					H40			
19.29	43	F#1	282	406	711	718	268	177	H41			
		F#2	280	420					H41			
19.34	44	F#1	288	409	711	717	268	177	H42			
		F#2	287	422					H42			
19.39	45	F#1	289	403	712	721	268	177	H43			
		F#2	282	417					H43			

Temperatur melting : 800 °c
 Komposisi : 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr
 Temperatur penambahan : 710 ± 10 °c
 Waktu GBF : 2 menit
 Trial : 5

Waktu	No Shot	No. Dies	Temp. Dies (°C)		Temp. LPDC (°C)		Tekanan Mesin (Kpa)	Waktu (s)	Marking	Cacat LPDC	Repair LPDC	Keterangan
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
0.15	1	F#1										trial
		F#2										trial
0.20	2	F#1										trial
		F#2										trial
0.24	3	F#1	276	372	713	729	250		L1			
		F#2	275	382					L1			
0.28	4	F#1	282	382	713	732	250		L2			
		F#2	280	395					L2			
0.32	5	F#1	286	396	713	734	250		L3			
		F#2	285	407					L3			
0.37	6	F#1	292	399	712	737	250		L4			
		F#2	290	410					L4			
0.41	7	F#1	290	397	713	734	250		L5		Under cut Ex	
		F#2	289	412					L5			
0.46	8	F#1	289	402	712	733	250		L6			lower di coating
		F#2	288	413					L6		MR	
0.58	9	F#1	235	388	716	719	250		L7	Lengket		Reject
		F#2	234	392					L7		MR Ex	
1.05	10	F#1	234	400	715	731	250					trial

2.13	24	F#1	437	713	724	256	L21
		F#2	443				L21
2.17	25	F#1	425	713	725	256	L22
		F#2	422				L22
2.20	26	F#1	418	714	731	256	L23
		F#2	418				L23
2.24	27	F#1	410	713	722	256	L24
		F#2	420				L24
2.29	28	F#1	407	713	723	262	L25
		F#2	419				L25
2.33	29	F#1	414	712	721	262	L26
		F#2	424				L26
2.37	30	F#1	413	712	720	262	L27
		F#2	429				L27
2.42	31	F#1	413	712	725	262	L28
		F#2	427				L28
2.46	32	F#1	412	713	724	262	L29
		F#2	424				L29
2.51	33	F#1	406	713	726	262	L30
		F#2	422				L30
2.56	34	F#1	410	712	724	262	L31
		F#2	421				L31
3.01	35	F#1	413	712	720	262	L32
		F#2	431				L32
3.06	36	F#1	425	713	722	262	L33
		F#2	442				L33
3.10	37	F#1	441	713	726	262	L34

		F#2		452					L34			
3.14	38	F#1		420	712	721	262		L35			upper dicoating
		F#2		435					L35			
3.21	39	F#1		381	715	732	262		L36			
		F#2		394					L36			
3.25	40	F#1		407	712	715	268		L37			
		F#2		421					L37			
3.29	41	F#1		415	712	719	268		L38			
		F#2		426					L38			

Temperatur melting : 800 °c

Komposisi : 0.1 wt. % Ti + 0.018 wt. % Sr

Temperatur penambahan : 710 ± 10 °c

Waktu GBF : 2 menit

Trial : 6

Waktu	No Shot	No. Dies	Temp. Dies (°C)		Temp. LPDC (°C)		Tekanan Mesin (Kpa)	Waktu (s)	Marking	Cacat LPDC	Repair LPDC	Keterangan
			Upper	Lower	Molten	Atmosfer						
7.21	1	F#1			715	694	262					trial
		F#2										
7.25	2	F#1	220	390	711	710	262		DD1			trial
		F#2	222	345					DD1		MR Upper	trial
7.32	3	F#1	223	327	712	730	262		DD2			
		F#2	210	346					DD2		MR Upper	
7.37	4	F#1	262	358	711	712	268		DD3			
		F#2	253	378					DD3		MR Ex	
7.42	5	F#1	251	370	711	717	268		DD4		MR Ex	

		F#2	256	387					DD4		MR Upper	
7.46	6	F#1	268	381	711	718	268		DD5		MR Upper	
		F#2	261	398					DD5		MR Upper	
7.51	7	F#1	261	380	711	720	268		DD6			
		F#2	246	396					DD6		MR PL	
7.57	8	F#1	234	355	712	730	268		DD7			dicoating insitu
		F#2	224	371					DD7			dicoating insitu
8.02	9	F#1	252	373	711	716	268		DD8			
		F#2	240	390					DD8			
8.07	10	F#1	279	386	710	714	268		DD9			
		F#2	257	401					DD9			
8.11	11	F#1	278	391	710	714	268		DD10			
		F#2	270	407					DD10			
8.16	12	F#1	268	395	710	716	268		DD11			
		F#2	267	408					DD11			
8.20	13	F#1	275	396	710	717	268		DD12			
		F#2	265	414					DD12			
8.25	14	F#1	281	397	710	710	268		DD13			
		F#2	271	413					DD13			