



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN Fe DAN Sr TERHADAP
PEMBENTUKAN FASA INTERMETALIK DAN NILAI FLUIDITAS
METODE VAKUM PADA PADUAN Al-7% Si DAN Al-11% Si**

DISERTASI

**H. IS PRIMA NANDA
840500045**

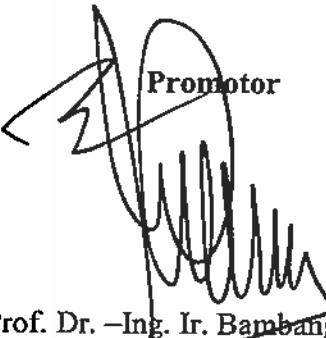
**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktorat bidang
Metalurgi dan Material**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG METALURGI DAN MATERIAL
UNIVERSITAS INDONESIA
2010**


HALAMAN PENGESAHAN

Promotor

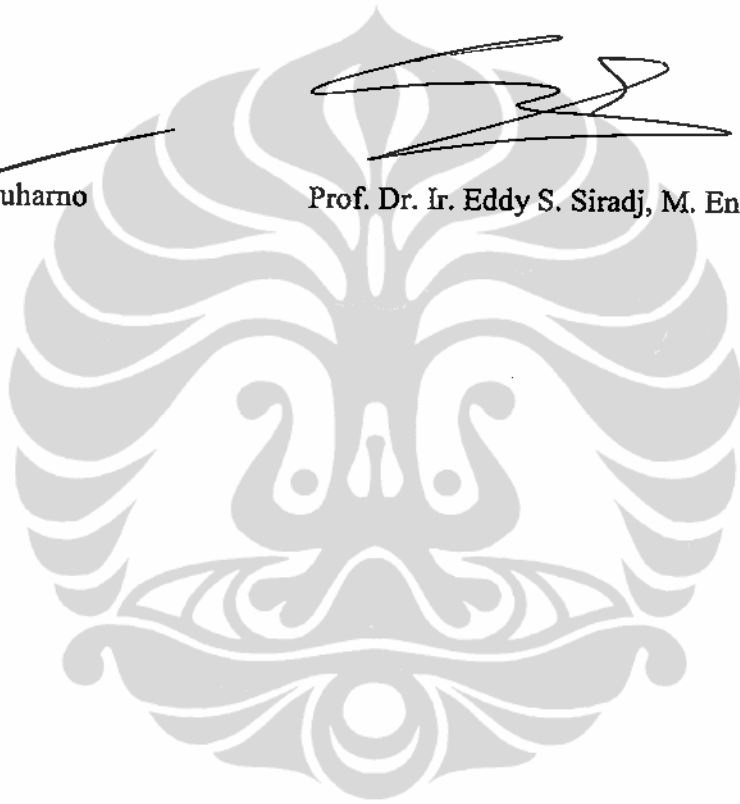
Ko-Promotor



Prof. Dr. -Ing. Ir. Bambang Suharno



Prof. Dr. Ir. Eddy S. Siradj, M. Eng



HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh:

Nama : H. Is Prima Nanda
NPM : 8405000045
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Disertasi : **PENGARUH PENAMBAHAN Fe DAN Sr TERHADAP PEMBENTUKAN FASA INTERMETALIK DAN NILAI FLUIDITAS METODE VAKUM PADA PADUAN Al-7% Si DAN Al-11% Si**

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan Diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material: Fakultas Teknik Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof. Dr. -Ing. Ir. Bambang Suharno

Ko-Promotor : Prof. Dr. Ir. Eddy S. Siradj, M. Eng

Tim Penguji : Dr. Ir. Dedi Priadi, DEA
(Anggota)

: Dr. Ir. Sri Harjanto
(Anggota)

: Dr.-Ing. Pudji Untoro
(Anggota)

: Dr. Ir. Nyoman Jujur
(Anggota)

: Prof. Dr. Ir. Gunawarman
(Anggota)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Mei 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Prof.Dr.-Ing.Bambang Suharno dan Prof.Dr.Eddy S Siradj M.Eng

Sebagai promotor dan Ko-Promotor yang telah memberikan dukungan penuh kepada penulis selama mengikuti Program Doktor di Departemen Metalurgi dan Material FTUI

1. Rektor Universitas Andalas Padang Prof.Dr.Ir.Musliar Kasim, atas izin bagi penulis mengikuti Program Doktor ini
2. Dr.Ir.Dedi Priadi,DEA., Dr.Ir.Sri Harjanto, Dr.Ir.Nyoman Jujur,MSc., Dr.-Ing.Pudji Untoro, Prof.Dr.Ir.Gunawarman,MT sebagai penguji sidang Pra-promosi dan Promosi Doktor
3. Yang selalu penulis hormati dan banggakan Ir.Bustanul Arifin M.Phil Eng (alm) . Semoga mendapatkan tempat yang baik di sisi Allah
4. Dr.-Ing Uyung Gatot selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Andalas
5. Dr.Zainuri, dan Nofrijon Phd atas masukan dan koreksinya terhadap disertasi ini
6. Prof.Dr.Ir.Johny Wahyuadi dan Prof.Dr.Anne Zulfia, M.Sc yang memberikan masukan atas disertasi
7. Kepada seluruh "Tim Fluiditas" : Fadly ST dkk, Dyto.ST dkk, Abid ST. dkk, semoga sukses ditempat kerja masing- masing. Khususnya buat Arnold Andrey, ST dan Ahmad Ashari, ST yang telah meluangkan waktu dan tenaganya.
8. Khusus kepada orang tua penulis Zainal Bakar SH dan Hj.Zuarna Azzaino, istri penulis Ike Sri Utami, SE beserta anak-anak : Imam Taufiq Ramadhan, M. Daffa, dan Rifat Ibnu Hakim dan adik-adik beserta keluarga. Terimakasih atas dukungannya selama ini.

Demikian ucapan ini kami sampaikan dengan ikhlas dan semoga Allah membalasnya.

Depok , 27 Mei 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
DISERTASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : H. Is Prima Nanda
NPM : 8405000045
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Disertasi

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

**PENGARUH PENAMBAHAN Fe DAN Sr TERHADAP
PEMBENTUKAN FASA INTERMETALIK DAN NILAI FLUIDITAS
METODE VAKUM PADA PADUAN Al-7% Si DAN Al-11% Si**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir 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 27 Mei 2010
Yang menyatakan



(H. Is Prima Nanda)

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian pengaruh penambahan Fe dan Sr terhadap perubahan struktur mikro paduan hipoeutektik Al-7% Si dan paduan eutektik Al-11% Si terutama terhadap pembentukan fasa intermetalik dan nilai fluiditas paduan dengan metode vakum (*vacuum suction test*). Perancangan dan pembuatan alat uji fluiditas metode vakum ini dilakukan untuk meminimalisasi kekurangan-kekurangan yang didapat dari pengujian fluiditas metode spiral dan metode lainnya. Hasil perancangan dan pembuatan alat ini untuk mendapatkan pengukuran temperatur dan kecepatan tuang yang lebih presisi pada saat melakukan pengujian fluiditas. Penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya, beberapa telah meneliti penggunaan Sr sebagai modifier, akan tetapi belum ada penelitian yang memfokuskan pada keterkaitan antara Sr sebagai modifier dan nilai fluiditas dari paduan hipoeutektik Al-7% Si dan paduan eutektik Al-11% Si menggunakan metode vakum. Penelitian yang dilakukan pada prinsipnya dibagi ke dalam beberapa bagian, yaitu pembuatan peralatan uji fluiditas metode vakum dan validitasnya, pembuatan master alloy hipoeutektik dan eutektik serta karakterisasinya, dan rekayasa penambahan unsur Fe dan Sr pada kedua paduan untuk melihat pengaruh penambahan Fe dan Sr terhadap pembentukan fasa intermetalik dan nilai fluiditas kedua paduan. Karakterisasi yang dilakukan adalah analisis struktur mikro, terutama fasa intermetalik yang terbentuk pada paduan Al-7% Si dan Al-11% Si secara kuantitatif dan kualitatif, menggunakan mikroskop elektron yang dilengkapi spektroskopi sinar-X (SEM/EDX) dan difraksi sinar-X (XRD).

Dalam pembuatan peralatan uji fluiditas metode vakum, pengujian validasi dengan menambahkan *modifier* Sr dan *grain refiner* Al₅TiB pada paduan komersial ADC12 didapatkan hasil yang sesuai dengan literatur. Penambahan 0,03% Sr memberikan nilai fluiditas yang paling baik, sedangkan penambahan 0,15% Al₅TiB menghasilkan butir yang halus dan nilai fluiditas yang paling baik. Sementara itu, waktu proses *degassing* sangat menentukan nilai fluiditas, karena semakin lama waktu *degassing* yang diberikan akan meningkatkan nilai fluiditas paduan komersial ADC12. Hal ini dapat dipahami karena proses *degassing* akan mengurangi gas hidrogen yang ada dalam logam cair, dimana keberadaan gas ini akan menyebabkan cacat pada produk cor. Dari hasil pengujian dan validasi variasi jenis pipa dan tekanan didapatkan bahwa, dalam penelitian ini, pipa tembaga dengan tekanan 8 inHg yang paling baik untuk digunakan.

Dari hasil pengujian fluiditas pada paduan Al-7% Si yang ditambahkan Fe, didapatkan bahwa semakin tinggi kadar Fe yang ditambahkan maka nilai fluiditas semakin turun. Hal ini dapat dipahami karena Fe akan membentuk senyawa intermetalik Al-Fe-Si yang mengganggu proses mampu alir paduan aluminium dimana semakin banyaknya fasa intermetalik yang terbentuk akan semakin menurunkan fluiditasnya. Pengujian fluiditas paduan Al-7% Si yang ditambahkan 1,2% Fe; 1,4% Fe; dan 1,6% Fe serta 0,015% Sr- 0,045% Sr memberikan hasil bahwa dengan semakin tingginya temperatur tuang maka nilai fluiditas akan semakin tinggi pada semua komposisi. Pada penambahan 0,03% Sr didapatkan nilai fluiditas yang paling tinggi pada setiap komposisi; dalam hal ini penambahan 0,03% Sr akan memodifikasi

silikon primer menjadi lebih bulat dan mengubah morfologi fasa intermetalik menjadi lebih pendek. Dengan bertambahnya kadar Fe maka ukuran panjang dan lebar maupun fraksi luas intermetalik fasa intermetalik β -Al₅FeSi akan semakin meningkat. Pada paduan Al-7% Si didapatkan fasa intermetalik yang paling panjang pada penambahan 1,6% Fe yaitu 22,21 μ m dan yang paling pendek pada penambahan 1,2% Fe yaitu 9,66 μ m. Untuk fraksi luas intermetalik yang terbentuk, dengan penambahan Fe yang semakin tinggi, akan menghasilkan fraksi luas intermetalik yang semakin besar. Pada penambahan 1,2% Fe menghasilkan fraksi luas intermetalik 3,67%, sedangkan pada penambahan 1,4% Fe dan 1,6% Fe masing-masingnya menghasilkan fraksi luas 4,03% dan 5,23%

Dari hasil pengujian fluiditas pada paduan Al-11% Si yang ditambahkan Fe, juga didapatkan bahwa semakin tinggi kadar Fe yang ditambahkan maka nilai fluiditas semakin turun. Sedangkan pengujian fluiditas paduan Al-11%Si yang ditambahkan Fe dan Sr yang bervariasi juga memberikan hasil yang sama seperti pada paduan Al-7% Si, dimana dengan semakin tinggi kadar Fe yang ditambahkan maka nilai fluiditas paduan akan turun, sedangkan nilai fluiditas yang paling tinggi diberikan oleh penambahan Sr sebesar 0,03%. Pada penambahan 1% Fe memberikan fasa intermetalik yang paling panjang yaitu 50,25 μ m, sedangkan fasa intermetalik yang paling pendek diberikan oleh penambahan 0,6 % Fe yaitu 21,3 μ m. Pada paduan Al-11% Si umumnya dengan penambahan Fe yang semakin tinggi, akan menghasilkan fraksi luas intermetalik yang semakin besar. Pada penambahan 0,6% Fe menghasilkan fraksi luas intermetalik 1,01%, sedangkan pada penambahan 0,8% Fe dan 1% Fe masing-masingnya menghasilkan fraksi luas 1,16% dan 2,26%.

Hasil pengujian fluiditas, baik pada paduan Al-7% Si maupun pada paduan Al-11 %Si memperlihatkan adanya kecenderungan bahwa dengan bertambahnya kadar Fe, akan semakin menurunkan nilai fluiditasnya; akan tetapi apabila ditambahkan dengan Sr, nilai fluiditasnya akan kembali naik. Perubahan nilai fluiditas ini didukung oleh morfologi struktur mikro dari hasil pengujian SEM yang memperlihatkan adanya matrik aluminium, struktur silikon, dan fasa intermetalik. Komposisi yang didapatkan melalui perkiraan hasil EDX diperkuat dengan data dari hasil pengujian XRD yang kemudian mengidentifikasi akan adanya fasa intermetalik α dan β . Akan tetapi, jika pada kedua paduan ini ditambahkan *modifier* Sr maka terjadi perubahan morfologi fasa intermetalik. Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa Sr berfungsi mengubah struktur mikro fasa intermetalik yang panjang menjadi lebih pendek dan bulat sehingga akan menaikkan nilai fluiditas dari kedua paduan ini. Pada penambahan 0,03% Sr didapatkan nilai fluiditas paling baik pada setiap komposisi, dalam hal ini penambahan 0,03% Sr akan memodifikasi silikon primer menjadi lebih bulat dan mengubah morfologi fasa intermetalik menjadi lebih pendek.

ABSTRACT

The effect of Fe and Sr addition on the intermetallic phase(s) formation and fluidity of the hypoeutectic Al-7% Si and eutectic Al-11% Si alloys has been investigated. Vacuum suction test equipment development for fluidity test was designed to minimize the disadvantages from spiral and other fluidity test methods. This fluidity test design was aiming at obtaining a precise temperature measurement and pouring rate in the fluidity test. Many researchers have investigated the role of Sr as a modifier but none of them focused in the relationship of Sr as a modifier and its effect on the fluidity of the hypoeutectic Al-7% Si and eutectic Al-11% Si alloys by using vacuum suction test. In this investigation, the work is divided into several sections, i.e. vacuum suction test equipment designing and development for fluidity test and its validity, synthesis of the hypoeutectic Al-7% Si and eutectic Al-11% Si alloys (master alloys) and their characterization, and effect of Fe and Sr elements addition into the master alloys on the intermetallic phase(s) formation and fluidity. The characterization that has been carried out including microstructure by using electron microscope (SEM/EDX) and X-ray diffraction (XRD).

In the test equipment designing and development for fluidity test, validation test on the addition of Sr and grain refiner Al_5TiB into commercial ADC12 alloy gives the same result as in literatures, in which the addition of 0.03% Sr gives the best performance while addition of 0.15% Al_5TiB results in fine grain and the best fluidity. At the same time, degassing time affects the flowability greatly in which the more time for degassing the better the fluidity of the commercial ADC12 alloy. This can be understood since the degassing process will reduce the hydrogen gas in the melt, which may cause defect in the casting product. The validation test on the vacuum suction equipment also shows that, in this investigation, copper tube with a pressure of 8 inHg provides the best performance.

The fluidity test on the Al-7% Si alloy with the addition of Fe shows that the increasing of Fe content results in decreasing of the fluidity. This can be understood since Fe will form an intermetallic phase of Al-Fe-Si, which will interfere and further slow down the flowability of aluminum alloys. At the same time, addition of 1.2% Fe; 1.4% Fe and 1.6% Fe, and 0.015% Sr – 0.045% Sr shows that the flowability of the alloy increases with the increasing of temperature at all compositions. In this investigation, addition of 0.03% Sr results in the highest fluidity; in this instance, addition of 0.03% Sr will modify lath primary silicon intermetallic phase to become more round and changes the intermetallic phase morphology shorter than that of without Sr addition. The formation of intermetallic phase $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ within Al-7% Si alloy increase with Fe content. This can be understood since the ability of Sr to modify the intermetallic phase decreases with the increase of Fe content. With the increase of Fe content, the fraction of $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ increases both in length and area fraction of the intermetallic phase. In this investigation, the intermetallic phase with the maximum length of 22.2 μm occurs at the addition of 1.6% Fe while the intermetallic phase with the shortest length of 9.66 μm occurs at the addition of 1.2% Fe. In the event that Sr element is added into the alloys containing these Fe contents, the size of the intermetallic phases changes with the average length of 11.3

μm . In general, the increasing content of Fe results in the increasing area fraction of the intermetallic phase. Addition of 1.2% Fe results in intermetallic area fraction of 3.67%, whilst addition of 1.4% Fe and 1.6% Fe results in the intermetallic area fractions of 4.03% and 5.23% respectively.

Fluidity test on the Al-11 % Si alloy with the addition of Fe also shows that the more Fe content the less the fluidity of the alloy. At the same time, fluidity test on the Al-11% Si alloy with the addition of various Fe and Sr compositions also results in the same way as that of Al-7% Si alloy, in which the increasing of Fe content results in decreasing of the fluidity, while the highest fluidity is given by the addition of 0.03% Sr. The formation of intermetallic phase $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ within Al-11% Si alloy also increase with Fe content. With the increase of Fe content, the fraction of $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ increases both in length and area fraction of the intermetallic phase, in which the intermetallic phase with the maximum length of 50,25 μm occurs at the addition of 1.0% Fe while the intermetallic phase with the shortest length of 21,3 μm occurs at the addition of 0.6% Fe. Addition of 0.6% of Fe results in intermetallic area fraction of 1,01%; while addition of 0.8% and 1.0% results in area fractions of 1.16% and 2.26%, respectively.

The fluidity tests of both Al-7% Si and Al-11% Si alloys show the same trend in which the more Fe content the less the fluidity, while addition of Sr increases the fluidity. The change in this fluidity result is supported by morphology and microstructure of the alloys taken from the SEM, which shows an aluminum matrix, silicon structure, and intermetallic phases. The predicted compositions from EDX analysis are supported by XRD data analysis, which identifies the presence of the intermetallic phases of α and β . However, in the event that Sr is added into these two alloys, the intermetallic phases will be change. It can be concluded that Sr has an effect on the microstructure of the intermetallic phases, in which the addition of 0.03% Sr gives the best fluidity at all compositions; in this instance, addition of 0.03% Sr modifies primary lath silicon into more round and changes the intermetallic phases morphology to become shorter than that of without Sr addition.



DAFTAR ISI

	halaman
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN A	xxiii
DAFTAR LAMPIRAN B	xxiii
DAFTAR LAMPIRAN C	xxiv
DAFTAR LAMPIRAN D	xxv
DAFTAR LAMPIRAN E	xxvi
DAFTAR LAMPIRAN F	xxvii
DAFTAR LAMPIRAN G	xxix
DAFTAR LAMPIRAN H	xxx
DAFTAR LAMPIRAN I	xxxi
DAFTAR LAMPIRAN J	xxxii
DAFTAR LAMPIRAN K	xxxiii
DAFTAR LAMPIRAN L	xxxiv
DAFTAR LAMPIRAN M	xxxv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG PENELITIAN	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN	6
1.3 RUANG LINGKUP PENELITIAN	6
1.4 PARAMETER PENELITIAN	7
1.5 ROADMAP DAN STATE OF THE ART PENELITIAN	8
1.5.1 Penelitian yang Berkaitan dengan Metode Pengujian Fluiditas	8
1.5.2 Penelitian yang Berkaitan dengan Penambahan Paduan dan Modifier	9
1.5.3 Penelitian yang Berkaitan dengan Penambahan Grain Refiner	12
BAB II LANDASAN TEORI	16
2.1 PADUAN ALUMINIUM TUANG	16
2.2 PADUAN ALUMINIUM SILIKON	16
2.2.1 Aluminium Silikon Hipoeutektik	18
2.2.2 Aluminium Silikon Eutektik	19
2.2.3 Pengaruh Unsur Paduan Aluminium Tuang	20
2.2.3.1 Silikon	20
2.2.3.2 Besi (Fe)	21
2.2.3.3 Stronsium (Sr)	22
2.3. FASA INTERMETALIK PADA PADUAN ALUMINIUM SILIKON	23
2.4 DIGRAM FASA AlFeSi	24

2.4.1	Morfologi dan Struktur Kristal	25
2.4.1.1	<i>Intermetalik α-AlFeSi atau Al_8Fe_2Si</i>	25
2.4.1.2	<i>Intermetalik β-AlFeSi atau Al_5FeSi</i>	27
2.4.2	Pembentukan Fasa Intermetalik pada Proses Pengecoran	29
2.4.3	Pengaruh Besi dan Silikon pada Fasa Intermetalik	32
2.4.4	Pengaruh Unsur Lain Terhadap Pembentukan Fasa Intermetalik	34
2.5	PENGARUH FASA INTERMETALIK TERHADAP SIFAT MEKANIS PADUAN ALUMINUM SILIKON	40
2.6	TEORI FLUIDITAS	44
2.6.1	Pengukuran Nilai Fluiditas	46
2.6.1.1	<i>Uji Fluiditas Cetakan Spiral (Spiral Test)</i>	46
2.6.1.2	<i>Uji Fluiditas Vakum</i>	47
2.6.1.3	<i>Fluidity Test Piece</i>	48
2.6.2	Faktor Yang Mempengaruhi Fluiditas	49
2.6.2.1	<i>Temperatur (Derajat Superheat)</i>	49
2.6.2.2	<i>Komposisi</i>	50
2.6.2.3	<i>Inklusi</i>	50
2.6.2.4	<i>Viskositas</i>	51
2.6.2.5	<i>Tegangan Permukaan Logam Cair</i>	52
2.7	Pengaruh Penambahan Fe dan Sr Terhadap Perbentukan Fasa Intermetalik dan Nilai Fluiditas Paduan Aluminium Silikon	53
2.8	NETRALISASI PENGARUH BURUK FASA INTERMETALIK β -AlFeSi	58
2.8.1	Penambahan Stronsium	58
2.8.2	Penambahan Grain Refiner	63
2.8.3	Pembekuan Cepat	64
2.8.4	Penambahan Elemen Paduan Netralisasi	65
2.8.5	Non-equilibrium Heat Treatment	67
2.9	PENGARUH MODIFIKASI PADA MIKROSTRUKTUR	67
2.9.1	Over Modified (Modifikasi Berlebihan)	69
2.9.2	Teori Modifikasi dan Korelasinya dengan Fluiditas	70
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	75
3.1	TAHAPAN PENELITIAN	75
3.1.1	Perancangan dan Pembuatan Alat Uji Fluiditas Metode Vakum	75
3.1.2	Validasi Alat Uji Fluiditas Metode Vakum menggunakan Paduan Komersil ADC12	79
3.1.2.1	<i>Temperatur Tuang, Jenis Pipa dan Tekanan</i>	80
3.1.2.2	<i>Validasi Alat Uji Fluiditas Metode Vakum Menggunakan Paduan Komersil ADC12 dengan Penambahan Sr dan Al_5TiB</i>	81
3.1.2.3	<i>Validasi Alat Uji Fluiditas Metode Vakum Menggunakan Paduan Komersil ADC12 dengan Variasi Waktu Degassing</i>	85
3.1.3	Pembuatan dan Pengecoran Master Alloy Aluminium Silikon (Paduan Al-7% Si dan Al-11% Si)	87

3.1.4 Rekayasa Penambahan Fe (Besi) dan Sr (Stronsium) pada Master Alloy	88
3.1.4.1 Peralatan	88
3.1.4.2 Bahan	89
3.1.4.3 Prosedur Peleburan	91
3.1.4.4 Pengujian Fluiditas	92
3.1.4.5 pengujian Komposisi Kimia	92
3.2 KARAKTERISASI MATERIAL HASIL PENGUJIAN PADUAN HIPOEUTEKTIK (Al-7% Si) DAN EUTEKTIK (Al-11% Si)	92
3.2.1 Karakterisasi Struktur Mikro (SEM/EDX)	92
3.2.1.1 Preparasi Sampel	93
3.2.1.2 Pengamatan Struktur Mikro Menggunakan SEM/EDX	96
3.2.1.3 Perhitungan Panjang dan Tebal Fasa Intermetalik	97
3.2.1.4 Perhitungan Fraksi Area Fasa Intermetalik	98
3.3 IDENTIFIKASI SENYAWA DENGAN PENGUJIAN XRD	98
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	102
4.1 PERANCANGAN, PEMBUATAN, DAN VALIDASI ALAT UJI ALAT UJI FLUIDITAS METODE VAKUM	102
4.1.1 Perancangan dan Pembuatan Alat Uji Fluiditas	102
4.1.2 Validasi Alat Uji Fluiditas Metode Vakum	104
4.1.2.1 Validasi Alat Uji dengan Memvariasikan Temperatur Tuang, Jenis Pipa dan Tekanan Vakum	105
4.1.2.2 Validasi Alat Uji dengan Penambahan Modifier Sr	111
4.1.2.3 Validasi Alat Uji dengan Penambahan Grain Refiner	117
4.1.2.4 Validasi Alat Uji dengan Variasi Waktu Degassing	125
4.1.3 Pembuatan Master Alloy Aluminium Silikon (Paduan Al-7% Si dan Al-11% Si)	131
4.2 KOMPOSISI KIMIA, PENGUKURAN NILAI FLUIDITAS DAN KARAKTERISASI STRUKTUR MIKRO PADUAN ALUMINIUM SILIKON HIPOEUTEKTIK (Al-7% Si) DAN EUTEKTIK (Al-11% Si)	135
4.2.1 Paduan Aluminium Silikon Hipoeutektik (Al-7% Si)	135
4.2.1.1 Pengujian Komposisi Kimia pada Paduan Al-7% Si	135
4.2.1.2 Pengujian Fluiditas pada Paduan Al-7% Si	136
4.2.1.3 Karakterisasi Paduan Al-7% Si dengan SEM/EDX dan XRD	146
4.2.1.4 Analisa Kualitatif dan Kuantitatif Struktur Mikro Paduan Al-7% Si	149
4.2.1.5 Perhitungan Fraksi Luas Area dengan PICSARA pada Paduan Al-7% Si	160
4.2.2 Paduan Aluminium Silikon Eutektik (Al-11% Si)	161
4.2.2.1 Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-11% Si	161
4.2.2.2 Pengujian Fluiditas pada Paduan Al-11% Si	163
4.2.2.3 Analisa Struktur Mikro pada Paduan Al-11% Si Menggunakan SEM/EDX, dan XRD	170
4.2.2.4 Analisis Kuantitatif dan Kuantitatif Struktur Mikro	

<i>paduan Al-11% Si</i>	172
<i>4.2.2.5 Perhitungan Fraksi Luas Area Dengan PICSARA pada Paduan Al-11% Si</i>	183
BAB V KESIMPULAN	188
DAFTAR ACUAN	192
LAMPIRAN	198



DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 1.1. Produksi kendaraan di Indonesia	2
Gambar 1.2. Trend penggunaan bahan baku kendaraan bermotor	2
Gambar 1.3. Komponen kendaraan bermotor roda duan dan roda empat Yang menggunakan paduan aluminium	3
Gambar 2.1 Diagram fasa Al-Si dan struktur mikro paduan pada komposisi hipoeutektik, eutektik, dan hipereutektik	17
Gambar 2.2 Struktur mikro Al-7% Si perbesaran 500x, etsa 0.5% HF 1) silikon eutektik, 2) Al ₁₂ Fe ₃ Si ₂ chinese script, 3) Mg ₂ Si chinese script	18
Gambar 2.3 Struktur mikro paduan eutektik Al-Si. Etsa 0.5% HF dan perbesaran 750x	20
Gambar 2.4 Hubungan kadar silikon terhadap fluiditas aluminium	21
Gambar 2.5 Pengaruh kandungan Si terhadap sifat mekanis pada paduan Al-Si dalam kondisi as-cast (a) kekuatan tarik (b) kekerasan	22
Gambar 2.6 (a) Kristal Silikon tidak termodifikasi, (b) Kristal Silikon termodifikasi	23
Gambar 2.7. Diagram fasa ternary AlFeSi dengan beberapa fasa intermetalik yang terdeteksi hasil pengujian menggunakan XRD	25
Gambar 2.8 Struktur heksagonal pada fasa α -AlFeSi	26
Gambar 2.9 Partikel α -AlFeSi pada Al; 0,5% Fe dan 0,2% Si (kecepatan pendinginan antara 2°K/s dan 11 °K/s). b) Gambar TEM dari " <i>chinese script</i> "	27
Gambar 2.10 Struktur monoklinik pada fasa β AlFeSi	28
Gambar 2.11 Intermetalik β -AlFeSi pada paduan Aluminium 1% Si dan 0,5% Fe (<i>depth etched</i>)	29
Gambar 2.12 Proses pembentukan fasa intermetalik pada kadar Mn 0,4%	30
Gambar 2.13 Hasil SEM dimana α -AlFeSi dalam bentuk script dan β -AlFeSi dalam bentuk pelat	31
Gambar 2.14 (a) Intermetalik β -AlFeSi berupa pelat. (b) Chinese Script α -AlFeMnSi	31
Gambar 2.15 (a) Tampilan tiga-dimensi fasa β -Al ₅ FeSi yang bagian ujungnya berbentuk jarum. (b) Tampilan tiga-dimensi fasa α -Al ₁₅ (Fe,Mn) ₃ Si ₂ yang membentuk fasa <i>chinese script</i>	32
Gambar 2.16 (a) Hubungan antara presentase Fe dengan β -AlFeSi. (b) Hubungan antara presentase Si dengan β -AlFeSi	33
Gambar 2.17 Pengaruh besi terhadap morfologi eutektik-silikon pada paduan Al-Si hipoeutektik	34

Gambar 2.18	Fasa jarum β -AlFeSi vs kubis α -AlFeMnSi (a) 200 μ m dan (b) 20 μ m	35
Gambar 2.19	Paduan Al-5% Si-1% Cu-0,5% Mg-Fe yang mengalami (a) perubahan fasa dari β -Al ₅ FeSi menjadi π -script (b) π -phase berbentuk script	36
Gambar 2.20	Gambar SEM dan komposisi kimia pada (a) Fasa β -Al ₅ FeSi dan (b) Fasa π -Al ₈ FeMg ₃ Si ₆	37
Gambar 2.21	(a) 0,7% Fe (b) 0,7 % Fe + 135 ppm Sr (c) 0,7% Fe + 200 ppm Sr + 0,3% Mn	38
Gambar 2.22	Lapisan kaya silikon di sekeliling fasa α -AlFeSi pada kehadiran Stronsium pada Paduan 6063 (0,45-0,9% Mg; 0,35% Fe; 0,20-0,6% Si; 0,10% Cr; Zn; Ti, dan 0,10 % Mn)	39
Gambar 2.23	Hasil foto mikro dari beberapa morfologi fasa intermetalik yang mengandung Fe pada paduan Al-5% Si-1% Cu-0,5% Mg-(Fe): (a) <i>platelets</i> β -Al ₅ FeSi; (b) script α -Al ₈ Fe ₂ Si; (c) fasa π yang tumbuh dari β ; (d) <i>script</i> fasa π	42
Gambar 2.24	Grafik yang menunjukkan sifat mekanis paduan Al-Si sebagai fungsi kadar Fe (a) Kekuatan tarik, dan (b) Kekerasan	42
Gambar 2.25	Pengaruh panjang maksimum fasa β -AlFeSi terhadap sifat mekanik paduan A356.2	43
Gambar 2.26	Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi pada paduan dengan <i>range</i> pembekuan pendek	45
Gambar 2.27.	Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi pada paduan dengan <i>range</i> pembekuan panjang	45
Gambar 2.28.	Metode pengujian fluiditas menggunakan cetakan spiral	46
Gambar 2.29.	Alat uji fluiditas metode vakum (<i>vacuum fluidity test</i>)	47
Gambar 2.30.	<i>Fluidity test piece</i> , setiap <i>gate</i> memiliki ketebalan yang berbeda-beda	48
Gambar 2.31.	Pengaruh derajat <i>superheat</i> terhadap nilai fluiditas: (a) logam murni (b) logam paduan	49
Gambar 2.32.	Hubungan antara komposisi dan fluiditas	50
Gambar 2.33	Pengaruh berbagai macam unsur terhadap tegangan permukaan 99,99% Al dalam lingkungan argon pada temperatur 700 sampai 740°C	52
Gambar 2.34	(a) Pertumbuhan silikon, (b) <i>Acicular</i> silikon	54
Gambar 2.35	(a) <i>Natural twin</i> , (b) <i>Impurity induced twin</i> , (c) <i>Fibrous structure f modified silicon</i> (Al-Si12) 500X	55

Gambar 2.36	Porositas pada daerah hot spot pada <i>cylindrical casting</i> dari Al-5% Si-1% Cu-0,5% Mg Untuk paduan ini kandungan Fe kritisnya 0.4	56
Gambar 2.37	Skema aliran logam cair pada <i>channel</i> fluiditas. fraksi <i>solid</i> meningkat dengan berjalannya waktu, akumulasi pembekuan dendrit pada ujung aliran logam	57
Gambar 2.38	Kurva perbandingan nilai fluiditas antara aluminium bersih dengan yang mengandung pengotor	57
Gambar 2.39	Diagram <i>aluminium rich corner</i> fasa Al-Fe-Si yang menjelaskan pengaruh penambahan <i>modifier</i> Sr dan kecepatan pendinginan terhadap perluasan area fasa α -AlFeSi	61
Gambar 2.40	Skema ilustrasi terdekomposisinya fasa β platelets pada paduan Al- Fe-Si yang dimodifikasi Sr (rasio Fe/Si<1): (a) <i>under modification</i> , (b) <i>full modification</i> , dan (c) <i>overmodification</i> .	62
Gambar 2.41	<i>Scanning Electron Micrograph</i> morfologi fasa β platelets pada paduan Al-7% Si-0,8% Fe (a) tanpa modifikasi Sr dan (b) dengan modifikasi 250 ppm	63
Gambar 2.42	Variasi dari rata-rata ukuran butir pada produk hasil coran dengan konsentrasi titanium dan sebagai fungsi parameter	64
Gambar 2.43.	Pengaruh kecepatan pembekuan terhadap morfologi intermetalik AlFeSi	65
Gambar 2.44.	Diagram fasa yang disederhanakan dari sistem Al-Fe-Si pada kandungan Mn a)0% , b) 0,1% , c)0,2% , dan d) 0,3%	66
Gambar 2.45	Sistem kelas pada struktur mikro modifikasi	68
Gambar 2.46	Silikon kasar akibat over-modifikasi pada paduan A526	69
Gambar 2.47	Kurva pendinginan pada logam murni	70
Gambar 2.48	Pengaruh <i>undercooling</i> terhadap laju nukleasi sebelum solidifikasi	71
Gambar 2.49	Analisis termal pembekuan paduan Al-13% Si (Al-Si) (b) Diagram fasa <i>unmodified</i> , (c) <i>modified</i>	72
Gambar 2.50	Kurva pendinginan A356 dengan <i>modifier</i> 0,02% Sr; perbesaran 560x	73
Gambar 3.1.	Gambar sketsa alat uji fluiditas	75
Gambar 3.2.	Gambar sketsa alat uji fluiditas metode vakum	76
Gambar 3.3.	Gambar teknik alat uji fluiditas metode vakum	77
Gambar 3.4.	Pipa tembaga (a) sebelum dan (b) sesudah diluruskan	78
Gambar 3.5.	Alat uji fluiditas metode vakum	79
Gambar 3.6	Persiapan proses peleburan dan pengujian fluiditas	81
Gambar 3.7	Peletakkan <i>blower</i> , <i>kowi</i> yang diisi sampel, dapur briket	82
Gambar 3.8	Mikroskop optik merek <i>Olympus</i>	85

Gambar 3.9	(a) Tabung gas argon dan pipa <i>degassing</i> (b) Proses <i>degassing</i>	86
Gambar 3.10	Diagram alir rekayasa penambahan Fe dan Sr pada paduan	90
Gambar 3.11	Alat Scanning Electron Microscope (SEM) yang dilengkapi EDX	93
Gambar 3.12	Peralatan pengamplasan dan pemolesan sampel	95
Gambar 3.13	Pengukuran panjang intermetalik pada Al-13,4% Si-1,12% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	97
Gambar 3.14	Perhitungan fraksi area fasa Intermetalik menggunakan software <i>PICSARA</i>	98
Gambar 3.15	Geometri pemantulan X-Ray	99
Gambar 3.16	Peralatan <i>X-ray Diffraction</i>	99
Gambar 3.17	(a) Grafik hasil pengujian XRD dan (b) data <i>output</i> pengujian menggunakan XRD	100
Gambar 4.1	(a) Komponen pompa vakum dan (b) <i>air cylinder</i>	102
Gambar 4.2	Sistim kerja alat uji fluiditas metode vakum	104
Gambar 4.3	Hubungan antara temperatur tuang dengan fluiditas pada variasi material pipa	106
Gambar 4.4	Hubungan tekanan vakum dengan nilai fluiditas	109
Gambar 4.5	(a) Hubungan antara temperatur tuang dengan fluiditas (b) hubungan penambahan Sr yang bervariasi antara 0,015% - 0,06% terhadap fluiditas	113
Gambar 4.6	Hubungan penambahan <i>modifier</i> stronsium terhadap nilai fluiditas pada tiap variasi temperatur tuang	115
Gambar 4.7	(a) Hubungan temperatur dengan fluiditas dengan variasi penambahan AlTiB (b) Hubungan Variasi penambahan AlTiB terhadap nilai fluiditas	119
Gambar 4.8	Pengaruh penambahan <i>grain refiner</i> terhadap ukuran <i>dendrite arm spacing</i> pada temperatur tuang 680 °C.	121
Gambar 4.9	Pengaruh ukuran <i>dendrite arm spacing</i> terhadap fluiditas pada temperatur tuang 680 °C.	123
Gambar 4.10	Grafik hubungan antara temperatur dan nilai fluiditas dengan berbagai variasi waktu <i>degassing</i>	127
Gambar 4.11	Struktur Mikro dengan variabel waktu <i>degassing</i> : a. tanpa <i>degassing</i> ; b. 1 menit <i>degassing</i> ; c. 2 menit <i>degassing</i> ; d. 4 menit <i>degassing</i>	130
Gambar 4.12	Batangan <i>master alloy</i> aluminium silikon hipoeutektik dan eutektik	131
Gambar 4.13	Foto struktur mikro <i>master alloy</i> hipoeutektik (Al-7% Si)	132
Gambar 4.14	Foto struktur mikro <i>master alloy</i> eutektik (Al-11% Si)	134
Gambar 4.15	Hubungan antara kadar Fe dengan nilai fluiditas pada paduan hipoeutektik dengan variasi temperatur	138
Gambar 4.16	Hubungan antara temperatur tuang terhadap nilai fluiditas pada tiap variasi penambahan <i>modifier</i> stronsium	140

	pada 1,2% Fe	
Gambar 4.17	Hubungan antara temperatur tuang terhadap nilai fluiditas pada tiap variasi penambahan <i>modifier</i> stronsium pada 1,4% Fe	141
Gambar 4.18	Hubungan antara temperatur tuang terhadap nilai fluiditas pada tiap variasi penambahan <i>modifier</i> stronsium pada 1,6% Fe	142
Gambar 4.19	Hubungan temperatur tuang dengan nilai fluiditas pada paduan hipoeutektik yang ditambahkan 1,4% Fe dan Sr yang bervariasi antara 0,015%; 0,03%, dan 0,045%	143
Gambar 4.20	Foto SEM yang telah di-kotak-kotak untuk (a) Al-7% Si + 1,38% Fe, (b) Al-7% Si + 1,36% Fe + 0,03% Sr, (c) Al-7% Si + 1,46% Fe + 0,045% Sr	144
Gambar 4.21	(a) Hasil SEM Paduan Al-7% Si-1,2% Fe etsa HF 0,5% (b) Hasil EDX pada Intermetalik. (c) Hasil EDX pada matriks aluminium (d) Hasil EDX pada struktur silikon.	146
Gambar 4.22	Foto SEM struktur mikro paduan aluminium silikon hipoeutektik dengan penambahan kadar Fe 1,2%; 1,4%, 1,6%, dan 1,8%	148
Gambar 4.23	Perbandingan Foto SEM sesuai panah (a) penambahan kadar Sr (b) penambahan kadar Fe, dengan etsa 0,5% HF perbesaran 1000X	149
Gambar 4.24	(a) Hubungan antara persentase kadar Fe dan tebal intermetalik yang terbentuk pada Al-7% Si. (b) Hubungan antara persentase kadar Fe dan panjang intermetalik yang terbentuk pada Al-7%.	151
Gambar 4.25	Pengaruh penambahan Sr terhadap panjang maksimal fasa intermetalik yang terbentuk	151
Gambar 4.26	Hasil pengujian XRD paduan Al-7% Si + 1,2% Fe + 0,015% Sr	153
Gambar 4.27	Pengaruh penambahan Fe terhadap kuantitas fasa α -Al ₈ Fe ₂ Si dan β -Al ₅ FeSi pada Al-7% Si dengan konsentrasi 0,015% Sr	154
Gambar 4.28	Proses pembentukan fasa intermetalik yang berdasarkan pada diagram terner Al-Fe-Si dan diagram <i>Scheil</i>	155
Gambar 4.29	Pengaruh penambahan Sr terhadap kuantitas fasa α -Al ₈ Fe ₂ Si dan β -Al ₅ FeSi pada Al-7% Si dengan konsentrasi 1,2% Fe	156
Gambar 4.30	Analisis XRD paduan hipoeutektik Aluminium Silikon + 1,2% Fe + (0,015%, 0,03% dan 0,045% Sr)	157
Gambar 4.31	Grafik analisis XRD paduan hipoeutektik Aluminium Silikon + 1,4%, 1,6% Fe +0,015% Sr	158

Gambar 4.32	<i>Aluminum-rich corner</i> pada diagram fasa Al-Fe-Si yang memperlihatkan pengaruh penambahan Sr	160
Gambar 4.33	Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7% Si dengan penambahan 1,6% Fe. perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	160
Gambar 4.34	Hubungan antara persentase kadar Fe dan persentase luas intermetalik yang terbentuk pada Al-7% Si (Al-Si hipoeutektik).	161
Gambar 4.35	Hubungan antara kadar Fe dengan nilai fluiditas pada paduan Al-11%Si	164
Gambar 4.36	Skema penghambatan aliran paduan aluminium cair oleh fasa intermetalik	165
Gambar 4.37	(a) Hubungan nilai fluiditas dengan temperatur pada 0,6% Fe dan Sr yang bervariasi (b) Hubungan antara penambahan Sr yang bervariasi dengan nilai fluiditas	168
Gambar 4.38	(a) Hubungan nilai fluiditas dengan temperatur pada penambahan 0,8% Fe dengan Sr yang bervariasi. (b) Hubungan antara penambahan Sr yang bervariasi dengan fluiditas pada temperatur yang berbeda	169
Gambar 4.39	Hubungan nilai fluiditas paduan ditambah 1% Fe dengan kadar Sr yang bervariasi pada setiap temperatur dengan fluiditas pada temperatur yang berbeda	169
Gambar 4.40	(a) Hasil SEM paduan Al-11% Si-1,2% Fe dengan etsa HF 0,5%. hasil EDX pada (b) Intermetalik. (b) Matriks Al (d) Eutektik silikon.	171
Gambar 4.41	Hubungan antara persentase kadar Fe dengan tebal dan panjang intermetalik yang terbentuk pada Paduan eutektik.	173
Gambar 4.42	Grafik pengukuran panjang maksimal fasa intermetalik dengan variabel Fe dan Sr pada Al-11% Si.	174
Gambar 4.43	Data hasil pengujian XRD pada paduan Al-11% Si dengan penambahan 0,6% Fe dan 0,015% Sr	175
Gambar 4.44	Identifikasi nilai konsentrasi fasa intermetalik terhadap variable penambahan Sr pada paduan Al-11% Si + 0,6% Fe serta gambar hasil pengamatan struktur mikronya.	177
Gambar 4.45	Identifikasi konsentrasi fasa intermetalik terhadap variable penambahan Fe pada paduan Al-11% Si + 0,015% Sr serta hasil gambar hasil pengamatan struktur mikronya.	179
Gambar 4.46	Analisis XRD paduan eutektik Aluminium Silikon + 0,6% Fe + (0,015%; 0,03% dan 0,045% Sr)	181
Gambar 4.47	Analisis XRD paduan eutektik Aluminium Silikon + 0,8% dan 1% Fe +0,015%, 0,03% dan 0,015% Sr.	182

Gambar 4.48	Hasil perhitungan fasa intermetalik foto SEM pada Al-13,4% Si dengan penambahan 1,12% Fe. perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	183
Gambar 4.49	Hubungan antara persentase kadar Fe dan persentase luas intermetalik yang terbentuk pada Al-11% Si .	184
Gambar 4.50	Grafik fraksi fasa intermetalik dengan variabel Fe dan Sr pada Al-11% Si	185



DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 2.1	Pengaruh berbagai unsur paduan terhadap fasa intermetalik Al-Fe-Si	40
Tabel 4.1.	Foto struktur mikro ADC 12 pada berbagai jenis pipa hisap	108
Tabel 4.2	Struktur mikro ADC 12 dengan variasi Tekanan	110
Tabel 4.3	Komposisi kimia paduan komersil ADC 12 (100% <i>scrap</i>)	111
Tabel 4.4	Komposisi kimia paduan ADC12 komersial sesuai dengan standard JIS	111
Tabel 4.5	Data pengujian nilai fluiditas aluminium paduan ADC 12 (100% <i>scrap</i>) dengan penambahan Sr yang bervariasi antara 0,015%; 0,03%; 0,045%, dan 0,06%	112
Tabel 4.6	Data pengujian nilai fluiditas aluminium paduan ADC 12 (100% <i>scrap</i>) dengan penambahan AlTiB yang bervariasi antara 0-0,2%	117
Tabel 4.7	Hasil pengukuran DAS pada struktur mikro paduan komersil ADC 12 dengan temperatur tuang 680°C (dalam satuan μm)	121
Tabel 4.8	Data pengujian fluiditas <i>degassing</i>	126
Tabel 4.9	Komposisi kimia <i>Master Alloy</i> Al-7% Si	132
Tabel 4.10	Komposisi kimia <i>Master Alloy</i> Al-Si eutektik	133
Tabel 4.11	Komposisi Kimia Paduan Aluminium Silikon (Al-7% Si) + 1,4% Fe	135
Tabel 4.12	Komposisi kimia paduan Al-7% Si + 1,4% Fe + 0,015% Sr	136
Tabel 4.13	Hasil pengujian fluiditas paduan Al-7% Si tanpa Fe dan <i>modifier</i> Sr	137
Tabel 4.14	Hasil pengujian fluiditas pada paduan aluminium silikon hipoeutektik yang ditambahkan Fe dengan kadar 0%, 0,5%, 1%, 1,4%	138
Tabel 4.15	Hasil pengujian fluiditas pada paduan aluminium silikon hipoeutektik yang ditambahkan Fe dan Sr	140
Tabel 4.16	Hubungan antara persentase kadar Fe dengan tebal dan panjang intermetalik yang terbentuk pada AlSi eutektik (satuan μm)	150
Tabel 4.17	Data luas area dibawah peak sampel Al-7% Si+1,2% Fe + 0,015% Sr	153
Tabel 4.18	Pengaruh penambahan Fe terhadap kuantitas fasa $\alpha\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ dan $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ pada Al-7% Si dengan konsentrasi 0,015% Sr.	154

Tabel 4.19	Pengaruh penambahan Sr terhadap kuantitas fasa α -Al ₈ Fe ₂ Si dan β -Al ₅ FeSi pada Al-7% Si dengan konsentrasi 1,2% Fe.	156
Tabel 4.20	Perhitungan data luas area di bawah peak paduan hipoeutektik Aluminium Silikon + 1,2% Fe + 0,015%, 0,03% dan 0,045% Sr	158
Tabel 4.21	Perhitungan data luas area dibawah <i>peak</i> analisis XRD paduan hipoeutektik Aluminium Silikon + 1,4%; 1,6% Fe + 0,015% Sr.	159
Tabel 4.22	Tabel pengujian akhir komposisi paduan Eutektik dengan penambahan 0,6% Fe	162
Tabel 4.23	Komposisi kimia Paduan Al-11% Si + 0,8% Fe + 0,045% Sr	162
Tabel 4.24	Hasil pengujian fluiditas paduan Al-11% Si tanpa Fe dan <i>modifier</i>	163
Tabel 4.25	Hasil pengujian fluiditas paduan eutektik aluminium silikon yang ditambahkan Fe	164
Tabel 4.26	Hasil pengujian fluiditas pada paduan eutektik yang ditambahkan Fe dan Sr	166
Tabel 4.27	Peningkatan fluiditas pada tiap-tiap penambahan konsentrasi Fe dan Sr pada temperatur tertentu.	170
Tabel 4.28	Komposisi fasa-fasa yang terbentuk pada paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 1,2% Fe	171
Tabel 4.29	Hubungan antara persentase kadar Fe dengan tebal dan panjang intermetalik yang terbentuk pada Paduan eutektik	172
Tabel 4.30	Hasil pengukuran panjang maksimal fasa intermetalik dengan variabel Fe dan Sr pada Al-11% Si	173
Tabel 4.31	Data hasil pengolahan data menggunakan <i>Powder-X</i> pada paduan Al-11% Si + 0,6% Fe + 0,015% Sr	176
Tabel 4.32	Identifikasi nilai konsentrasi fasa intermetalik terhadap variabel penambahan Sr pada paduan Al-11% Si + 0,6% Fe	177
Tabel 4.33	Identifikasi nilai konsentrasi fasa intermetalik pada paduan Al-11% Si ditambah 0,015%Sr	179
Tabel 4.34	Perhitungan luas area dibawah <i>peak</i> paduan eutektik Aluminium Silikon + 0,6% Fe + (0,015%; 0,03% dan 0,045% Sr)	182
Tabel 4.35	Perhitungan luas area dibawah <i>peak</i> paduan eutektik Aluminium Silikon+ 0,8% dan 1% Fe + 0,015%, 0,03% dan 0,015% Sr	183
Tabel 4.36	Data hasil perhitungan fraksi fasa intermetalik dengan variabel Fe dan Sr pada Al-11% Si menggunakan <i>PISCARA</i>	185

DAFTAR LAMPIRAN A

	halaman
Gambar A.1 Gambar teknik alat uji fluiditas metode vakum	198
Gambar A.2 Standard Operational Prosedure	199

DAFTAR LAMPIRAN B

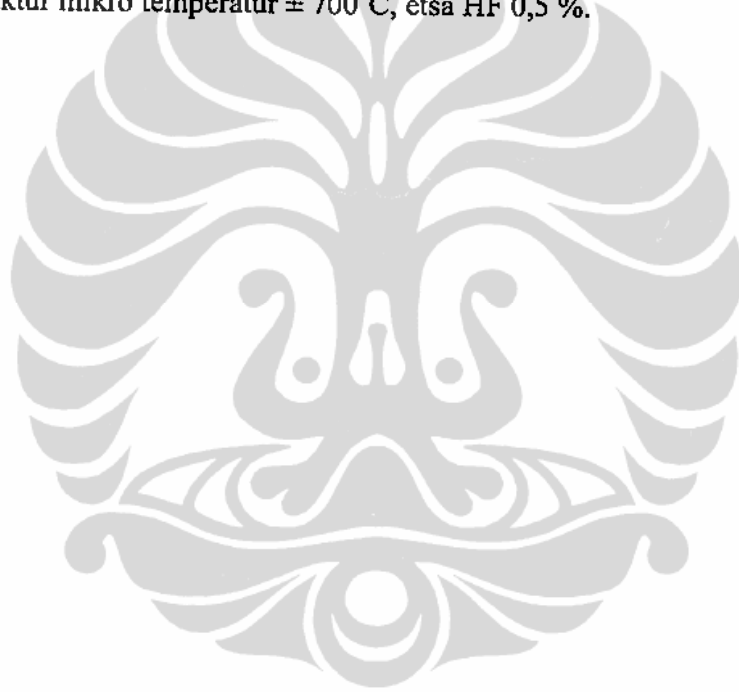
Gambar B.1 Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan <i>modifier</i> stronsium 0,03 wt.% pada temperatur 640°C, etsa 0,5 % HF	203
Gambar B.2 Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan <i>modifier</i> stronsium 0,03 wt.% pada temperatur 660°C, etsa 0,5% HF	203
Gambar B.3. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan <i>modifier</i> stronsium 0,03 wt.% pada temperatur 680°C, etsa 0,5% HF	203
Gambar B.4. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan <i>modifier</i> stronsium 0,03 wt.% pada temperatur 700°C, etsa 0,5% HF	204
Gambar B.5. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan <i>modifier</i> stronsium 0,015 wt.% pada temperatur 677°C, etsa 0,5% HF	204
Gambar B.6. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan <i>modifier</i> stronsium 0,03 wt.% pada temperatur 681°C, etsa 0,5% HF	204
Gambar B.7. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan <i>modifier</i> stronsium 0,045 wt.% pada temperatur 679°C, etsa 0,5% HF	205
Gambar B.8. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan <i>modifier</i> stronsium 0,06 wt.% pada temperatur 676,5°C, etsa 0,5% HF	205

LAMPIRAN C

Gambar C.1. Struktur mikro Paduan ADC12 tanpa penambahan <i>grain refiner</i> , temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500xetsa 0,5%HF	206
Gambar C.2. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,05% Al ₅ TiB, temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF	206
Gambar C.3. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,1% Al ₅ TiB, temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF	206
Gambar C.4. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al ₅ TiB, temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF	207
Gambar C.5. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,2% Al ₅ TiB, temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF	207
Gambar C.6. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al ₅ TiB, Temperatur tuang 640 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF	207
Gambar C.7. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al ₅ TiB, Temperatur tuang 660 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF	208
Gambar C.8. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al ₅ TiB, Temperatur tuang 700 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF	208
Gambar C.9. Shrinkage pada struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al ₅ TiB, temperatur tuang 680 °C, 500x, etsa 0, %HF	208
Gambar C.10. Lokasi pengukuran DAS Paduan ADC 12 dengan penambahan (a)0% Al ₅ TiB (b) 0,05% Al ₅ TiB (c) 0,1% Al ₅ TiB (d) 0,15% Al ₅ TiB (e) 0,2% Al ₅ TiB pada temperatur tuang 680 °C.	209
Gambar C.11. Lokasi pengukuran DAS Paduan ADC 12 dengan penambahan (a)0% Al ₅ TiB (b) 0,05% Al ₅ TiB (c) 0,1% Al ₅ TiB (d) 0,15% Al ₅ TiB (e) 0,2% Al ₅ TiB pada temperatur tuang 680 °C.	210

LAMPIRAN D

Gambar D.1 a dan b Struktur mikro 0 menit degassing, etsa HF 0,5 %.	211
Gambar D.2 a dan b Struktur mikro 1 menit degassing, etsa HF 0,5 %.	211
Gambar D.3 a dan b Struktur mikro 2 menit degassing , etsa HF 0,5 %.	211
Gambar D.4 a dan b Struktur mikro 4 menit degassing , etsa HF 0,5 %.	212
Gambar D.5 a dan b Struktur mikro temperatur $\pm 640^{\circ}\text{C}$, etsa HF 0,5 %.	212
Gambar D.6 a dan b Struktur mikro temperatur $\pm 660^{\circ}\text{C}$, etsa HF 0,5 %.	212
Gambar D.7 a dan b Struktur mikro temperatur $\pm 680^{\circ}\text{C}$, etsa HF 0,5 %.	213
Gambar D.8 a dan b Struktur mikro temperatur $\pm 700^{\circ}\text{C}$, etsa HF 0,5 %.	213



LAMPIRAN E

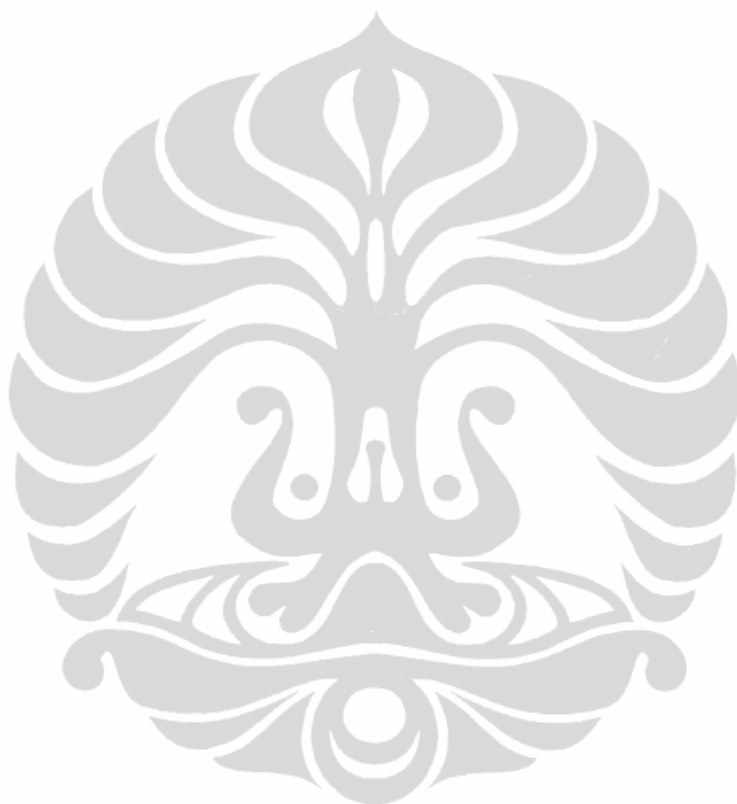
Tabel E.1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik Sebelum Penambahan Elemen Besi	214
Tabel E.2. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik <i>as-cast</i> Setelah Penambahan 0,5% Fe	214
Tabel E.3. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik <i>as-cast</i> Setelah Penambahan 1,0% Fe	215
Tabel E.4. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik <i>as-cast</i> Setelah Penambahan 1,4% Fe	215
Tabel E.5. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik <i>as-cast</i> Setelah Penambahan 1,8% Fe	216



LAMPIRAN F

Gambar F.1	Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 0,5% Fe pada temperatur tuang 700°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF	217
Gambar F.2	Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,0% Fe pada temperatur tuang 700°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF	217
Gambar F.3	Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,4% Fe pada temperatur tuang 700°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF	218
Gambar F.4	Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,8% Fe pada temperatur tuang 700°C, perbesaran 1000 X, etsa 0,5% HF	218
Gambar F.5	Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,0% Fe pada temperatur tuang 720°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF	219
Gambar F.6	Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,8% Fe pada temperatur tuang 720°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF	219
Gambar F.7	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,53 % Fe + 0,015% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	220
Gambar F.8	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,36 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	220
Gambar F.9	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,56 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	221
Gambar F.10	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,608 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	221
Gambar F.11	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	222
Gambar F.12	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,24 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF	222
Gambar F.13	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,46 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF	223
Gambar F.14	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF	223
Gambar F.15	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,53 % Fe + 0,015% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	224
Gambar F.16	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,36 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	224
Gambar F.17	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,56 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	225
Gambar F.18	Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,608 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	225

Gambar F.19 Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF	226
Gambar F.20 Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,24 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF	226
Gambar F.21 Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,46 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF	227
Gambar F.22 Foto sampel uji fluiditas Al-7% Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF	227



LAMPIRAN G

- Gambar G.1** (a) Hasil SEM Paduan Al-7% Si-1,2%Fe dengan etsa HF 0,5%. 228
(b) hasil EDX pada Intermetalik.
(c) hasil EDX pada matriks alumunium
(d) hasil EDX pada eutektik silikon.
- Gambar G.2** (a) Hasil SEM Paduan Al-7% Si-1,4%Fe dengan etsa HF 0,5%. 228
hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks alumunium
(d) eutektik Si.
- Gambar G.3** (a) Hasil SEM Paduan Al-7% Si-1,6%Fe dengan etsa HF 0,5%. 229
hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks alumunium
(d) eutektik Si.
- Gambar G.4** (a) Hasil SEM Paduan Al-7% Si-1,8%Fe dengan etsa HF 0,5%. 229
hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks alumunium
(d) eutektik Si.

LAMPIRAN H

Gambar H.1	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 1000X dan ETSA HF 0,5%)	230
Gambar H.2	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 2000X dan ETSA HF 0,5%)	230
Tabel H.1	Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 0% Fe pada Temperatur Tuang 680°C	230
Gambar H.3	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)	231
Gambar H.4	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)	231
Tabel H.2	Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 0% Fe pada Temperatur Tuang 720°C	231
Gambar H.5	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0,8%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)	232
Gambar H.6	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0,8%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)	232
Tabel H.3	Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 0,8% Fe pada Temperatur Tuang 680°C	232
Gambar H.7	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0,8%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)	233
Gambar H.8	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0,8%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)	233
Tabel H.4	Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 0,8% Fe pada Temperatur Tuang 720°C	233
Gambar H.9	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 1,2%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)	234
Gambar H.10	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 1,2%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)	234
Tabel H.5	Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 1,2% Fe pada Temperatur Tuang 680°C	234
Gambar H.11	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 1,2%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)	235
Gambar H.12	Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 1,2%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)	235
Tabel H.6	Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 1,2% Fe pada Temperatur Tuang 720°C	235

LAMPIRAN I

- Gambar I.1** (a) Hasil SEM Paduan Al-11% Si-13,3% Fe dengan etsa HF 0,5%. 236
hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks alumunium
(d) eutektik Si.
- Gambar I.2** (a) Hasil SEM Paduan Al-11% Si-0,8% Fe dengan etsa HF 0,5%. 236
hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks alumunium
(d) eutektik Si.
- Gambar I.3** (a) Hasil SEM Paduan Al-11% Si-1% Fe dengan etsa HF 0,5%. 237
hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks Al
(d) eutektik silikon.
- Gambar I.4** (a) Hasil SEM Paduan Al-11% Si-1,2% Fe dengan etsa HF 0,5%. 237
hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks Al
(d) eutektik Si

LAMPIRAN J

Gambar J.1. Analisa XRD Al-7% Si + 1,2% Fe + 0,015% Sr	238
Gambar J.2. Analisa XRD Al-7% Si + 1,2% Fe + 0,03% Sr	239
Gambar J.3. Analisa XRD Al-7% Si + 1,2% Fe + 0,045% Sr	240
Gambar J.4. Analisa XRD Al-7% Si + 1,4% Fe + 0,015% Sr	241
Gambar J.5. Analisa XRD Al-7% Si + 1,6% Fe + 0,015% Sr	242
Gambar J.6. Analisa XRD Al-7% Si + 1,6% Fe + 0,045% Sr	243
Gambar J.7. Analisa XRD Al-7% Si + 1,2 % Fe + 0,015% Sr	244
Gambar J.8. Analisa XRD Al-11% Si + 0,6% Fe + 0,015% Sr	245
Gambar J.9. Analisa XRD Al-11% Si + 0,6% Fe + 0,030% Sr	246
Gambar J.10. Analisa XRD Al-11% Si + 0,6% Fe + 0,045% Sr	247
Gambar J.11. Analisa XRD Al-11% Si + 0,8% Fe + 0,015% Sr	248
Gambar J.12. Analisa XRD Al-11% Si + 1% Fe + 0,015% Sr	249

LAMPIRAN K

Gambar K.1	Pengukuran panjang intermetalik pada Al-7% Si-1,2% Fe. 1000x, etsa HF 0,5%.	250
Gambar K.2	Pengukuran panjang intermetalik pada Al-7% Si-1,4% Fe Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	250
Gambar K.3	Pengukuran panjang intermetalik pada Al-7% Si-1,6% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	251
Gambar K.4	Pengukuran panjang intermetalik pada Al-7% Si-1,8% Fe Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	251
Gambar K.5	Pengukuran panjang intermetalik pada Al-11% Si-0,6% Fe Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	251
Gambar K.6	Pengukuran panjang intermetalik pada Al-11% Si-0,8% Fe Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	252
Gambar K.7	Pengukuran panjang intermetalik pada Al-11% Si-1% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	252
Gambar K.8	Pengukuran panjang intermetalik pada Al-11%Si-1,2%Fe Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	252

LAMPIRAN L

Gambar L.1	Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7% Si dengan penambahan 1,2% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	253
Gambar L.2	Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7% Si dengan penambahan 1,4% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	253
Gambar L.3	Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7% Si dengan penambahan 1,6% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	253
Gambar L.4	Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7% Si dengan penambahan 1,8% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	254
Gambar L.5	Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-11%Si dengan penambahan 0,6% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	254
Gambar L.6	Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-11%Si dengan penambahan 0,8% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	254
Gambar L.7	Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-11%Si dengan penambahan 1% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.	255
Gambar L.8	Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-11%Si dengan penambahan 1,2% Fe. Perbesaran 1000x, Etsa HF 0,5%.	255

LAMPIRAN M

Tabel M.1. Hasil pengujian fluiditas Al-7 %Si + Fe (1,2-1,6%)	256
Tabel M.2. Hasil pengujian fluiditas Al-7 %Si + 1,2 % Fe + Sr (0,015-0,045%)	256
Tabel M.3. Hasil pengujian fluiditas Al-7 %Si + 1,4 % Fe + Sr (0,015-0,045%)	257
Tabel M.4. Hasil pengujian fluiditas Al-7 %Si + 1,6 % Fe + Sr (0,015-0,045%)	257
Tabel M.5. Hasil pengujian fluiditas Al-11 % Si + Fe (0,6-1,0%)	258
Tabel M.6. Hasil pengujian fluiditas Al-11 %Si + 0,6 %Fe + Sr (0,015-0,045%)	258
Tabel M.7. Hasil pengujian fluiditas Al-11 %Si + 0,8 %Fe + Sr (0,015-0,045%)	259
Tabel M.8. Hasil pengujian fluiditas Al-11 %Si + 1,0 %Fe + Sr (0,015-0,045%)	259



BAB I

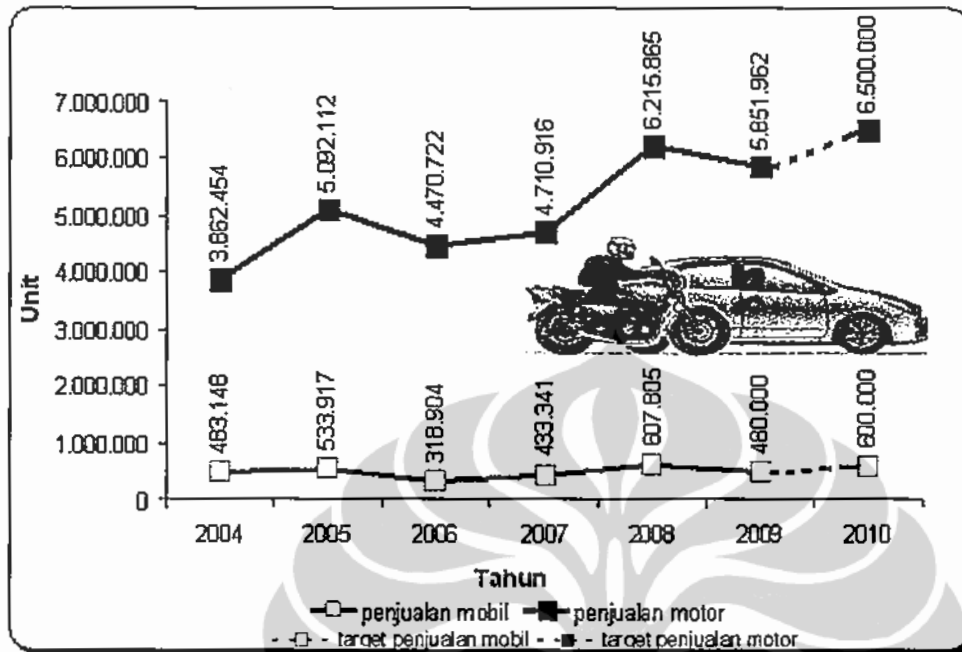
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Meskipun pada kondisi krisis ekonomi global dewasa ini diprediksi akan terjadi penurunan penjualan otomotif, perkembangan industri otomotif sekarang ini tetap mengalami kemajuan yang cukup pesat. Secara definisi, industri otomotif adalah industri yang meliputi desain, pengembangan, manufaktur, marketing, dan penjualan kendaraan bermotor. Pertumbuhan industri otomotif ini terjadi karena permintaan akan kemudahan mobilitas manusia yang tinggi dalam melakukan berbagai aktivitas.

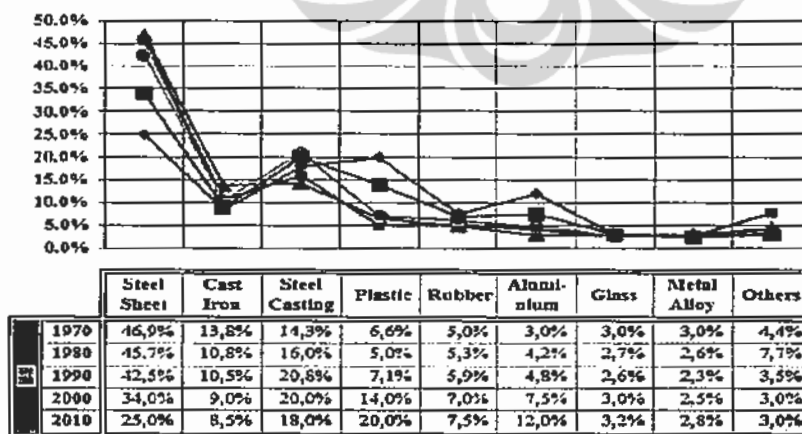
Data menunjukkan bahwa negara yang memproduksi kendaraan bermotor terbesar di dunia adalah Jepang. Jumlah produksi kendaraan bermotor negara Jepang mencapai 11.596 juta unit diikuti oleh Amerika Serikat yang berada pada urutan kedua dengan jumlah produksi sekitar 10 juta unit, dan Cina yang menempati urutan ke tiga dengan jumlah produksi sekitar 6 juta unit.^[1] Data di Indonesia berdasarkan perkiraan Gaikindo yang menyoroti perkembangan kendaraan secara umum, penjualan sepeda motor pada tahun 2008 sebesar 6.215.865 unit dan tahun 2009 mencapai 5.851.962 unit. Penjualan mobil pada tahun 2008 sebanyak 607.805 unit, tahun 2009 mengalami penurunan yaitu sebanyak 480.000 unit. Sedangkan pada tahun 2010 ini target penjualan mobil adalah sebesar 600.000 unit menyusul perbaikan ekonomi nasional.^[2]

Penjualan kendaraan bermotor akan terus meningkat sesuai dengan perkiraan yang diberikan pada Gambar 1.1 di bawah ini



Gambar 1.1. Produksi Kendaraan di Indonesia^[2]

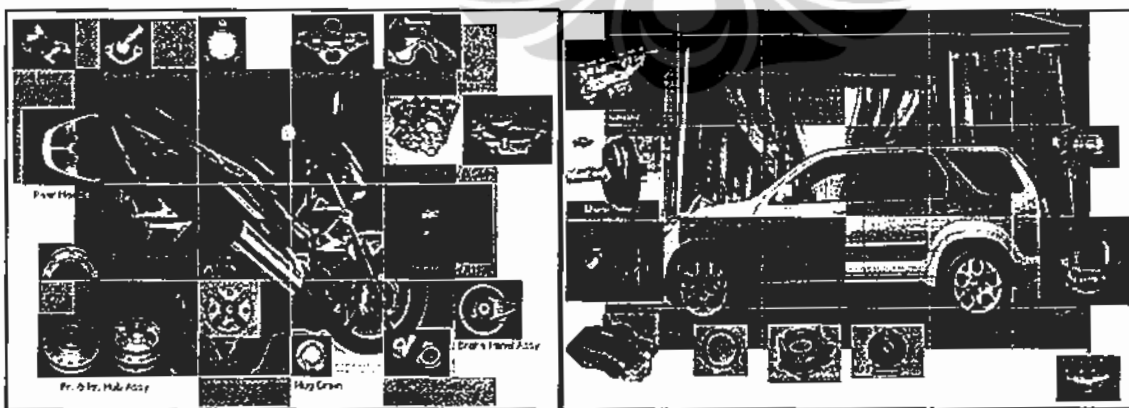
Pada industri otomotif saat ini telah terjadi peralihan penggunaan material berbahan dasar paduan besi ke material berbahan dasar plastik atau paduan aluminium. Gambar 1.2 di atas memperlihatkan trend penggunaan bahan baku kendaraan bermotor^[1]. Pemakaian material plastik meningkat dari 14% pada tahun 2000 menjadi 20% pada tahun 2010.



Gambar 1.2. Trend penggunaan bahan baku kendaraan bermotor^[1]

Penggunaan material aluminium meningkat dari 7,5% pada tahun 2000 menjadi 12% pada tahun 2010. Penggunaan material yang berat mengalami penurunan seperti pada penggunaan besi tuang dan baja. Penggunaan besi tuang turun dari 9% pada tahun 2000 menjadi 8,5% pada tahun 2010.^[1]

Material bodi sepeda motor sekarang lebih banyak menggunakan material plastik. Komponen mesin pada sepeda motor seperti *engine blok*, *cam shaft*, *cylinder blok*, dan lain-lain banyak menggunakan aluminium dibanding menggunakan material besi. Kebutuhan spesifik besi cor untuk kendaraan sepeda motor sekitar 3 kg/unit kendaraan, sedangkan untuk kendaraan roda empat adalah antara 60-100 kg/unit. Kebutuhan spesifik aluminium cor saat ini adalah sekitar 22-25 kg/unit dari berat total satu unit sepeda motor sekitar 86 kg, sedangkan untuk kendaraan roda empat kebutuhannya adalah 50-200 kg/unit kendaraan.^[3] Penggunaan logam aluminium sebagai material komponen otomotif juga didasarkan pada adanya penghematan terhadap bahan bakar yang digunakan dalam sebuah kendaraan. Sebagai contoh penurunan berat kendaraan (dalam hal ini sedan ukuran sedang) sebanyak 300 kg dari berat sedan 1.400 kg menjadi 1.100 kg, dan akan menyebabkan penurunan bahan bakar yang digunakan sebanyak 2 liter per 100 km.^[1]. Gambar 1.3 memperlihatkan beberapa contoh aplikasi dari aluminium paduan yang digunakan dalam industri otomotif.



Gambar 1.3. Komponen kendaraan bermotor roda dua dan roda empat yang menggunakan paduan aluminium^[1]

Universitas Indonesia

Komponen kendaraan bermotor yang berbahan baku paduan aluminium untuk kendaraan bermotor roda dua antara lain adalah *pipe intake*, *cover thermostat*, *cover element*, *cover cylinder head*, *brake shoe*, *gear speedometer*, *shock absorber*, dan lain-lain. Sedangkan komponen yang berbahan baku paduan aluminium untuk kendaraan bermotor roda empat antara lain adalah *intake manifold*, *master power/cylinder*, *wheel cylinder*, *oil retainer*, *filter oil*, *shock absorber*, *power steering*, *open stay*, *engine blok*, dan lain-lain.^[1]

Masalah yang dihadapi industri komponen otomotif sekarang ini adalah untuk mendapatkan material aluminium dengan kemurnian tinggi dan bebas dari pengotor yang bersifat merugikan terhadap paduan aluminium. Untuk mendapatkan aluminium yang bebas dari pengotor relatif mahal karena diperlukan proses pemurnian terlebih dahulu. Salah satu elemen pengotor yang terkandung dalam aluminium adalah unsur Fe. Adanya unsur Fe di dalam aluminium merugikan sifat mekanis (keuletannya turun) dan *castability* terutama sifat mampu alir atau fluiditasnya. Semakin tinggi kandungan Fe di dalam paduan aluminium silikon dapat menurunkan fluiditas dari paduan.^[3]

Nilai fluiditas paduan pada umumnya digunakan sebagai ukuran kemampuan mengisi cetakan dari suatu logam cair. Hal ini merupakan faktor penting dalam pengecoran, khususnya untuk menghindari cacat-cacat yang sering terjadi pada benda cor. Fluiditas logam cair yang kurang baik dapat mengakibatkan *short run casting* dan juga menghasilkan permukaan coran yang kurang baik. Satuan yang digunakan untuk fluiditas adalah ukuran panjang berupa cm atau inci.

Nilai fluiditas dapat diukur dengan menggunakan alat uji fluiditas. Berbagai metode pengukuran fluiditas telah dikembangkan oleh banyak peneliti seperti metode spiral, metode *cross channel*, dan metode vakum. Pada penelitian ini telah dirancang dan dibuat alat uji fluiditas metode vakum yang memiliki keunggulan dalam mengukur fluiditas logam. Untuk menguji kehandalan dan

Universitas Indonesia

validasi alat, dilakukan serangkaian pengujian validasi menggunakan paduan komersil ADC 12. Untuk mengetahui pengaruh Fe terhadap fluiditas paduan aluminium silikon, maka dilakukan rekayasa penambahan Fe terhadap paduan utama (*master alloy*) aluminium silikon.

Unsur Fe dapat larut ke dalam paduan aluminium saat proses manufaktur aluminium primer yaitu melalui proses bayer dan proses reduksi elektrolitik *Hall-Heroult* dengan dua mekanisme, yaitu melalui larutnya Fe dari peralatan penunjang pada proses peleburan yang tidak terproteksi dan melalui penambahan material paduan dengan kemurnian yang rendah. Adanya Fe akan menghadirkan fasa intermetalik pada paduan aluminium silikon. Fasa intermetalik ini dalam jumlah banyak sangat tidak disukai, dikarenakan selain dapat menurunkan sifat mampu cor dan sifat mekanis, juga dapat menyebabkan adanya cacat di dalam paduan. Salah satu upaya untuk mengantisipasi kerugian yang diakibatkan kandungan unsur Fe berlebih di dalam aluminium adalah dengan menggunakan proses modifikasi. Modifikasi paduan aluminium silikon dapat dilakukan dengan penambahan unsur-unsur *modifier* pada cairan paduan aluminium, seperti kalsium, stronsium, fosfor, dan antimoni.

Modifier pada dasarnya memiliki dua fungsi. Pertama adalah untuk menghambat pertumbuhan kristal-kristal silikon di dalam fasa eutektik, yang akan menghasilkan partikel silikon yang semula berbentuk lamel-lamel (jarum-jarum kasar) secara bertahap menjadi berbentuk granular, dan akhirnya menjadi partikel yang lebih halus (*fibrous*) dan terdistribusi merata. Dengan partikel yang lebih halus dan rata, struktur paduan aluminium silikon menjadi lebih baik sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik paduan, mempermudah proses permesinan dan yang paling penting yaitu untuk meningkatkan *castability* atau mampu cor paduan aluminium silikon. Kedua adalah dapat merubah morfologi dari fasa intermetalik yang terbentuk akibat adanya unsur Fe berlebih, yang pada awalnya $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ berbentuk *platelet* menjadi $\alpha\text{-Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ yang berbentuk *chinese script*.

Universitas Indonesia

Pada penelitian ini telah dilakukan analisa yang mendalam mengenai besarnya pengaruh penambahan Fe dan Sr terhadap perubahan struktur mikro *master alloy* Al-7% Si dan Al-11% Si terutama fasa intermetalik serta pengaruhnya terhadap nilai fluiditas. Dalam hal ini, nilai fluiditas diukur menggunakan alat uji fluiditas metode vakum yang merupakan hasil rancangan dan pembuatan di Laboratorium Metalurgi Proses Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

1.2 Tujuan Penelitian

Secara garis besar penelitian ini dilakukan bertujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui dan menganalisis pengaruh temperatur dan komposisi terhadap nilai fluiditas (mampu alir) paduan Al-7% Si dan Al-11% Si tanpa dan dengan penambahan unsur Fe dan Sr.
2. Mengetahui dan menganalisis pengaruh penambahan Fe pada paduan Al-7% Si dan Al-11% Si terhadap pembentukan fasa intermetalik dan nilai fluiditas paduan dengan metode vakum.
3. Mengetahui dan menganalisis pengaruh penambahan *modifier* Sr pada paduan Al-7% Si dan Al-11% Si terhadap fasa intermetalik dan nilai fluiditas paduan.
4. Menghitung secara kuantitatif dan kualitatif pengaruh penambahan Fe dan Sr terhadap pembentukan fasa intermetalik dan korelasinya dengan nilai fluiditas.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini difokuskan pada:

1. Perancangan dan pembuatan alat uji fluiditas metode vakum yang akan digunakan untuk pengujian fluiditas paduan aluminium silikon.

Universitas Indonesia

2. Melakukan pengujian kehandalan dan validasi terhadap alat uji fluiditas metode vakum.
3. Melakukan pembuatan paduan utama (*master alloy*) aluminium silikon dalam hal ini paduan aluminium silikon hipoeutektik (Al-7% Si) dan paduan eutektik (Al-11% Si) serta melakukan pengamatan struktur mikronya.
4. Rekayasa penambahan Fe (besi) dan Sr (stronsium) pada *master alloy* untuk melihat pengaruh penambahan Fe dan Sr terhadap pembentukan fasa intermetalik dan nilai fluiditas paduan.
5. Pengamatan dan analisis struktur mikro, terutama fasa intermetalik yang terbentuk pada paduan Al-7% Si dan Al-11% Si secara kuantitatif dan kualitatif dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)/EDX*, dan *X-Ray Diffraction (XRD)*

1.4 Parameter Penelitian

1. Penambahan unsur Fe (*master alloy* Al-80% Fe) pada paduan Al-11% Si dengan kadar 0,6%; 0,8%; dan 1%. Pada paduan Al-7% Si ditambahkan Fe dengan kadar 1,2%, 1,4%; dan 1,6% .
2. Penambahan stronsium (Al-10% Sr) sebesar 0,015%; 0,03% dan 0,045% pada paduan Al-7% Si dan Al-11% Si yang telah direkayasa penambahan Fe.
3. Parameter temperatur tuang 660, 680, 700, dan 720°C .Setiap pengujian dilakukan 2 kali pengambilan data.
4. Tekanan vakum yang digunakan pada alat uji fluiditas metode vakum adalah sebesar 8 inHg.
5. Proses *degassing* menggunakan gas argon selama 1 menit .

1.5 Roadmap dan *state of the art* penelitian

1.5.1 Penelitian Yang Berkaitan Dengan Metode Pengujian Fluiditas

Berkaitan dengan metode pengujian fluiditas ini telah dilakukan banyak penelitian oleh para peneliti lain. Penelitian yang dilakukan oleh Tran Duc Huy dkk.^[4] dalam mengukur fluiditas dari AC2B, AC4B, AC4CH, AC9A, ADC12 dan ADC14 menggunakan metode vakum dengan *vertical tube*. Pipa yang digunakan sebagai cetakan adalah *stainless steel* Ø 4,7 mm dan Ø 6,35 mm, tembaga Ø 2,3 dan Ø 4 mm, quartz Ø 3,5 mm. Pengujian fluiditas dilakukan pada derajat *superheat* yang berbeda, yaitu : 0,30,60,90, dan 120°K dan pada 4 variasi tekanan (ΔPa) : 1,33 kPa; 2,67 kPa; 4 kPa; dan 6,67 kPa, dimana ΔPa adalah tekanan atmosfer dikurangi tekanan yang digunakan. Hasil penelitian ini memberikan hasil bahwa pada derajat *superheat* 90°K untuk AC4CH, fluiditas dari paduan aluminium secara proposional linear dengan akar dari tekanan hisap, sementara fluiditas yang paling tinggi terjadi pada pipa *stainless steel* berdiameter 6,35 mm.

Wattachai Prukkanon dan Chaowalit Limmaneevichitr^[5] melakukan penelitian fluiditas pada aluminium A356 dan A380 menggunakan metode vakum. Pipa yang digunakan sebagai cetakan adalah pipa quartz berdiameter 7 mm dan 9 mm. Tekanan di atur pada 5 cmHg dan temperatur tuang 660° C, 690° C dan 720° C. Hasilnya memperlihatkan bahwa semakin tinggi derajat *superheat*, maka nilai fluiditas juga semakin besar, sementara nilai fluiditas tertinggi didapatkan pada aluminium paduan A380 tanpa modifikasi

Penelitian fluiditas dengan metode vakum yang dilakukan oleh Ninh Duy Cuong dkk.^[6] dengan memvariasikan pipa sebagai cetakan, yaitu: pipa quartz berdiameter dalam (\emptyset_i) 5 mm, ketebalan 1 mm, dan pipa SKD61 diameter dalam (\emptyset_i) 4 mm dan ketebalan 1 mm, dengan panjang kedua jenis pipa 400 mm. Tekanan yang diberikan adalah 10 kPa sampai 30 kPa pada temperature 10° C sampai 200° C di atas *melting point*. Hasil yang didapatkan adalah fluiditas dari aluminium AC1B berubah dengan berubahnya pipa sebagai cetakan. Dengan

Universitas Indonesia

berubahnya konduktivitas thermal, maka nilai fluiditas juga akan berubah. Nilai fluiditas tertinggi didapatkan pada pipa quartz

F.M.Yarandi dkk.^[7] melakukan pengukuran fluiditas dari aluminium paduan Al-7% Si yang ditambahkan 10,15, dan 20% SiC menggunakan metode spiral. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa nilai fluiditas semakin meningkat secara linear terhadap temperatur

Niyama Eisuke dkk.^[8] melakukan eksperimen pengukuran nilai fluiditas pada aluminium paduan AC4CH menggunakan metode vakum dengan pipa quartz, tembaga, dan *stainless steel* berdiameter 4 mm. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa semakin tinggi derajat *superheat* akan meningkatkan nilai fluiditas, baik dengan menggunakan pipa tembaga maupun quartz. Nilai fluiditas yang lebih tinggi didapatkan pada pipa quartz

Metode vakum yang berbeda dilakukan oleh S.Venkateswaran dkk.^[9] yaitu dengan metode vakum *horizontal tubes*. Paduan yang digunakan adalah Al-11,4% Si. Pipa yang digunakan adalah pipa *pyrex* dengan panjang 1000 mm dan diameter 7 mm. Bagian pangkal pipa dilakukan *bending* dengan radius 100 mm. Fluiditas dihitung pada 5 variasi temperatur, yaitu 600°C, 620°C, 640°C dan 680°C. Hasil yang didapatkan adalah fluiditas dari eutektik aluminium silikon meningkat secara linear dengan meningkatnya temperatur cair metal

1.5.2. Penelitian Yang Berkaitan Dengan Penambahan Paduan dan *Modifier*

Salah satu faktor yang dapat memperbaiki nilai fluiditas paduan aluminium adalah dengan penambahan beberapa unsur paduan dan *modifier* seperti telah dilakukan dalam penelitian berikut ini. Menurut Stuar D. McDonald, dkk.^[10], penambahan stronsium (Al-10%Sr) dalam modifikasi silikon pada komposisi Al-10%Si dapat menaikkan nilai fluiditas (mampu alir). Dalam modifikasi silikon, penambahan stronsium dapat menurunkan nukleasi pertumbuhan eutektik.

Pendapat senada diutarakan oleh A.M Samuel dkk.^[11] yang menyatakan bahwa penambahan stronsium pada paduan aluminium hipoeutektik 319 (Al-7%Si-3,5%Cu) dapat menaikkan nilai fluiditas (mampu alir). Stronsium (Sr) umumnya digunakan pada paduan tuang Al-Si untuk memodifikasi morfologi eutektik silikon dari bentuk serpihan (*flake*) dan kasar (*coarse*) menjadi serat halus (*fine fibrous*). Umumnya, memodifikasi dengan Sr dapat menurunkan temperatur reaksi eutektik. Penurunan temperatur eutektik ini dapat digunakan sebagai indikator kehadiran struktur modifikasi Si yang diharapkan pada proses cor (*casting*). Semakin rendah temperatur eutektik maka semakin besar pula efek modifikasi yang dihasilkan.

Pada penelitian yang dilakukan S.Sanchez dkk.^[12] menyimpulkan bahwa penambahan stronsium dengan kadar 42 ppm, 65 ppm, 102 ppm, 126 ppm dan 144 ppm pada paduan A356 dengan menggunakan metode fluiditas vakum (*vacuum suction pipe*) dapat meningkatkan nilai fluiditas (mampu alir) mulai dari temperatur 700°C hingga 760°C. Peningkatan fluiditas ini ditunjukkan dengan perubahan karakteristik dari silikon. Ukuran serat (*fiber*) dari morfologi silikon lebih besar dari fasa morfologi awal. Namun, penambahan stronsium mulai menunjukkan titik jenuh (*saturation point*) pada penambahan 144 ppm Sr.

S. Gowri dan F.H. Samuel^[13] dalam penelitiannya melihat pengaruh unsur paduan terhadap karakteristik solidifikasi dan struktur mikro Al-Si-Cu-Mg-Fe paduan 380. Penambahan Cu dari 3,43% menjadi 4,09% mengakibatkan fluiditas dari paduan aluminium tersebut meningkat. Hal ini disebabkan oleh menurunnya temperatur eutektik dari 564,0°C menjadi 568,8°C.

M.A. Moustafa dkk.^[14] dalam penelitiannya mengenai pengaruh Mg dan Cu terhadap mikrostruktur dan kekuatan tarik Al-Si eutektik juga menyatakan hal yang sama, yaitu dengan penambahan Cu akan mengakibatkan fluiditas meningkat. Hal ini disebabkan turunnya temperatur eutektik paduan tersebut.

Penelitian pengaruh Fe terhadap nilai fluiditas dilakukan oleh S. Gowri dan F.H Samuel^[15] menyebutkan bahwa peningkatan kadar Fe dapat menurunkan

Universitas Indonesia

nilai fluiditas aluminium tanpa melibatkan perubahan tegangan permukaan yang signifikan akibat meningkatnya jumlah Fe tidak larut (*insoluble*) yang terbentuk dalam paduan.

Penelitian yang dilakukan oleh Warmuzek dkk.^[16] menyebutkan bahwa peningkatan kandungan Fe serta unsur-unsur lainnya seperti Mn dan Cr dapat menyebabkan meningkatnya pendedapan fasa α -Al (Fe,Mn)Si.

Menurut John A. Taylor^[17], Fe adalah impuritas (pengotor) yang umum pada aluminium dan paduannya yang sulit dikeluarkan dan bisa menimbulkan efek yang berlawanan dengan *ductility* dan *castability* (mampu cor), terutama pada paduan coran berbasis Al-Si. Ukuran dan jumlah kepadatan intermetalik yang mengandung besi (khususnya fasa β). Fasa ini akan mempengaruhi mekanisme *fracture* dimana semakin banyak intermetalik yang ada, semakin rendah keuletannya. Peningkatan kadar besi mengakibatkan peningkatan porositas, dan ini berdampak terhadap keuletan. Besi juga berpotensi menurunkan *castability* (mampu cor).

Menurut C.M. Dinnis dkk.^[18] Fe dan Mn akan saling berinteraksi. Penambahan Mn, mengurangi porositas paduan 0,6% Fe dan 1% Fe. Analisis *thermal* dan *quenching* dilakukan untuk menentukan efek Fe dan Mn terhadap solidifikasi *eutectic* Al-Si. Pada kandungan Fe yang tinggi, adanya β -Al₅FeSi dalam jumlah besar terbukti mengurangi jumlah *nukleasi eutectic* dan meningkatkan ukuran *grain eutectic*. Pembentukan intermetalik yang lebih disukai yaitu α -Al₁₅Mn₃Si₂.

Penelitian oleh DN Millier L. Lu dan A.K Dahle^[19] menyebutkan bahwa Fe bisa mengakibatkan cacat cor (*casting defect*) pada alloy Al-Si. Selain itu, L.Lu dan A.K Dahle menemukan tiga fasa intermetalik α , β dan π pada paduan. Namun demikian, ada unsur lain yang dapat mengatasi kelemahan atau cacat yang diakibatkan oleh Fe. Unsur tersebut adalah Sr dan Mn.

X. P Niu dkk.^[20] menyebutkan bahwa fasa mirip jarum yang mengandung Fe dan Si, dan komposisinya adalah Al₅FeSi. Fasa mirip balok juga merupakan

Universitas Indonesia

aluminida yang terdiri dari Mn, Fe dan Si dan komposisinya adalah $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$. Fe membentuk $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ dengan Mn, seringkali dalam bentuk tulisan cina. Pada pembentukan fasa intermetalik mirip jarum Al_5FeSi , sebagai tempat terbentuknya retak atau *void* di bidang tamu (*interface*), akibatnya mengurangi kekuatan dan duktilitas.

Y.S.Han dkk.^[21] meneliti perilaku solidifikasi Al-Si-Fe yang mengandung 7%Si dan 0,9% Fe, khususnya pembentukan dan tingkat pertumbuhan fase intermetalik selama solidifikasi. Struktur mikro paduan ini terdiri dari matrik aluminium primer dan beberapa reaksi fasa kedua.

Penelitian oleh W. Khalifa dkk.^[22] mendapatkan bahwa nukleasi masing-masing fasa intermetalik Fe meningkat pada permukaan beberapa inklusi dengan kondisi yang sama dari komposisi paduan dan *cooling rate*. Tapi, beberapa inklusi menunjukkan potensi yang lebih tinggi untuk nukleasi fasa intermetalik Fe tertentu dengan kondisi yang sama dan potensi yang lemah pada kondisi yang lain. Selain dari itu, nukleant potensial untuk fasa primer (α -Al) seperti $\gamma-Al_2O_3$ menunjukkan potensi yang buruk untuk nukleasi partikel intermetalik Fe yang berada di dalam fasa primer (partikel intra granular).

1.5.3. Penelitian Yang Berkaitan Dengan Penambahan *Grain Refiner*

Berbagai penelitian mengenai pengaruh *grain refiner* terhadap fluiditas yang telah dilakukan merujuk pada suatu kesimpulan akhir yang berbeda-beda. Young Dong Kwon dan Zin-Hyong Lee^[23] dalam penelitiannya menyatakan bahwa penambahan *grain refiner* 0,03% Ti dari Al_5TiB pada Aluminium A356 (Al-Cu-Mn) akan meningkatkan fluiditas. Dijelaskan bahwa fenomena tersebut didasari oleh menurunnya ukuran dendrit pada ujung *channel* aliran akibat penambahan *grain refiner* sehingga fraksi padatan di ujung akan semakin sedikit dan mencapai waktu yang lama untuk mencapai fraksi padat kritis serta membuat aliran fluiditas semakin panjang.

Universitas Indonesia

Pendapat yang serupa juga dikemukakan oleh A.M. Detomi dkk^[24] yang meneliti paduan aluminium Al-Mg terhadap penambahan *grain refiner* AlTiB dan AlTiC dimana kedua meningkatkan fluiditas, namun efek fluiditas yang diberikan AlTiC lebih tinggi daripada AlTiB. Meskipun demikian, ukuran butir aluminium dengan penambahan AlTiB lebih halus dibandingkan dengan AlTiC.

A.K. Dahle^[25] dalam penelitiannya menyatakan bahwa penambahan *grain refiner* Al₅TiB diatas 0,12% Ti akan menaikkan fluiditas pada paduan AlSi₇Mg dan AlSi₁₁Mg namun akan menurunkan fluiditas dengan penambahan dibawah 0,12 % Ti. Hal ini disebabkan karena penambahan *grain refiner* diatas 0,12% Ti akan menjadikan butir granular, bukan struktur dendrit yang bercabang sehingga alirannya akan semakin panjang.

Dalam penelitian ini A.K. Dahle juga menyatakan bahwa penambahan *grain refiner* pada paduan AlSi₇Mg, AlSi₁₁Mg, AlCu₂, AlCu₄, AlMg dan AlMg₅ akan memberikan efek yang berbeda berdasarkan jumlah *grain refiner* yang ditambahkan. Dengan kata lain, adanya rentang optimal penambahan *grain refiner*, dalam konteks ini Al₅TiB pada tiap paduan. Secara umum, penambahan Al₅TiB diatas konsentrasi tertentu akan meningkatkan fluiditas dan koherensi fraksi solid. Hal ini berkaitan dengan mekanisme pemberhentian aliran akibat terbentuknya jaringan dendrit koheren di bagian ujung. Penambahan Al₅TiB dibawah konsentrasi tertentu akan menurunkan fluiditas dan koherensi. Akan tetapi penambahan Al₅TiB yang paling tinggi memberikan nilai fluiditas yang lebih rendah dari yang tidak diberi *grain refiner* tersebut. Hal ini terjadi karena aliran tidak berhenti setelah mencapai *dendrit coherency* dengan saat ditambahkan *grain refiner* dibawah level tertentu.

Sementara efek yang berbeda terjadi pada paduan aluminium 295.0 ditambahkan *grain refiner* 0,17% Ti dimana fluiditas akan menurun seiring dengan penambahan *grain refiner*^[24]. Hal ini dibahas oleh S. Venkateswaran^[26] pada paduan aluminium eutektik dengan 11,4% silikon. Penambahan *grain refiner* titanium dari 2 – 10% akan menurunkan fluiditas.

Universitas Indonesia

Tidak adanya efek penambahan *grain refiner* terhadap fluiditas dibahas pada penelitian M.Tiryakioglu dkk.^[27] Pengujian ini menggunakan paduan aluminium 319 dan A356 dengan metode pengujian spiral. Melalui pendekatan solidifikasi dijelaskan bahwa aluminium hipoeutektik memiliki rentang pembekuan yang panjang. Karakteristik tersebut akan menghadirkan butir *equiaxed* yang terus terbawa sampai ujung aliran cairan logam dan menghasilkan penurunan terhadap nilai fluiditas. Kehadiran *grain refiner* akan memperburuk fluiditas dengan mempertinggi kemungkinan terbentuknya butir *equiaxed*. Dengan kondisi paduan aluminium yang sudah membentuk butir *equiaxed*, penambahan *grain refiner* tidak memberikan efek yang signifikan. Namun penambahan *grain refiner* dalam rentang komposisi eutektik akan menurunkan nilai fluiditas karena model solidifikasinya yang kolumnar. Hal yang sama juga diungkapkan oleh M. Sabatino dan L. Arnberg^[28] dalam penelitiannya pada aluminium paduan A356 dengan penambahan *grain refiner* Al₅TiB.

Pada penelitian yang dilakukan oleh J.Kajornchaiyakul dkk.^[29] mengatakan bahwa nilai fluiditas dengan metode spiral akan semakin menurun dengan semakin banyaknya kadar oksigen terlarut dan jumlah porositas pada temperatur penuangan 680°C. Namun ketika dilakukan pada temperatur 780°C pengaruh dari hidrogen ini tidak terlalu tampak terhadap fluiditas. Oleh karena itu mereka menyimpulkan bahwa percobaan yang dilakukan masih dalam kondisi yang terbatas sehingga diperlukan banyak parameter-parameter proses penuangan lainnya yang perlu dilakukan untuk mendapatkan hubungan yang mewakili antara jumlah porositas atau hidrogen terlarut terhadap nilai fluiditas.

Penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya, beberapa telah menyinggung penggunaan Sr sebagai *modifier*, akan tetapi belum ada penelitian yang memfokuskan pada keterkaitan antara Sr sebagai *modifier* dan nilai fluiditas dari paduan hipoeutektik Al-7%Si dan paduan eutektik Al-11%Si menggunakan metode vakum (*vacuum suction test*). Sementara itu, banyak *scrap* paduan aluminium yang sebenarnya bisa dimanfaatkan kembali untuk pada

Universitas Indonesia

industri otomotif, akan tetapi mengandung kadar Fe yang tidak diinginkan. Dalam penelitian ini akan dilihat seberapa jauh Sr berperan dalam meminimalkan efek Fe yang tidak diinginkan di dalam paduan tersebut sehingga *scrap* aluminium bisa dimanfaatkan kembali. Untuk itu penelitian yang dilakukan pada prinsipnya dibagi kedalam beberapa bagian, yaitu : perancangan, pembuatan, dan validasi alat uji fluiditas metode vakum, pembuatan *master alloy* Al-7% Si dan Al-11% Si serta karakterisasinya, dan rekayasa penambahan unsur Fe dan Sr pada kedua *master alloy* yang bertujuan untuk melihat pengaruh penambahan Fe dan Sr tersebut terhadap pembentukan fasa intermetalik secara kuantitatif (fraksi luas intermetalik) dan kualitatif (tebal, panjang dan jenis intermetalik), serta pengaruh terhadap nilai fluiditas dengan metode vakum. Hal ini merupakan *state of the art* dari penelitian. Analisis struktur mikro yang terbentuk secara kuantitatif dan kualitatif menggunakan mikroskop elektron yang dilengkapi spektroskopi sinar-X (SEM/EDX) dan difraksi sinar-X (XRD)

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Paduan Aluminium Tuang

Logam aluminium sangat berperan penting dalam berbagai bidang aplikasi karena memiliki sifat-sifat yang unggul. Sifat-sifat tersebut membuat aluminium menjadi logam yang sangat sesuai dan ekonomis untuk berbagai aplikasi dan telah menjadikan aluminium sebagai logam yang paling banyak digunakan setelah baja. Komponen kendaraan bermotor yang berbahan baku paduan aluminium baik untuk kendaraan bermotor roda dua maupun kendaraan bermotor roda empat sangat banyak. Biasanya komponen-komponen tersebut merupakan komponen pengganti dari komponen-komponen sebelumnya yang berbahan baku besi tuang atau baja.

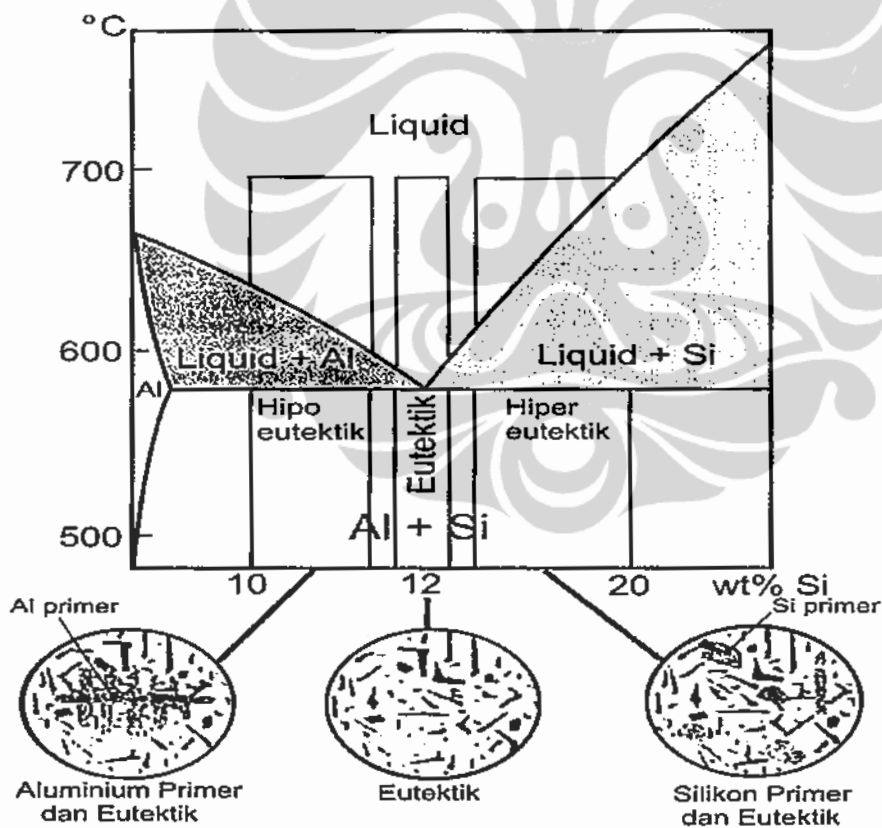
Aluminium dapat dengan mudah dikombinasikan dengan unsur lain (*alloying*) untuk mengatur karakteristiknya seperti sifat mekanis, sifat mampu cor (*castability*), sifat mampu mesin (*machinability*), ketahanan korosi (*corrosion resistance*), sifat mampu las, dan ketahanan terhadap retak (*hot tear resistance*). Kualitas dari produk hasil pengecoran tersebut juga masih dapat ditingkatkan dengan metode modifikasi, penghalusan butir serta perlakuan panas (*heat treatment*). Aluminium merupakan bahan yang dapat disesuaikan dengan berbagai metode pengecoran yang umum dipakai dan dapat dituang langsung ke dalam cetakan atau *dies* yang terpasang pada mesin otomatis dan dalam volume yang besar. Aluminium juga dapat dituang ke dalam cetakan pasir, cetakan *shell*, sentrifugal, dan *investment*.^[30]

2.2 Paduan Aluminium Silikon

Paduan aluminium silikon memiliki daerah sistem biner mulai dari sistem yang paling sederhana hingga sistem paduan yang lebih kompleks. Secara garis

Universitas Indonesia

besar, paduan aluminium-silikon dibagi menjadi 3 daerah utama, yaitu komposisi hipoeutektik, komposisi eutektik dan komposisi hipereutektik, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.1. Struktur utama dari ketiga komposisi paduan ini adalah berupa fasa α -Al, yang sangat kaya akan kandungan aluminium. Struktur ini akan tetap muncul walaupun pada komposisi hipereutektik, karena bentuk struktur ini akan selalu terpisah pada fasa padatnya baik dalam paduan hipoeutektik, eutektik, maupun hipereutektik. Selain fasa α -Al, juga terdapat fasa β yang merupakan partikel-partikel silikon yang tidak larut dalam fasa α -Al. Pada paduan hipereutektik, fasa tersebut menghasilkan silikon primer yang bentuknya relatif kasar. Terkadang bentuk silikon yang kasar ini juga dapat ditemui pada paduan eutektik.^[31]



Gambar 2.1 Diagram fasa Al-Si dan mikrostruktur paduan pada komposisi hipoeutektik, eutektik, dan hipereutektik.^[31]

2.2.1. Aluminium Silikon Hipoeutektik

Pada komposisi hipoeutektik, pembekuan terjadi melalui fasa cair-padat dengan tahapan:^[32]

1. Pembentukan jaringan dendritik α -Al.
2. Reaksi eutektik aluminium silikon.
3. Presipitasi fasa eutektik sekunder yang bergantung pada kadar *trace element* dalam paduan, misalnya Mg_2Si ataupun Al_2Cu .

Struktur akhir dari komposisi ini terdiri dari struktur dendritik yang kaya aluminium, dan sebagai fasa utamanya adalah fasa α -Al dengan struktur eutektik sebagai struktur tambahan. Morfologi dari komposisi ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur mikro Al-7% Si perbesaran 500x, etsa 0,5% HF 1) Silikon eutektik, 2) $Al_{12}Fe_3Si_2$ *chinese script*, 3) Mg_2Si *chinese script*.^[33]

Universitas Indonesia

Pada paduan hipoeutektik, dengan bertambahnya kandungan Si (hingga 12% Si) maka fraksi volume dan fraksi luas dari Al primer akan menurun sementara eutektik interdendritik akan meningkat. Pada diagram fasa di atas, terlihat matriks yang kaya akan aluminium (fasa α -Al) dan silikon yang berbentuk seperti serabut atau jarum. Kandungan silikon dari paduan aluminium silikon juga akan berpengaruh terhadap karakteristik proses solidifikasi yang berkaitan dengan metode cor yang dipilih.

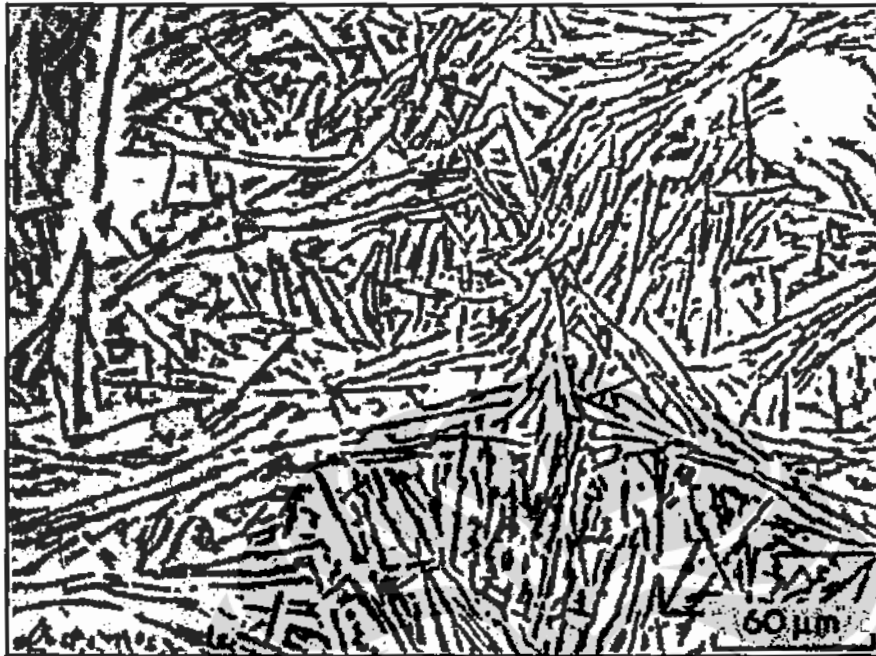
2.2.2. Aluminium Silikon Eutektik

Komposisi eutektik dengan kandungan silikon 11,7%-12,2% merupakan daerah dimana paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya. Proses pembekuan yang berlangsung menyerupai proses pembekuan logam murni, dalam hal ini temperatur awal dan temperatur akhir peleburan adalah sama (*isothermal*). Adanya struktur eutektik ini mengakibatkan paduan aluminium-silikon memiliki karakteristik mampu cor yang baik.^[31]

Pada paduan aluminium-silikon eutektik, dalam struktur mikronya terdapat struktur berupa plat kasar (*coarse plates*) silikon berwarna abu-abu dan matriks berwarna putih yang merupakan matriks aluminium seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Kristal Al-Si ini memiliki struktur kristal diamond dan umumnya bersifat rapuh (*brittle*). Silikon yang memiliki bentuk plat atau jarum- jarum kasar umumnya menghasilkan sifat mekanis yang buruk.

Komposisi paduan eutektik merupakan komposisi yang paling umum digunakan sebagai paduan tuang karena pada komposisi ini paduan memiliki temperatur eutektik yang rendah yaitu sekitar 577°C . Oleh karena temperatur eutektik yang rendah maka temperatur tuang dari paduan eutektik aluminium-silikon juga menjadi rendah. Temperatur tuang yang rendah dari paduan eutektik aluminium-silikon akan menghasilkan karakteristik mampu cor (*castability*) yang baik seperti porositas dan *shrinkage* yang minimum.

Universitas Indonesia



Gambar 2.3 Mikrostruktur paduan eutektik Al-Si Etsa 0,5% HF dan perbesaran 750x^[34]

2.2.3. Pengaruh Unsur Paduan Aluminium Tuang

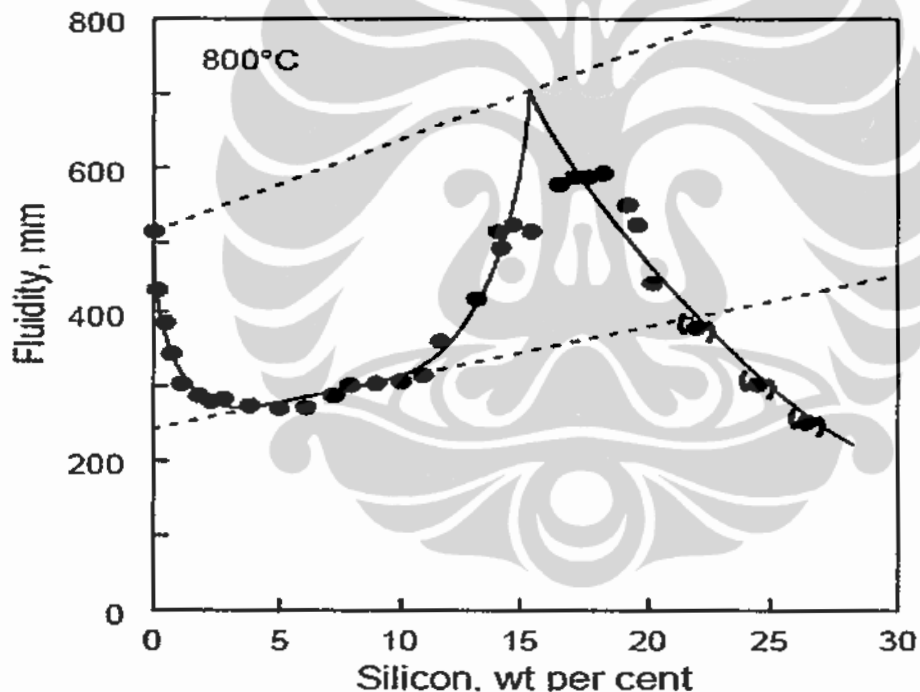
Pada industri otomotif, material aluminium memegang peranan yang sangat penting. Keunggulan aluminium antara lain seperti berat jenis yang lebih ringan, proses manufaktur yang lebih mudah, keuletan yang cukup baik, ketersediaan di alam yang banyak. Tetapi selain beberapa keunggulan tersebut, ada juga kelemahannya seperti kekuatan dan kekerasan yang rendah, kelarutan gas hidrogen yang tinggi pada aluminium cair. Karena itu, untuk meningkat sifat-sifat mekanis dari aluminium ini, ditambahkan beberapa unsur padu. Beberapa unsur paduan aluminium yang sering ditemui di dalam industri otomotif adalah:

2.2.3.1. Silikon (Si)

Unsur ini adalah yang paling banyak digunakan dalam proses pengecoran aluminium karena dapat meningkatkan mampu alir dan juga menurunkan

shrinkage sehingga secara langsung dapat menurunkan produk cacat. Silikon digunakan untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus pada aluminium, tetapi kadar paduan yang berlebih dapat menurunkan keuletan.

Batasan kandungan silikon ditentukan berdasarkan proses pengecoran, yaitu 5-7% Si untuk proses kecepatan pendinginan lambat (seperti *sand*, *investment*, dan *plaster casting*), 7-9% Si untuk *permanent mould*, dan 8-12% Si untuk proses kecepatan pendinginan tinggi pada *die casting*. Hubungan penambahan silikon dengan fluiditas dan sifat mekanis paduan Al-Si dapat dilihat dengan jelas melalui Gambar 2.4 dan Gambar 2.5.^[32]



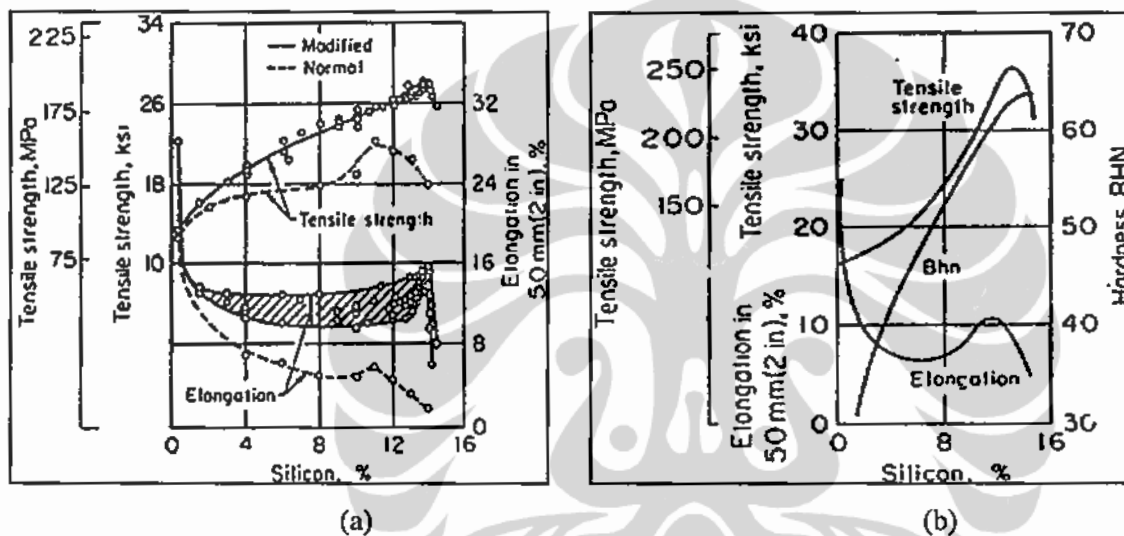
Gambar 2.4 Hubungan kadar silikon terhadap fluiditas aluminium.^[32]

2.2.3.2. Besi (Fe)

Unsur Fe termasuk ke dalam kategori pengotor dan tidak diinginkan dalam produk sebab dapat menurunkan keuletan dan ketahanan korosi. Akan

Universitas Indonesia

tetapi adanya Fe dapat membentuk fasa *insoluble/intermetallics* (FeAl_3 , FeMnAl_6 , dan $\alpha\text{-AlFeSi}$) karena kelarutannya yang rendah pada *solid state*. Fasa tersebut tidak larut dan meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi, namun juga dapat menyebabkan penggetasan. Besi merupakan elemen paduan pada aluminium yang dapat meningkatkan ketahanan *hot-tear* dan menurunkan kecenderungan penempelan (*effect soldering*) dengan cetakan.



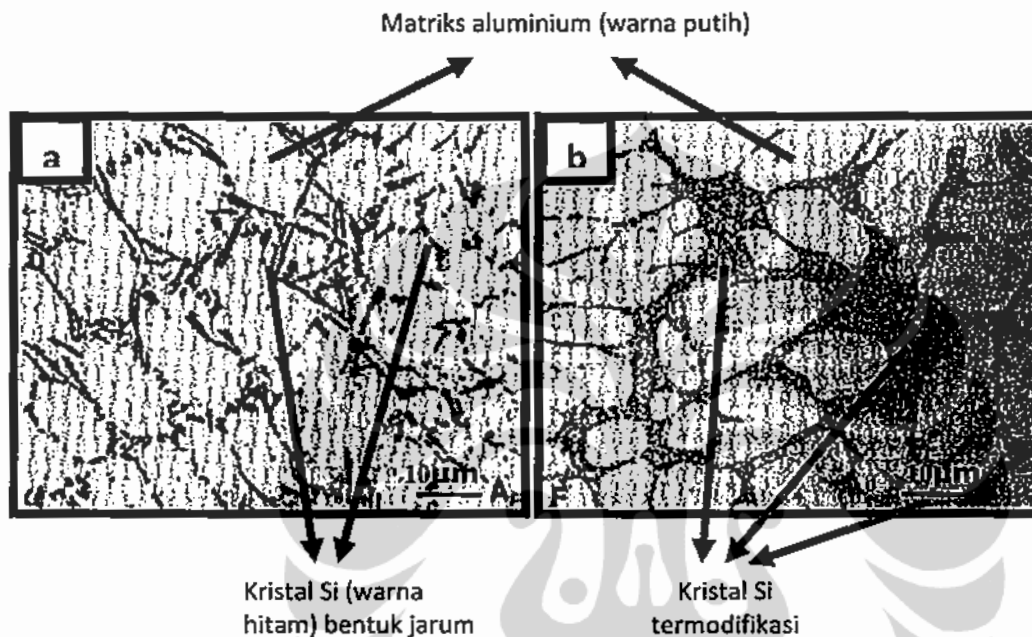
Gambar 2.5. Pengaruh kandungan Si terhadap sifat mekanis paduan Al-Si dalam kondisi *as-cast* (a) kuat tarik (b) kekerasan^[32]

2.2.3.3. Stronsium (Sr)

Untuk memperbaiki sifat fasa paduan aluminium silikon, dapat dilakukan melalui proses yang dinamakan modifikasi. Penambahan Sr akan memperbaiki struktur paduan aluminium silikon, yaitu dengan merubah struktur Si primer yang semula berbentuk jarum-jarum yang kasar atau balok menjadi lebih bulat dan halus. Perubahan morfologi silikon ini akan meningkatkan sifat mekanis paduan, mempermudah proses permesinan (*machinability*), dan meningkatkan mampu cor (*castability*) paduan aluminium silikon, karena semakin bulat dan halus struktur silikon maka mampu alir akan semakin meningkat.

Universitas Indonesia

Skematis perubahan struktur silikon di dalam fasa eutektik pada paduan aluminium silikon dengan penambahan *modifier* ditunjukkan pada Gambar 2.6. Pembahasan pengaruh Sr terhadap mikro struktur dan nilai fluiditas akan di bahas pada sub bab berikutnya.



Gambar 2.6. (a) Kristal silikon tidak termodifikasi, (b) Kristal silikon termodifikasi^[34]

2.3. Fasa Intermetalik Pada Paduan Aluminium Silikon

Besi merupakan pengotor paling umum yang ada pada paduan Aluminium. Kelarutan besi pada keadaan padat sangat rendah ($\sim 0,05\%$ pada 600°C , bahkan lebih rendah lagi pada temperatur ruang). Dengan demikian, kadar besi yang melebihi jumlah $\sim 0,05\%$ akan tampak sebagai fasa kedua intermetalik dalam kombinasi dengan Al dan elemen lainnya, dan fasa ini bersifat merusak terhadap sifat properti dari Al.^[31]

Fasa intermetalik berlaku sebagai *stress concentration* sehingga material bersifat rapuh. Sumber keberadaan besi pada proses pengecoran berasal dari peralatan peleburan dan dari *remelt scrap*. Keberadaan besi tidak dapat

dihilangkan dari aluminium, tetapi efek merusaknya dapat dikurangi dengan metode netralisasi atau modifikasi.^[35]

Fasa-fasa yang mungkin terjadi dan morfologinya pada saat pengecoran paduan aluminium-silikon dapat bermacam-macam tergantung dari komposisi elemen paduan aluminium dan kondisi pendinginan. Berikut ini adalah beberapa contoh fasa yang biasanya dapat terbentuk :

- Silikon: bentuknya tergantung dari kadar Si yang diberikan. Bisa terlihat dalam bentuk *accicular* jika tidak dimodifikasi ataupun *fibrous* jika dimodifikasi.
- $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ atau $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}_2$ (α -AlFeSi): bentuknya seperti *chinese-script* dan berwarna abu-abu terang.
- Al_5FeSi atau $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ (β -AlFeSi): bentuk seperti jarum-jarum kasar dan jumlahnya akan semakin banyak seiring penambahan kadar Fe. Warnanya abu-abu terang. Sifatnya menurunkan kekuatan pada aluminium.

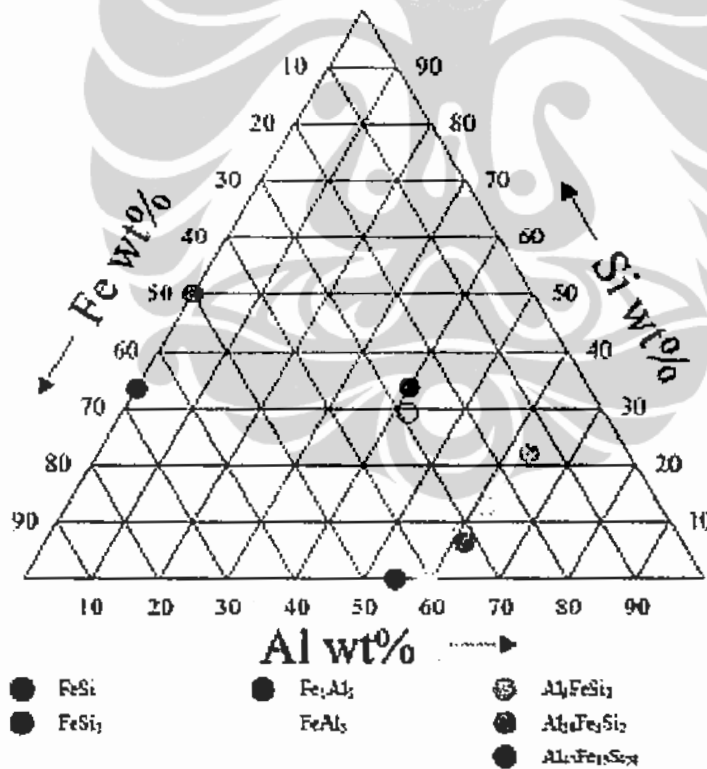
2.4. Diagram Fasa Al-Fe-Si

Pada paduan aluminium terdapat berbagai jenis fasa intermetalik. Fasa intermetalik yang umum terdapat pada paduan aluminium adalah fasa intermetalik α -AlFeSi dan β -AlFeSi. Fasa intermetalik α -AlFeSi mempunyai komposisi $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ (32-36% Fe; 6-9,5% Si), sedangkan fasa intermetalik β -AlFeSi mempunyai komposisi Al_5FeSi (27-28% Fe; 14-16% Si).^[35] Diagram fasa *ternary* AlFeSi dengan beberapa fasa intermetalik yang terdeteksi dari hasil pengujian menggunakan XRD dapat dilihat selengkapnya pada Gambar 2.7.

2.4.1. Morfologi dan Struktur Kristal

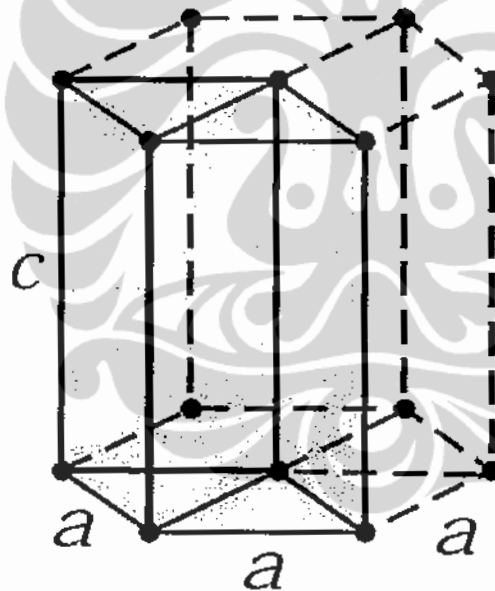
2.4.1.1. Intermetalik α -AlFeSi atau $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$

Fasa α -AlFeSi mempunyai struktur kristal heksagonal dengan parameter kisi $a = 12,3 \text{ \AA}$ dan $c = 26,3 \text{ \AA}$ dengan densitas $3,58 \text{ g/cm}^3$. Fasa $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ (31,6% Fe; 7,8% Si), dimana juga sama dengan $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}_2$ (30,7% Fe; 10,2% Si) Jenis intermetalik α -AlFeSi ini mempunyai bentuk seperti *script* dan biasa disebut "*chinese script*"^[35]. Fasa α -AlFeSi dapat terbentuk pada kecepatan pendinginan yang sangat tinggi (50 K/s) pada pembekuannya, dimana morfologi dari fasa ini lebih *spheroidise* (lebih bulat) jika dibandingkan dengan fasa β -AlFeSi yang berbentuk pipih. Struktur kristal intermetalik jenis ini diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Diagram fasa ternary AlFeSi dengan beberapa fasa intermetalik yang terdeteksi hasil pengujian menggunakan XRD.^[35]

Fasa α -AlFeSi ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$) mempunyai *non faceted interface* (tidak bersegi) dengan matriks aluminium sehingga menghasilkan ikatan yang lebih baik dengan matriks aluminium. Morfologi dari fasa ini dapat dilihat pada Gambar 2.9. Seperti terlihat pada gambar, fasa ini berwarna putih terang dan terlihat seperti *script* ketika diamati dengan mikroskop optik. Pertumbuhan fasa intermetalik ini tidak beraturan serta dapat bercabang-cabang. Selama kristalisasi, atom-atom dapat saling mengikat dalam rangka pembekuan fasa α - $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ ketika terjadi pertemuan pembekuan pada antarmuka (*interface*) solid-likuid. Fasa α - $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$, berhubungan dengan morfologinya yang kompak sehingga lebih meminimalisasi pengaruh buruk jika dibandingkan dengan fasa β - Al_5FeSi .



Gambar 2.8 Struktur Heksagonal pada Fasa α -AlFeSi^[36]



Gambar 2.9 a) Partikel α -AlFeSi pada Al- 0,5% Fe dan 0,2% Si (kecepatan pendinginan antara 2°K/s dan 11 °K/s). b) Gambar TEM dari "chinese script".^[37]

2.4.1.2. Intermetalik β -AlFeSi atau Al_5FeSi

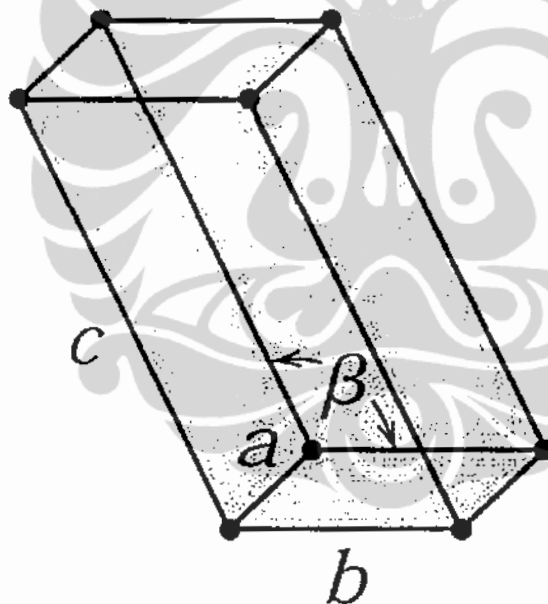
Fasa intermetalik jenis ini mempunyai bentuk seperti pelat-pelat tipis yang tajam, kadang-kadang partikel ini tampak seperti jarum-jarum halus pada matriks aluminium. Fasa Al_5FeSi (25,6% Fe; 12,8% Si), sama dengan $Al_9Fe_2Si_2$ dan β (AlFeSi), berada dalam *range* homogenitas 25-30% Fe, 12-15% Si. Fasa ini mempunyai struktur monoklinik dan dengan parameter kisi $a = b = 6,12 \text{ \AA}$, $c = 4,15 \text{ \AA}$, $\beta = 91^\circ$ dan densitas $3,30\text{-}3,35 \text{ g/cm}^3$ dan kekerasan *Vickers* sebesar 5,8 GPa. Gambar struktur kristal fasa intermetalik ini dapat dilihat dengan lebih jelas pada Gambar 2.10.

Pada Gambar 2.11 diperlihatkan fasa intermetalik β -AlFeSi mempunyai bentuk yang sangat tajam dan bersudut sangat tinggi dengan matriksnya (*highly faceted*) sehingga menghasilkan ikatan yang sangat lemah dengan matriks aluminium. Intermetalik berbentuk pelat ini (dimana terlihat seperti jarum pada mikrostruktur) juga dapat mencegah aliran dari metal cair selama proses pembekuan, membatasi *feedability* dan menyebabkan pembentukan porositas serta cacat pada hasil pengecoran.

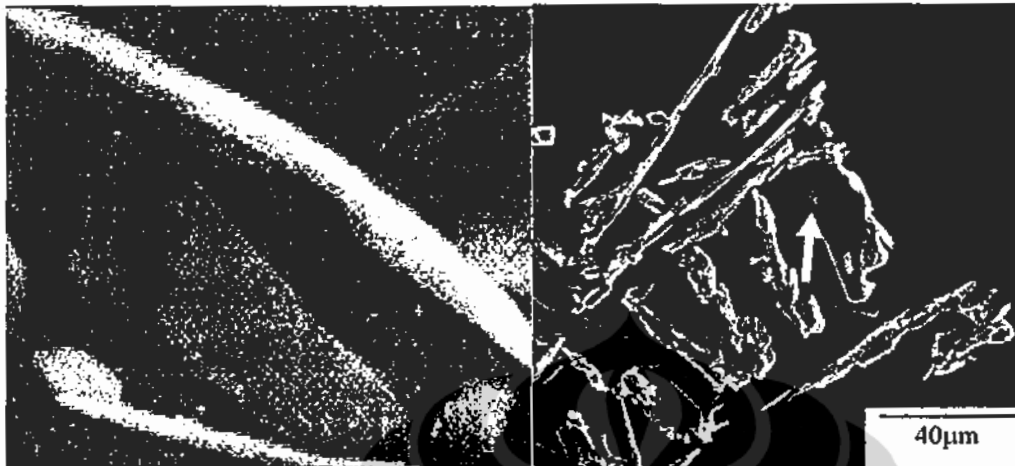
Universitas Indonesia

Fasa β - Al_5FeSi berwarna abu-abu terang ketika diamati dibawah mikroskop optik. Permukaan fasa intermetalik ini relatif halus/rata pada skala *atomic*, sehingga atom dari likuid dapat menghasilkan beberapa kemungkinan untuk saling bergabung pada antarmuka (*interface*). Dengan demikian, pertumbuhannya terbatas dan dengan kecepatan rendah.

Kecepatan pendinginan mempunyai pengaruh yang langsung pada kesetimbangan kinetik dan kuantitas dari fasa intermetalik yang ada pada struktur mikro. Kecepatan pendinginan yang lambat dapat mengakibatkan pembentukan fasa intermetalik β - Al_5FeSi , tetapi ketika pembekuan cepat maka terjadi pembentukan senyawa α - $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$.



Gambar 2.10 Struktur monoklinik pada fasa β AlFeSi .^[36]



Gambar 2.11 Intermetalik β -AlFeSi pada paduan aluminium 1% Si dan 0,5% Fe (*depth etched*)^[38].

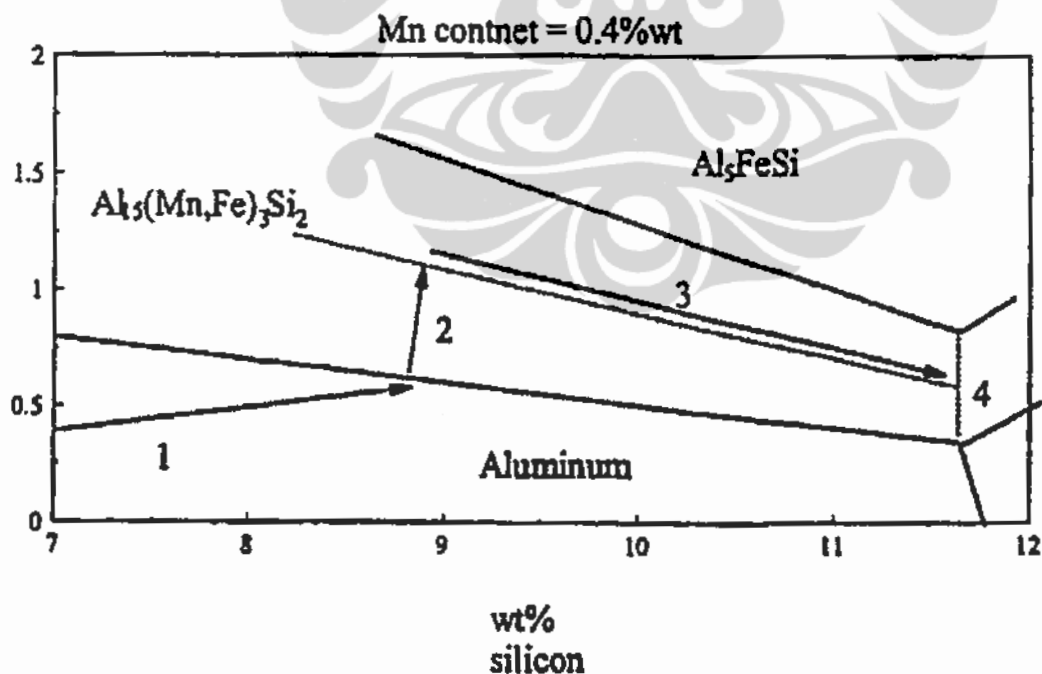
2.4.2. Pembentukan Fasa Intermetalik Pada Proses Pengecoran

Selama proses pengecoran aluminium, fasa intermetalik terbentuk di antara lengan dari dendrit aluminium yang telah membeku. Fe mempunyai kelarutan yang rendah pada aluminium yang telah membeku ($\sim 0,05\%$ pada kesetimbangannya), sehingga sisa Fe pada aluminium yang masih cair pada saat akhir pembekuan akan membeku dalam bentuk fasa kedua intermetalik. Sebagai hasilnya, hampir semua Fe di dalam paduan aluminium terdapat dalam jenis berbeda dari fasa kedua intermetalik yang metastabil di antara butir-butir aluminium.^[31] Berikut ini merupakan proses pembentukan fasa intermetalik pada paduan Al-7Si-0,4Mn.

Berdasarkan diagram fasa pada Gambar 2.12, pembekuan dimulai dengan pertumbuhan dendrit aluminium (α -Al), yang ditunjukkan oleh anak panah 1. Sisa cairan aluminium menjadi kaya akan elemen-elemen padatan (Fe, Mn, dan Si), lalu garis segregasi (anak panah 2) berpenetrasi ke daerah $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$, dimana partikel $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ tumbuh bersama cairan. Kemudian pada anak panah 3, baik fasa $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ maupun fasa Al_5FeSi tumbuh bersama-sama, hingga akhirnya Al_5FeSi tumbuh dengan elemen Al dan Si eutektik (titik 4).^[39]

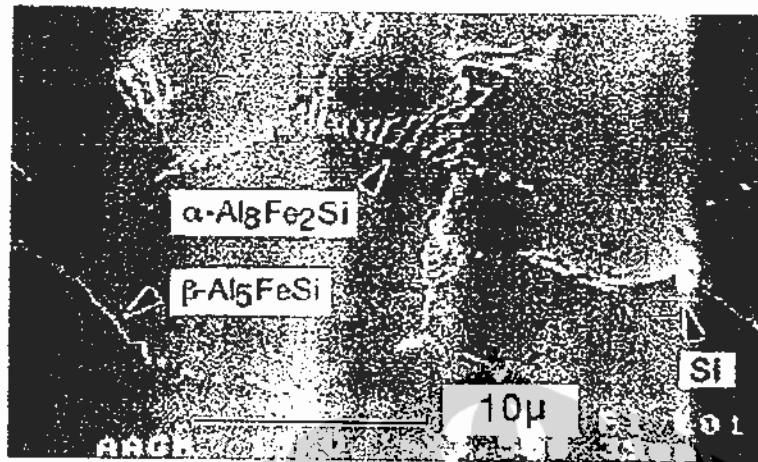
Universitas Indonesia

Pada proses pengecoran, perbandingan komposisi Fe/Si pada paduan aluminium merupakan parameter yang penting untuk menentukan apakah fasa yang terbentuk adalah intermetalik α -AlFeSi atau β -AlFeSi. Apabila perbandingan Fe/Si lebih besar dari satu selama pembekuan fasa cair maka akan terbentuk fasa intermetalik α -AlFeSi. Sedangkan jika perbandingan Fe/Si lebih rendah dari 1 maka selama pembekuan akan terbentuk β -AlFeSi. Dengan kecepatan pendinginan 5°K/s dan kandungan Fe 0,2% hanya fasa β -AlFeSi monoklinik yang terbentuk. Dari hasil penelitian yang lain juga menyatakan bahwa fasa metastabil α -AlFeSi dan β -AlFeSi berubah sebagai fungsi kecepatan pendinginan. Beberapa hasil investigasi yang telah dilakukan para peneliti lain, intermetalik α -AlFeSi dan β -AlFeSi di dalam *as-cast* aluminium menunjukkan bahwa partikel α -AlFeSi yang berbentuk *script* ditemukan pada *triple point* dari butir sedangkan partikel β -AlFeSi yang berbentuk pelat tipis ditemukan pada batas dendrit aluminium seperti yang ditunjukkan lebih jelas pada Gambar 2.13 dan Gambar 2.14.



Gambar 2.12 Proses pembentukan fasa intermetalik pada kadar Mn 0,4%.^[39]

Universitas Indonesia



Gambar 2.13 Hasil SEM dimana α -AlFeSi dalam bentuk script dan β -AlFeSi dalam bentuk pelat.^[38]



(a)

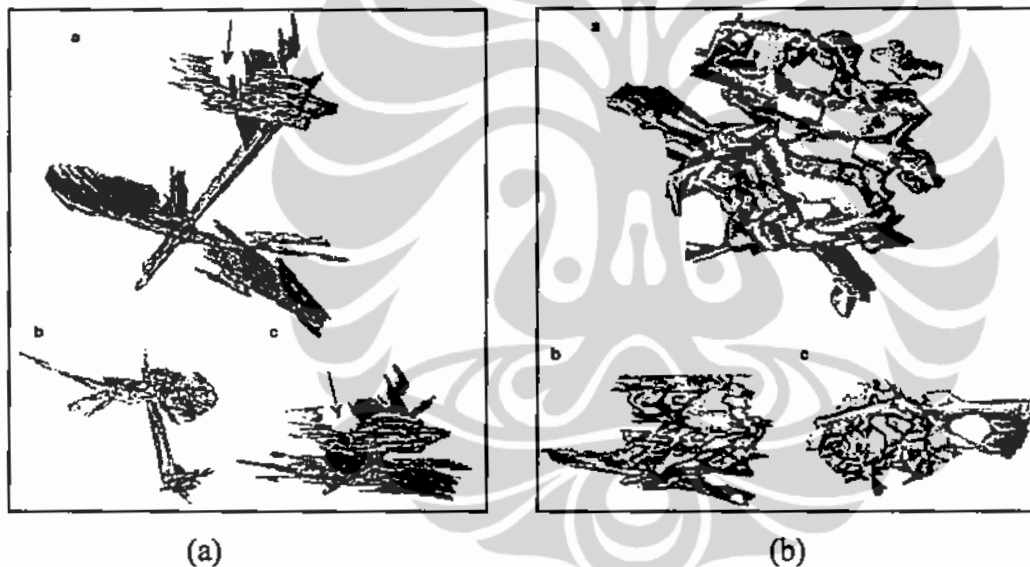


(b)

Gambar 2.14 (a) Intermetalik β -AlFeSi berupa pelat. (b) *Chinese Script* α -AlFeMnSi.^[40]

Universitas Indonesia

Pembentukan fasa β - Al_5FeSi dapat diminimalisir melalui cara-cara seperti dengan penambahan unsur Mn dalam jumlah yang cukup dan dengan proses pembekuan yang cepat. Cara yang pertama, dimana dilakukan penambahan Mn yang dapat memicu terbentuknya *cubic* α - $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$. Cara yang kedua, dengan melakukan proses pembekuan yang cepat, cenderung memicu terbentuknya α - $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ yang memiliki struktur kristal yang berbeda.^[20] Morfologi dari kedua fasa ini dapat dilihat dengan lebih mendetail pada Gambar 2.15. Gambar tersebut menunjukkan tampilan tiga dimensi fasa intermetalik β - Al_5FeSi dan α - $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$.^[18]



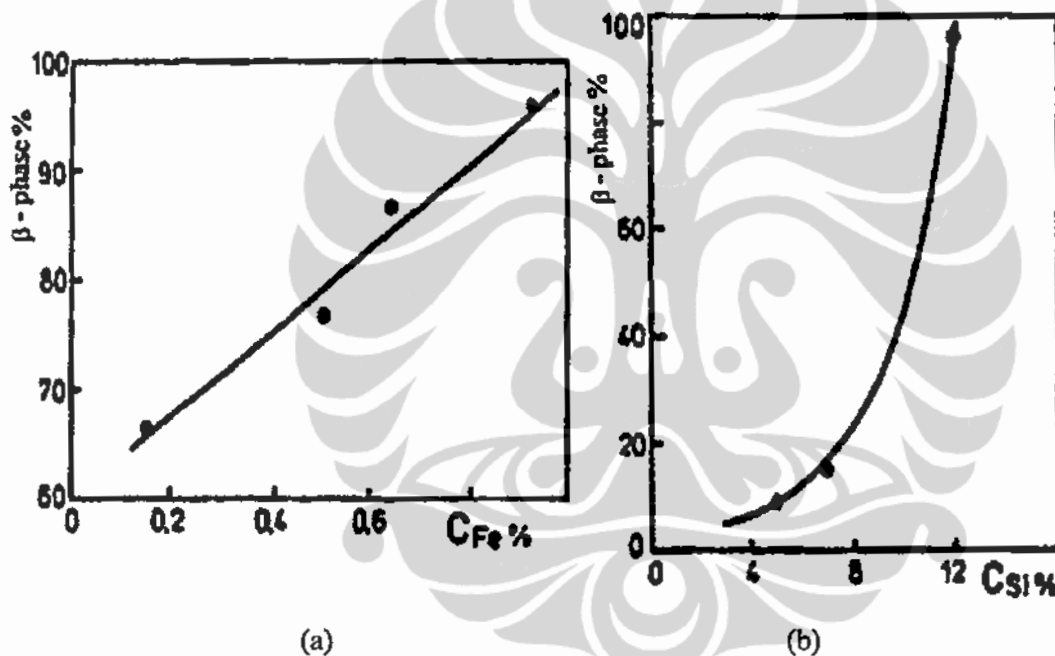
Gambar 2.15 (a) Tampilan tiga-dimensi fasa β - Al_5FeSi yang bagian ujungnya berbentuk jarum. (b) Tampilan tiga-dimensi fasa α - $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ yang membentuk fasa *chinese script*.^[18]

2.4.3. Pengaruh Besi dan Silikon pada Fasa Intermetalik

Besi dan silikon merupakan unsur yang paling umum ditemukan dalam paduan aluminium karena kelarutannya yang rendah selama pembekuan. Fe akan membentuk senyawa intermetalik yang kompleks dengan silikon, mangan dan juga krom. Selama proses pengecoran dari paduan aluminium, sejumlah besar dari fasa intermetalik dapat mengendap bergantung dari kondisi dari pembekuan dan

Universitas Indonesia

paduan kimianya. Pada paduan aluminium-silikon yang mempunyai kadar Fe yang tinggi akan menghasilkan fasa intermetalik β -AlFeSi sebagai fasa yang dominan. Semakin tinggi kadar Fe akan meningkatkan panjang dari bentuk pelat intermetalik β -AlFeSi. Persentase dari fasa β -AlFeSi akan meningkat secara drastis dengan meningkatnya kadar Fe seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16. Grafik pada gambar menunjukkan semakin tinggi kadar Si maka akan semakin banyak terbentuk β -AlFeSi.

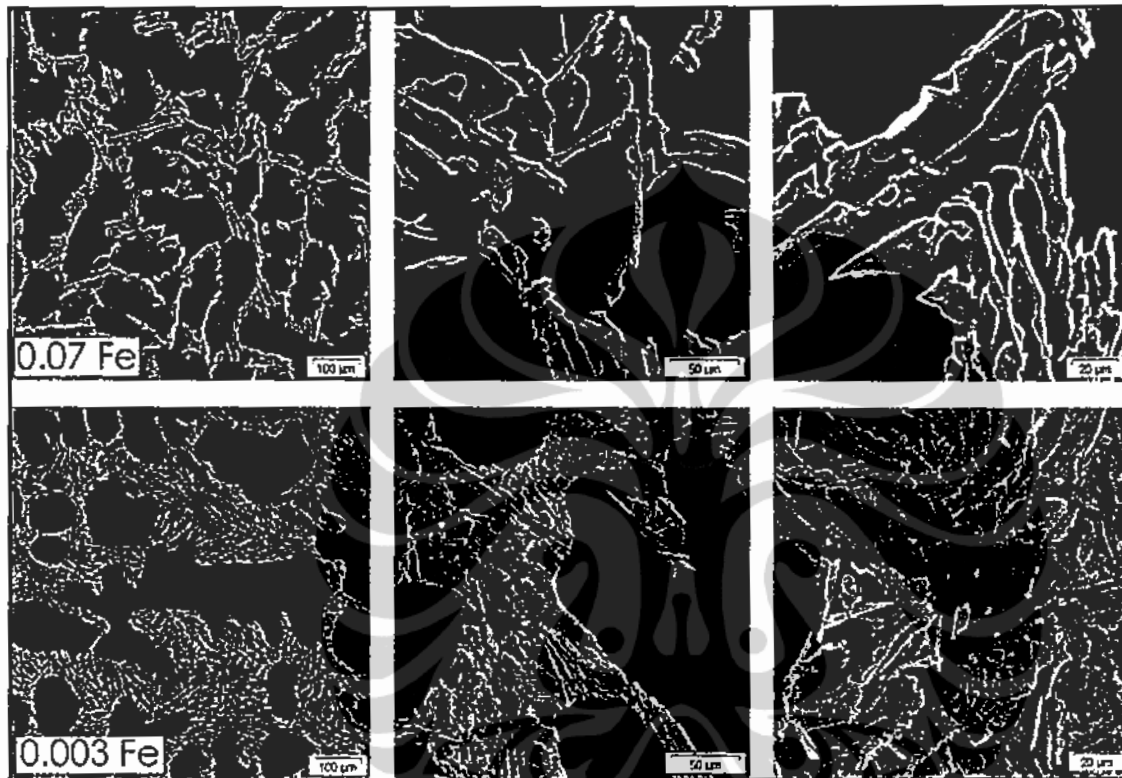


Gambar 2.16 (a) Hubungan kadar Fe terhadap presentase β -AlFeSi. (b) Hubungan antara presentase Si dengan β -AlFeSi^[35].

Pada penelitian Villeneuve^[41] telah didapatkan bahwa plat/jarum fasa intermetalik β -AlFeSi sering bercabang menjadi beberapa jarum, *shrinkage*, dan rongga dapat terbentuk dalam pengecoran karena ketidakmampuan logam cair untuk mengisi ruang diantara cabang-cabang jarum tersebut. Pada penelitian Marshall^[42] didapatkan bahwa ukuran fasa intermetalik akan meningkat dengan

Universitas Indonesia

penambahan besi dan silikon. Gambar 2.17 menunjukkan pengaruh Fe terhadap morfologi eutektik silikon.



Gambar 2.17 Pengaruh besi terhadap morfologi eutektik-silikon pada paduan Al-Si Hipoeutektik.^[43]

2.4.4. Pengaruh Unsur Lain Terhadap Pembentukan Fasa intermetalik

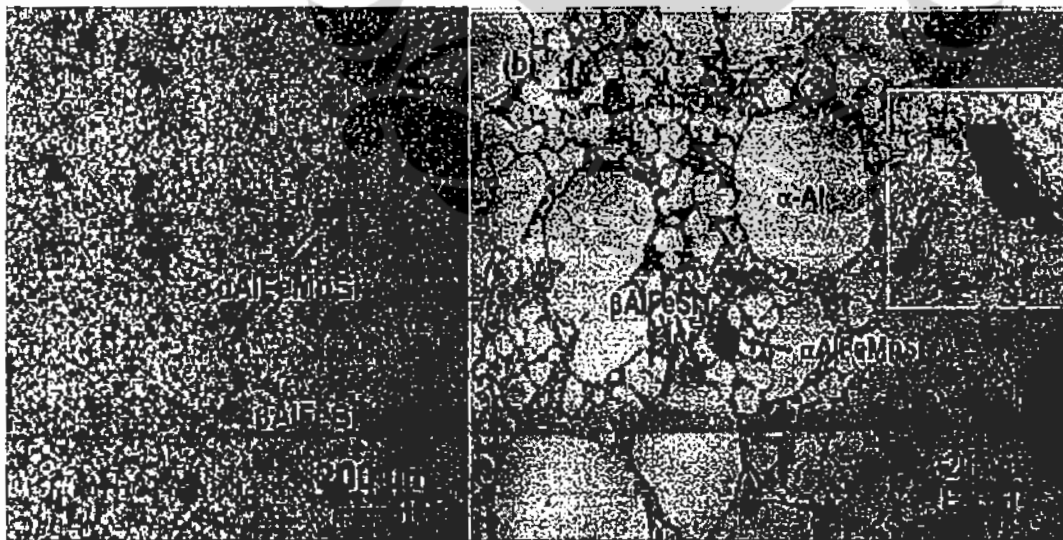
Selain fasa α -AlFeSi dan β -AlFeSi, adanya unsur-unsur lain seperti Mn, Mg, Si, P, dan Sr dapat mengubah α -AlFeSi dan β -AlFeSi menjadi fasa intermetalik.

1. Penambahan Mn

Pada penambahan mangan, akan terbentuk fasa *cubic ternary* $Al_{15}Mn_3Si_2$ (atau sering disebut dengan α -AlMnSi) yang akan menstabilkan kadar Fe berlebih dengan membentuk suatu fasa kesetimbangan, *equilibrium quaternary phase* $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ atau yang biasa disebut α -AlFeMnSi. Biasanya Cr juga ditambahkan bersama dengan Mn sebagai Fe *corrector*. Selanjutnya, α -AlFeMnSi akan membeku sebagai *cubic phase* yang mampu mengurangi efek negatif dari Fe^[44].

Sebenarnya, prinsip dari pengurangan efek negatif dari Fe adalah dengan mengubah morfologi dari *large needle-shaped primary* β -AlFeSi, dimana hal tersebut dapat dilakukan dengan cara menambahkan Mn yang akan mengubah *primary monoclinic* β -AlFeSi menjadi fasa *cubic* α -AlFeMnSi.

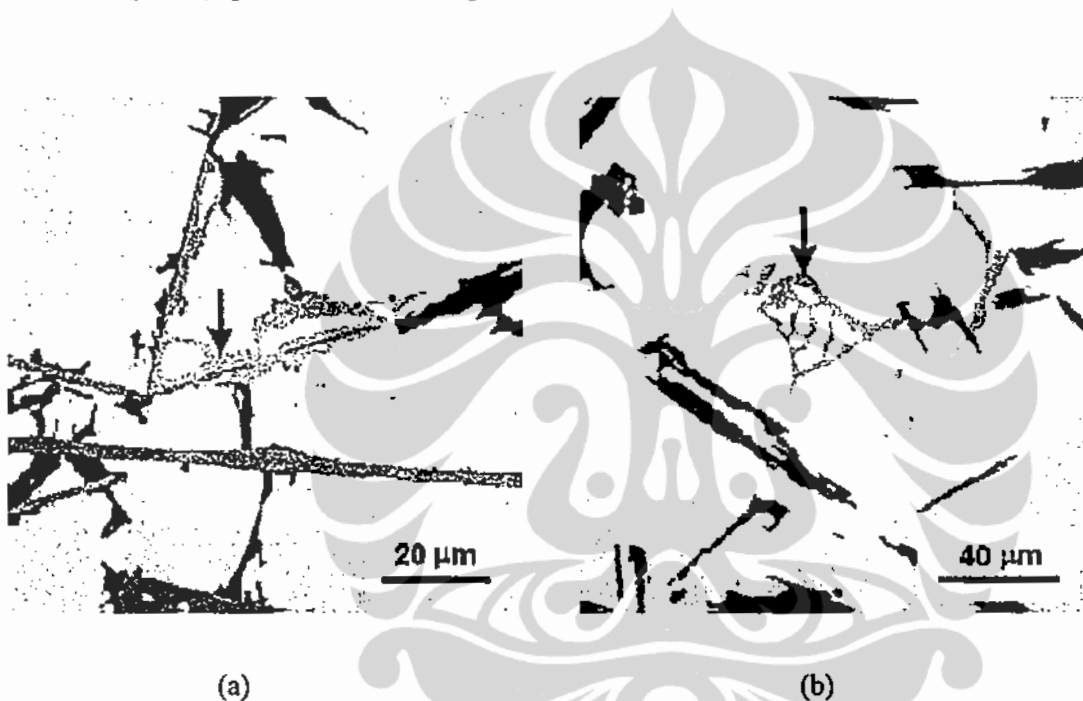
Fasa jarum β -AlFeSi dan α -AlFeMnSi kubik dapat dilihat dengan lebih jelas pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Fasa jarum β -AlFeSi vs *cubic* α -AlFeMnSi (a) 200 μ m dan (b) 20 μ m^[44]

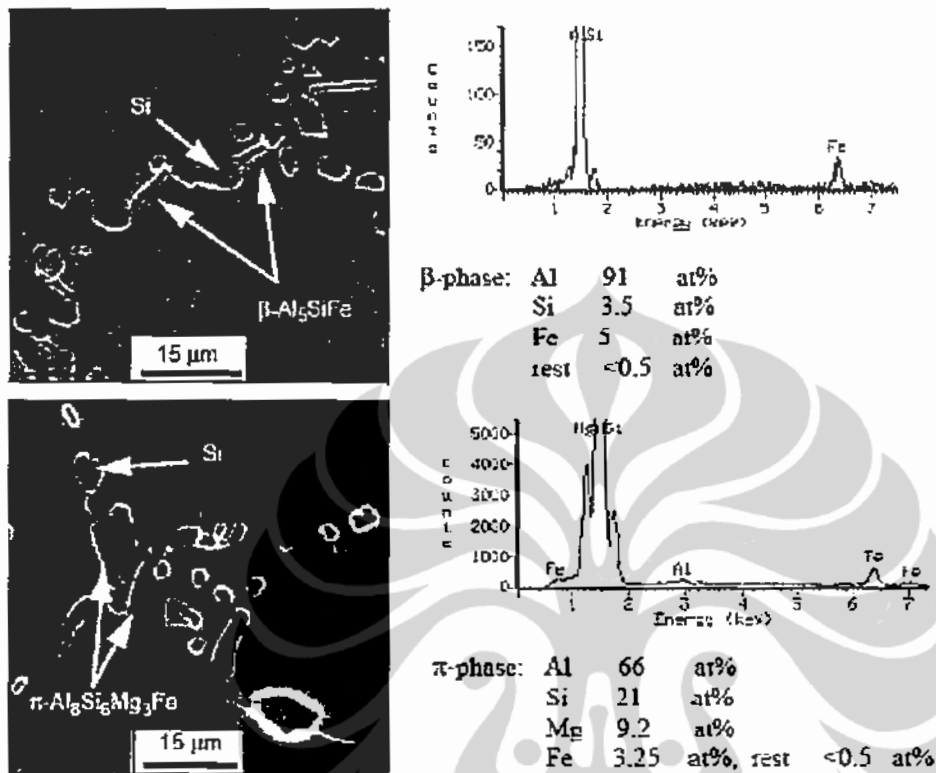
2. Penambahan Mg

Penambahan magnesium pada kadar optimum, yaitu pada 0,3% dapat meningkatkan sifat mekanis dari paduan Al-Si. Mekanismenya adalah mengubah fasa β -Al₅FeSi menjadi Al₅Mg₃FeSi₆.^[45] Beberapa sumber yang lain menyebutkan bahwa dengan adanya magnesium, dapat mengubah fasa β -Al₅FeSi menjadi fasa Al₈FeMg₃Si₆ (π -phase) sesuai dengan Gambar 2.19.^[40]



Gambar 2.19 Paduan Al-5%Si-1%Cu-0.5%Mg-(Fe) yang mengalami (a) perubahan fasa dari β -Al₅FeSi menjadi π -script (b) π -phase berbentuk script.^[40]

Gambar 2.20 memperlihatkan foto SEM dan komposisi kimia pada (a) Fasa β -Al₅FeSi dan (b) fasa π -Al₈FeMg₃Si₆. Dapat dilihat bahwa komposisi dari intermetalik yang terbentuk dapat diperkirakan melalui hasil EDX; dalam hal ini, tanpa bantuan EDX, akan sangat sulit untuk memperkirakan kemungkinan fasa yang ada ini.



Gambar 2.20. Gambar SEM dan komposisi kimia pada Fasa β -Al₅FeSi, dan Fasa π -Al₃FeMg₃Si₆^[46]

3. Penambahan Si

Penambahan Si dapat menghambat pertumbuhan fasa β -Al₅FeSi yang kasar menjadi lebih halus. Mekanismenya adalah menekan pertumbuhan fasa *binary* β -Al₅FeSi yang kasar, menjadi fasa *ternary* β -Al₅FeSi yang lebih halus.^[47]

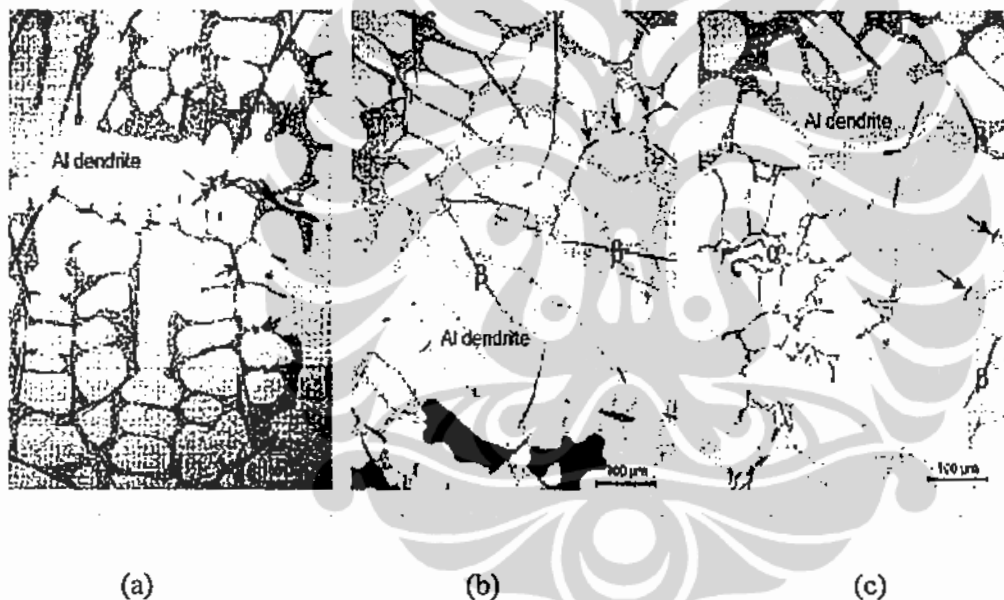
4. Penambahan Sr

Stronsium telah dikenal luas dalam memodifikasi fasa β -Al₅FeSi yang kasar dan seperti jarum menjadi lebih pendek dan halus. Sr mampu memutus dan memecah jarum-jarum β menjadi lebih pendek sehingga dapat mengurangi efek

Universitas Indonesia

negatif dari fasa β dengan meningkatkan sifat mekanis dari paduan Al-Si. Sr mengubah fasa β menjadi π (pada Mg) atau α (pada Mn) dengan cara mengeluarkan Si dari dalam keping fasa β , sehingga mampu mengurangi jumlah β yang ada.^[47]

Pada Gambar 2.21 diperlihatkan bahwa terjadi perubahan pada fasa β yang ada. Pada Gambar 2.21(a), tampak adanya jarum-jarum β yang panjang dan pada Gambar 2.21(b), jarum-jarum ini terpotong dengan penambahan 135 ppm Sr. Adanya penambahan Mn pada Gambar 2.21(c), mampu mengubah fasa β menjadi fasa α .



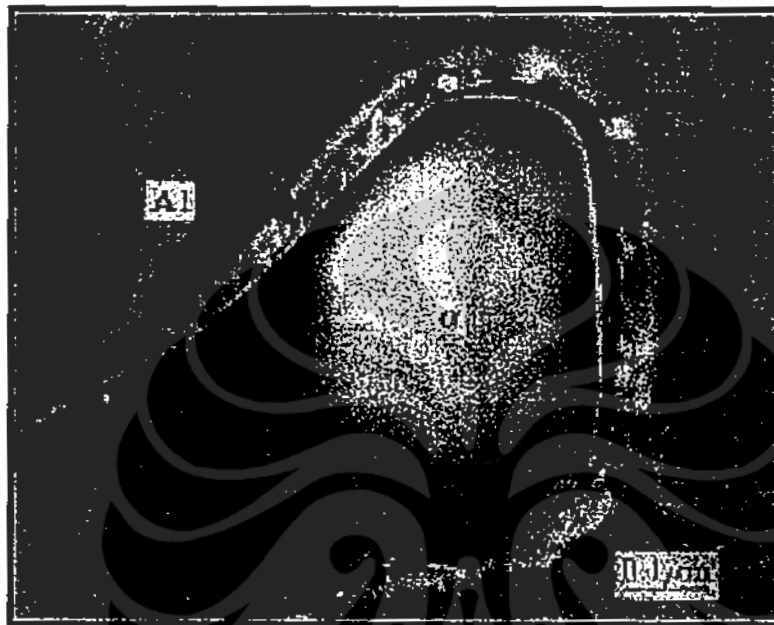
Gambar 2.21 Gambar struktur mikro paduan yang mengandung (a) 0,7% Fe (b) 0,7% Fe + 135 ppm Sr (c) 0,7% Fe + 200 ppm Sr + 0,3% Mn^[47]

Menurut Mulazimoglu.^[33], Sr mampu membuat lapisan tipis di *interface* sekeliling fasa α yang menghalangi silikon dari Al matrix untuk berdifusi masuk ke dalam fasa α . Akibatnya fasa α tidak dapat bertransformasi menjadi fasa β , seperti terlihat pada Gambar 2.22.

Namun lebih lanjut, menurut Gholamali.^[35] seiring dengan peningkatan kadar Si, menyebabkan lapisan tipis Sr tidak dapat menahan desakan difusi dari

Universitas Indonesia

matrix Al. Akibatnya pada kadar Si yang tinggi, fasa β pasti terbentuk. Berikut adalah beberapa penelitian yang menunjukkan pengaruh berbagai unsur paduan terhadap fasa intermetalik AlFeSi



Gambar 2.22 Lapisan kaya silikon di sekeliling fasa α -AlFeSi pada kehadiran stronsium pada paduan aluminium A6063 (0,45-0,9% Mg; 0,35% Fe; 0,20-0,6 % Si; 0,10 % Cr; Zn; Ti, dan 0,10 % Mn)^[33]

M.M. Haque^[48] melakukan penelitian tentang pengaruh kecepatan pendinginan dan penambahan modifier Sr terhadap panjang maksimal fasa intermetalik β - AlFeSi yang terbentuk. Nilai pengurangan panjang jarum intermetalik β -AlFeSi karena pengaruh kecepatan pendinginan mencapai 47,8% pada *graphite vs metallic mold samples* dan 67,5% pada *graphite mold vs gauge samples*, sedangkan pengurangan panjang maksimum jarum intermetalik β -AlFeSi karena pengaruh modifikasi Sr hanya 16% pada sampel *graphite mold*. Hal ini dapat disimpulkan bahwa pengaruh kecepatan pendinginan lebih efektif dalam mengurangi panjang jarum intermetalik β -AlFeSi daripada pengaruh modifikasi Sr. Jumlah fasa intermetalik α -AlFeSi meningkat sedikit karena pengaruh

Universitas Indonesia

modifikasi Sr (dari 0% menjadi 8%), tetapi pengaruh kecepatan pendinginan tidak memberikan pengaruh terhadap peningkatan jumlah fasa intermetalik α -AlFeSi.

Pengaruh berbagai unsur padu terhadap aluminium dan efek yang mungkin terjadi terhadap paduan aluminium diberikan secara ringkas dalam Tabel 2.1.^[47]

Tabel 2.1. Pengaruh berbagai unsur paduan terhadap fasa intermetalik Al-Fe-Si^[47]

Parameter	Efek yang mungkin terjadi
Fe	Membentuk fasa intermetalik terutama fasa β
Mn, Cr, Be, Ni, etc..	Mengubah fasa β menjadi α , tetapi meningkatkan total jumlah fasa intermetalik yang kaya akan Fe
Mg	Mengubah fasa β menjadi π
P	Mendorong pembentukan fasa β
Sr	Mendorong pemutusan dan pengubahan fasa jarum yang panjang menjadi lebih pendek pada paduan yang kaya akan intermetalik fasa β
<i>Cooling rate</i>	Kecepatan pendinginan yang rendah akan mendorong terbentuknya fasa β
<i>Melt superheating</i>	Menghaluskan dan mengurangi fasa intermetalik serta menghindari terbentuknya fasa Lumpur

2.5. Pengaruh Fasa Intermetalik Terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium Silikon

Fasa-fasa intermetalik yang mengandung Fe dapat dibedakan berdasarkan bentuk (morfologi) dan warna saat diteliti menggunakan mikroskop. Fasa α

Universitas Indonesia

terbentuk dalam morfologi seperti *script*, tetapi fasa α versi $Al_{15}(Fe.Mn)_3Si_2$ terlihat lebih padat dan *blocky*. Fasa π juga berbentuk seperti morfologi *script* dan sering kali tapi tidak selalu, berhubungan dengan fasa β yang berbentuk morfologi *platelet*. Walaupun fasa β terlihat dalam tiga dimensi berbentuk *platelet*, namun saat diteliti dalam gambar atau foto dua dimensi akan nampak dalam bentuk jarum. Perbedaan bentuk dari intermetalik besi pada suatu komponen dapat mempengaruhi *castability* dan sifat mekaniknya.

Dengan meningkatnya kadar Fe, keuletan dari paduan aluminium-silikon akan menurun yang diikuti dengan penurunan *tensile strength* dan umumnya *yield strength* tidak dipengaruhi oleh kadar Fe, sehingga *tensile strength* dari paduan aluminium yang mengandung Fe tidak akan mencapai *yield strength*-nya karena terlebih dahulu terjadi *brittle fracture*.

Pengaruh merusak dari Fe dimulai ketika kadar Fe sangat rendah, tetapi akan menjadi sangat serius bila telah melebihi tingkat kritisnya telah terlewati. Pengaruh merusak terhadap keuletan paduan aluminium-silikon berkaitan pada dua alasan berikut ini:

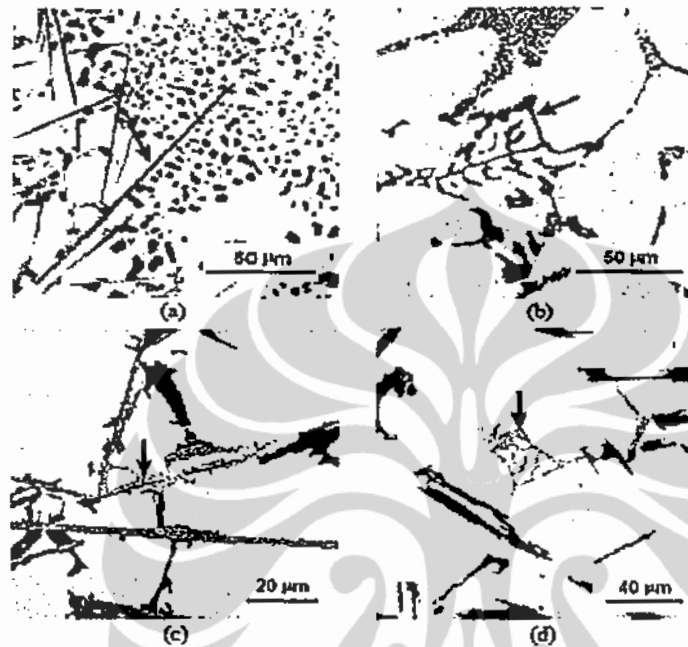
- 1) Ukuran dan jumlah kepadatan dari intermetalik yang mengandung Fe (terutama β -AlFeSi) akan meningkat. Intermetalik ini akan berfungsi seperti endapan yang akan berpengaruh langsung terhadap mekanisme perpatahan dan semakin besar jumlah intermetaliknya maka keuletannya akan semakin turun.
- 2) Dengan semakin meningkatnya kandungan Fe, maka porositas yang terbentuk akan semakin meningkat, sehingga porositas ini akan sangat menurunkan keuletan dari paduan aluminium-silikon.

Beberapa morfologi fasa intermetalik yang mengandung Fe pada paduan Al-5%Si-1%Cu-0,5%Mg-(Fe) dapat dilihat dengan lebih jelas pada Gambar 2.22.^[40]

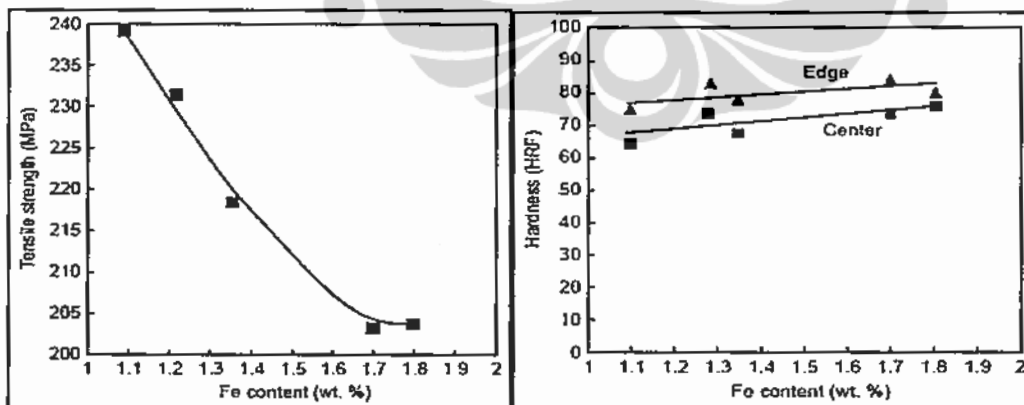
Dapat dijelaskan bahwa fasa β -AlFeSi cenderung lebih mudah untuk patah dan retak jika dibandingkan dengan fasa α , seperti terlihat pada Gambar 2.23,

Universitas Indonesia

yang menunjukkan sifat mekanis paduan Al-Si sebagai fungsi kadar Fe.^[20] Disamping itu dengan peningkatan kadar besi maka jumlah porositas juga akan meningkat sehingga menurunkan keuletan dan kekuatan tarik paduan.



Gambar 2.23 Hasil foto mikro dari beberapa morfologi fasa intermetalik yang mengandung Fe pada paduan Al-5%Si-1%Cu-0,5%Mg-(Fe): (a) *platelets* β -Al₅FeSi; (b) *script* α -Al₃Fe₂Si; (c) fasa π yang tumbuh dari β ; (d) *script* fasa π .^[40]

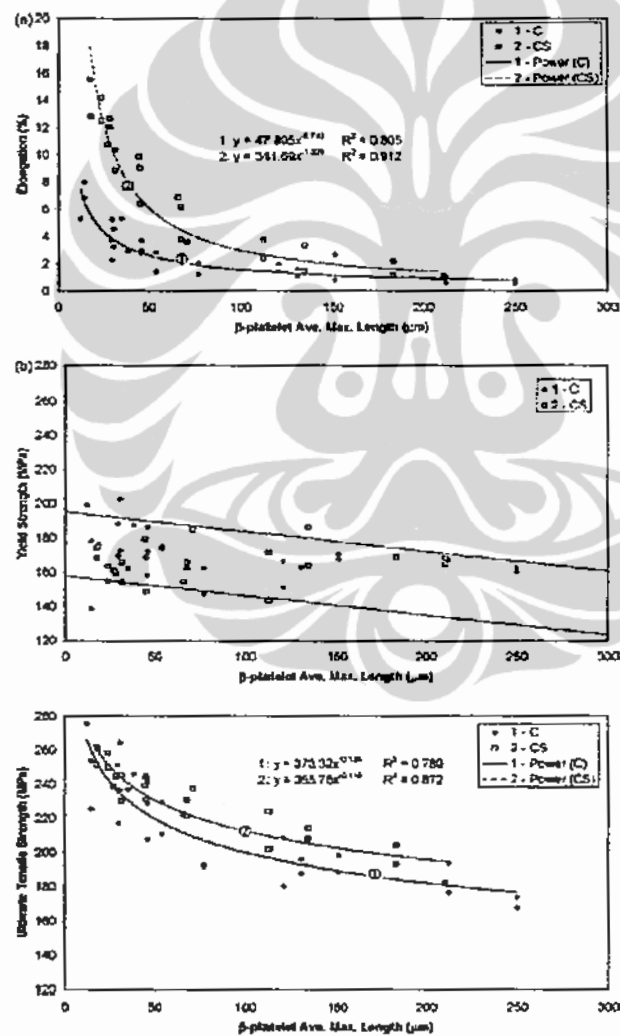


(a)

(b)

Gambar 2.24 Grafik yang menunjukkan sifat mekanis paduan Al-Si sebagai fungsi kadar Fe; (a) Kekuatan tarik, dan (b) Kekerasan.^[20]

Keberadaan besi, walaupun dalam jumlah yang kecil, dapat menurunkan *ductility* paduan, karena terbentuknya presipitasi fasa β -AlFeSi dalam bentuk *platelet*. Fasa ini sangat mudah untuk pecah dan memiliki ikatan yang relatif lemah dengan matriks aluminium. Peningkatan kadar besi yang sangat progresif, akan meningkatkan panjang fasa tersebut, khususnya pada kadar besi lebih dari 0,7%. Presipitasi fasa-fasa ini terjadi kebanyakan pada zona *liquid-solid*, pada reaksi *pre-eutectic*. Pengaruh panjang maksimum fasa β -AlFeSi terhadap sifat mekanik paduan A356.2 dapat dilihat pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25 Pengaruh panjang maksimum fasa β -AlFeSi terhadap sifat mekanik paduan A356.2. [48]

Fasa platelet β -AlFeSi *pre-eutectic* dapat menurunkan sifat mekanik dari paduan^[17]. Penambahan kandungan besi lebih dari 0,5% dapat meningkatkan kekuatan paduan, namun juga dapat menurunkan *ductility*.^[16] Pada peningkatan kandungan besi dari 0,5% sampai 1,2% pada paduan Al-13% Si, dapat menurunkan sifat mekanik terutama elongasinya karena pembentukan fasa *platelet* β -AlFeSi.^[17] Fasa *platelet* β -AlFeSi ini bertindak sebagai pembangkit tegangan yang berkontribusi terhadap sifat *brittleness* material.^[35]

2.6. Teori Fluiditas

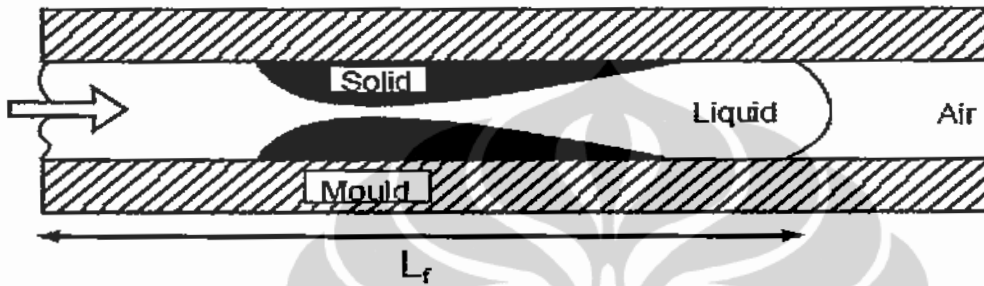
Fluiditas adalah sifat mampu alir yang didefinisikan sebagai kemampuan logam cair untuk mengisi rongga-rongga cetakan pada proses pengecoran logam. Fluiditas dari suatu paduan umumnya digunakan sebagai ukuran *mold-filling capability* dari suatu paduan. Fluiditas logam cair merupakan faktor penting dalam pengecoran khususnya untuk menghindari cacat-cacat yang sering terjadi pada benda cor yang sangat tidak diinginkan. Fluiditas atau sifat mampu alir suatu cairan yang kurang baik dapat mengakibatkan *short run casting* dan juga dapat menghasilkan permukaan coran yang kurang baik. Satuan yang digunakan sebagai ukuran fluiditas dari suatu logam cair adalah ukuran panjang berupa cm atau inchi.^[49]

Suatu aliran logam cair dapat berhenti mengalir akibat terjadinya proses solidifikasi dendrit yang tebal pada bagian ujung aliran sehingga menghambat aliran logam cair di belakangnya. Oleh sebab itu, maka teori fluiditas dapat dijelaskan oleh karakteristik solidifikasi dari logam itu sendiri.^[50]

Paduan dengan *range* pembekuan panjang memiliki fluiditas yang buruk, sementara paduan dengan *range* pembekuan pendek seperti paduan eutektik, memiliki fluiditas yang baik.^[50]

- Range pembekuan pendek

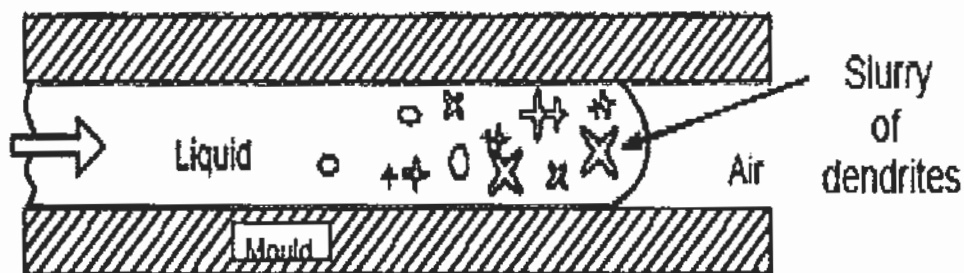
Pada aliran logam paduan dengan *range* pembekuan pendek (Gambar 2.26) solidifikasi dimulai dari bagian dinding menuju ke tengah logam cair. Bagian ini akan mengalami *remelting* secara terus-menerus hingga bagian yang membeku pada kedua sisi bertemu. Saat kondisi ini tercapai aliran berhenti.^[50]



Gambar 2.26. Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi pada paduan dengan *range* pembekuan pendek.^[50]

- Range pembekuan panjang

Mekanisme solidifikasi aliran pada paduan dengan *range* pembekuan panjang (Gambar 2.27) 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.^[50] Serpihan-serpihan dendrit (*slurry of dendrites*) ini yang menghalangi laju aliran dan akhirnya berhenti.



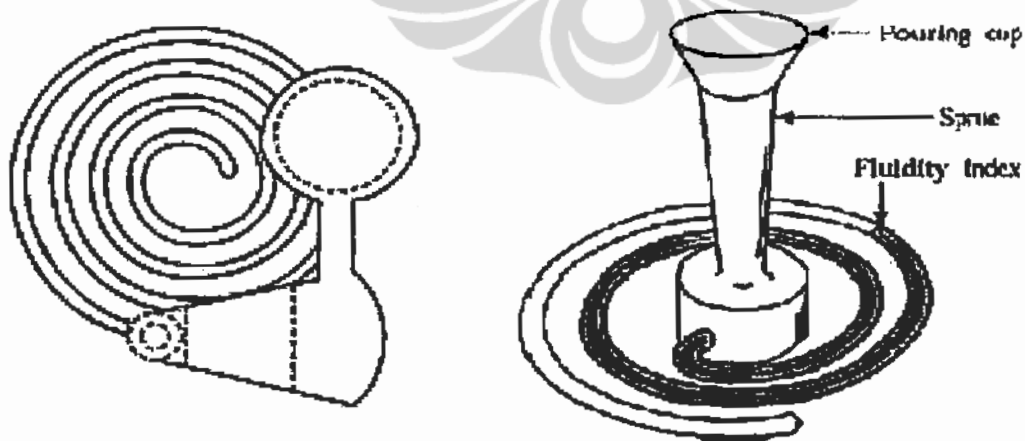
Gambar 2.27. Mekanisme berhentinya aliran logam cair akibat solidifikasi pada paduan dengan *range* pembekuan panjang.^[50]

2.6.1. Pengukuran Nilai Fluiditas

Pengujian empiris telah digunakan untuk mengukur *fluiditas*. Hal ini didasarkan pada kondisi yang menyerupai pengecoran logam dan pengukuran *fluiditas* didefinisikan sebagai total jarak yang dilalui cairan logam dalam sistem saluran tertutup. Pengujian yang paling umum digunakan untuk mengetahui sifat fluiditas paduan aluminium tuang adalah alat uji fluiditas cetakan spiral dan uji fluiditas vakum.^[50]

2.6.1.1. Uji Fluiditas Cetakan Spiral (*Spiral Test*)

Pengujian dengan menggunakan cetakan spiral merupakan jenis pengujian fluiditas yang paling lama digunakan. Pengujian fluiditas dengan cetakan spiral ini dilakukan dengan cara menuangkan logam cair ke alat uji fluiditas kemudian setelah logam membeku, panjang sampel yang berbentuk spiral (yang menyerupai bentuk cetaknya) diukur dengan menggunakan tali kabel kemudian panjang tali kabel diukur dengan penggaris. Semakin panjang spiral yang diperoleh maka nilai fluiditas semakin baik, dan sebaliknya jika spiral yang diperoleh pendek. Salah satu metode dari uji fluiditas cetakan spiral ini dapat dilihat pada Gambar 2.28.^[50]

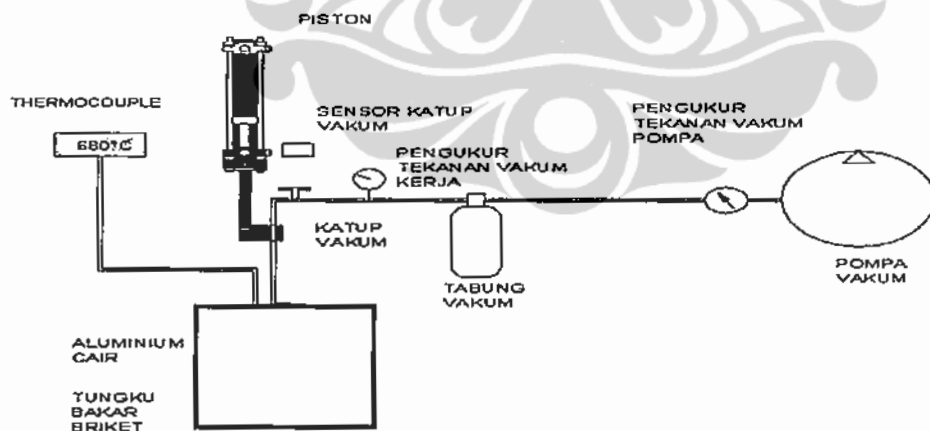


Gambar 2.28. Metode pengujian fluiditas menggunakan cetakan spiral.^[50]

Uji fluiditas cetakan spiral masih memiliki kelemahan yaitu masalah dalam memperoleh standar kondisi aliran logam cair yang sesungguhnya. Namun, masalah ini telah diatasi melalui berbagai disain sistem aliran untuk mengatur tekanan alir dan peralatan penuangan dengan kecepatan konstan untuk memastikan bahwa logam cair yang dituangkan memiliki kecepatan seragam.

2.6.1.2. Uji Fluiditas Vakum (*Vacuum Fluidity Test*)

Untuk mengatasi proses penuangan dalam hal ini kecepatan yang konstan dan kecepatan tuang yang seragam. Pendekatan terbaik dalam memenuhi standardisasi dipenuhi oleh pengujian fluiditas vakum (*vacuum fluidity test*). Dalam alat ini logam mengalir melalui sebuah saluran yang dapat terbuat dari tembaga, *stainless steel*, atau *pyrex* yang didorong oleh tekanan vakum dan tekanan yang digunakan dapat diketahui dan faktor manusia dapat dihilangkan. Teknik ini mendekati ideal dalam mengurangi variabel cetakan, perhatikan Gambar 2.29.

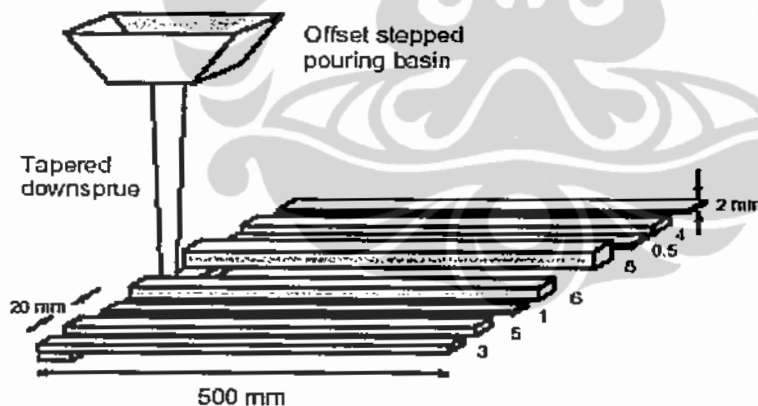


Gambar 2.29. Skema alat uji fluiditas metode vakum (*vacuum suction test*)

2.6.1.3. Fluidity Test Piece

Fluidity test piece merupakan salah satu jenis pengujian fluiditas yang banyak digunakan saat ini yang dikembangkan oleh Universitas Birmingham, UK. Melalui pengujian ini pada temperatur tertentu, data yang didapat tidak hanya panjang fluiditas melainkan juga seberapa tipis ketebalan yang akan dapat dilalui oleh logam cair melalui proses penuangan. Dengan demikian, melalui analisis data yang didapat dari *fluidity test piece* diketahui ketebalan yang mungkin dapat diisi oleh logam cair. Dalam hal ini, semakin tipis ketebalan yang terisi maka nilai fluiditas suatu material semakin baik, perhatikan Gambar 2.30 untuk lebih jelasnya.^[51]

Fluidity test piece ini mengacu pada tegangan permukaan, yang mana setiap material memiliki tekanan permukaan yang berbeda-beda. Tegangan permukaan akan memberikan efek yang cukup besar pada pengisian rongga cetakan yang relatif tipis.



Gambar 2.30 *Fluidity testpiece*, setiap *gate* memiliki ketebalan yang berbeda-beda.^[51]

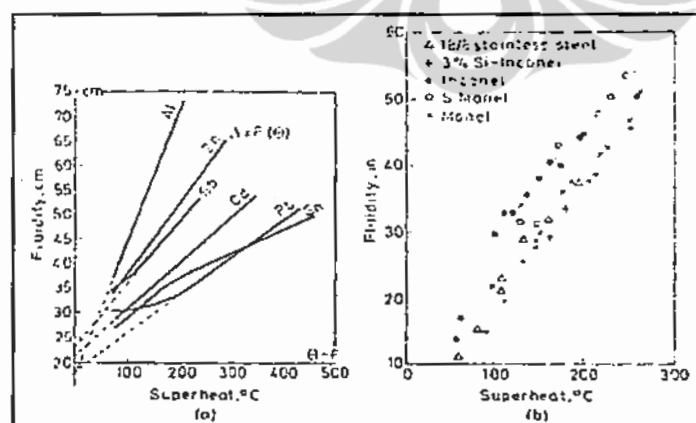
Selain metode pengujian fluiditas di atas, ada beberapa metode lain yang dilakukan oleh para peneliti seperti metode spiral kotak dan *double spiral*

2.6.2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Fluiditas

Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai fluiditas pada dasarnya terdiri dari intrinsik cairan dan kondisi *casting*. Intrinsik cairan terdiri atas viskositas, tegangan permukaan, karakteristik dari permukaan lapisan oksida pada permukaan, kandungan inklusi, dan komposisi material, sedangkan kondisi *casting* terdiri dari faktor cetakan, desain cetakan, karakteristik dari permukaan cetakan, material cetakan, laju penuangan, dan pengukuran fisik dinamika fluida dari sistem. Tetapi diantara faktor itu pengaruh fluiditas pada umumnya dipengaruhi oleh komposisi dan temperatur.^[52]

2.6.2.1. Temperatur (Derajat Superheat)

Temperatur merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi sifat fluiditas. Berdasarkan pada beberapa penelitian yang pernah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sifat fluiditas dari suatu logam maupun paduannya, secara langsung memiliki hubungan dengan temperatur *superheat*. Hal ini diperoleh berdasarkan efek fundamental proses solidifikasi dalam mengendalikan durasi aliran, karena derajat *superheat* menentukan kuantitas panas yang dilepas sebelum proses solidifikasi. Pengaruh temperatur (derajat *superheat*) terhadap fluiditas pada beberapa logam murni dan paduan diperlihatkan oleh Gambar 2.31.^[52]



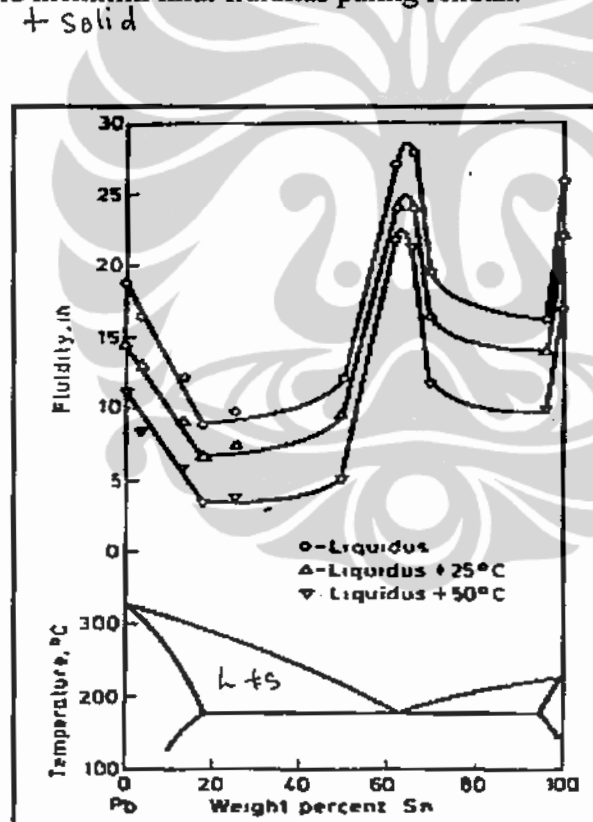
Gambar 2.31. Pengaruh derajat *superheat* terhadap nilai fluiditas: (a) logam murni; (b) logam paduan^[52]

Universitas Indonesia

2.6.2.2. Komposisi

Faktor utama yang mempengaruhi fluiditas logam cair selain temperatur adalah komposisi. Fluiditas tinggi biasanya ditemukan pada logam murni dan paduan di titik eutektik, sedangkan untuk *solid solution* terutama yang memiliki kemampuan membeku terlalu lama (fasa yang ada *liquid*-nya) mempunyai nilai fluiditas rendah.^[52]

Gambar 2.32 memperlihatkan hubungan antara komposisi dan fluiditas paduan Pb dan Sn. Terlihat pada gambar tersebut bahwa titik eutektik memiliki fluiditas yang paling tinggi, diikuti dengan fasa tunggal, sedangkan fasa yang mengandung liquid memiliki nilai fluiditas paling rendah.^[52]



Gambar 2.32. Hubungan antara komposisi dan fluiditas paduan Pb-Sn^[52]

2.6.2.3. Inklusi

Disamping komposisi dasar paduan, karakteristik komposisi lain juga mempengaruhi sifat mampu alir atau fluiditas, yaitu inklusi pada logam cair. Inklusi tersebut, yang berada dalam bentuk partikel tersuspensi tidak larut (*suspended insoluble nonmetallic particle*), yang mana akan menurunkan fluiditas aluminium cair secara signifikan. Ada beberapa macam bentuk inklusi^[53] yang mungkin terdapat pada paduan aluminium cair yaitu: oksida (Al_2O_3 , MgO), *spinels* (Mg_2AlO_4), *borides* (TiB_2 , VB_2 , ZrB_2), karbida (Al_3C_4 , TiC), intermetalik (MnAl_3 , FeAl_3), dan inklusi dari refraktori (oksida dan/atau karbida besi, silikon, aluminium). Diantara inklusi itu inklusi oksida yang paling memungkinkan terjadi. Inklusi oksida terjadi akibat lapisan oksida yang masih berada dalam keadaan padat ketika tergabung didalam fasa logam cair dan menghambat aliran logam cair. Membersihkan lapisan oksida biasa melalui proses filtrasi.

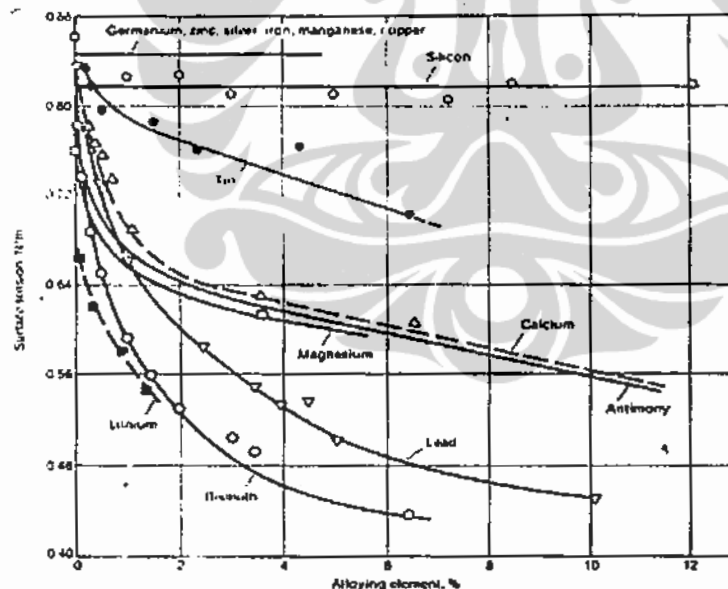
2.6.2.4. Viskositas

Viskositas merupakan sebuah ukuran dari kekentalan suatu fluida. Penambahan unsur paduan dapat mempengaruhi fluiditas aluminium cair. Nilai viskositas atau kekentalan merupakan sesuatu yang saling bertolak belakang dengan fluiditas. Nilai viskositas yang tinggi, menunjukkan bahwa cairan semakin kental dan menuju ke arah fasa padat dan sebaliknya, nilai viskositas rendah berarti logam cair tersebut semakin encer dan menuju ke arah fasa cair. Fenomena ini muncul dikarenakan pada fasa padat atom-atom logam akan membentuk ikatan yang semakin stabil karena vibrasi atom yang semakin berkurang berkaitan dengan penurunan temperatur pada logam. Sedangkan pada temperatur tinggi ikatan atom dari logam tersebut menjadi semakin lemah, sehingga akan memudahkan atom-atom dalam logam cair tersebut untuk bergerak. Kemudahan pergerakan atom-atom ini akan mengakibatkan penurunan nilai viskositas, sedangkan nilai fluiditas justru semakin meningkat.^[52]

Universitas Indonesia

2.6.2.5. Tegangan Permukaan Logam Cair

Setiap material yang berada dalam keadaan cair secara alamiah akan memiliki gaya yang bekerja pada permukaannya. Gaya ini yang kemudian dinamakan sebagai gaya tegangan permukaan logam cair.^[34] Tegangan permukaan akan memberikan efek yang cukup besar pada pengisian rongga cetakan yang relatif tipis. Karena pada desain rongga cetakan yang tipis, mengakibatkan fluiditas logam cair akan berkurang dengan adanya tegangan permukaan. Tegangan permukaan menjadikan logam cair cenderung akan mempertahankan keadaannya, atau menjadi rigid (kaku). Dalam paduan aluminium, tegangan permukaan sangat dipengaruhi oleh lapisan oksida. Lapisan oksida pada aluminium murni, dapat menaikkan tegangan permukaan hingga tiga kali lipat.



Gambar 2.33 Pengaruh berbagai macam unsur terhadap tegangan permukaan 99,99% Al dalam lingkungan argon pada temperatur 700 sampai 740°C.^[34]

Penambahan unsur paduan pada aluminium dapat mengurangi, menambah, atau tidak memiliki pengaruh yang jelas pada pengujian tegangan

Universitas Indonesia

permukaan yang dilakukan. Gambar 2.33 memperlihatkan per-
macam unsur terhadap tegangan permukaan 99,99% Al. Gambar ini, yang
diperoleh dengan metode kapilaritas pada 700°C sampai 740°C dalam lingkungan
argon, menunjukkan bahwa bismut, kalsium, litium, magnesium, timbal, antimon,
dan timah mengurangi tegangan permukaan 99,99% Al; sedangkan perak,
tembaga, besi, germanium, mangan, silikon, dan seng memiliki efek yang
kecil.^[34]

→ Adanya Fe mempercepat terbentuknya dendrit?
↳ memperbanyak β -Al-Fe-Si (pelat) / \uparrow

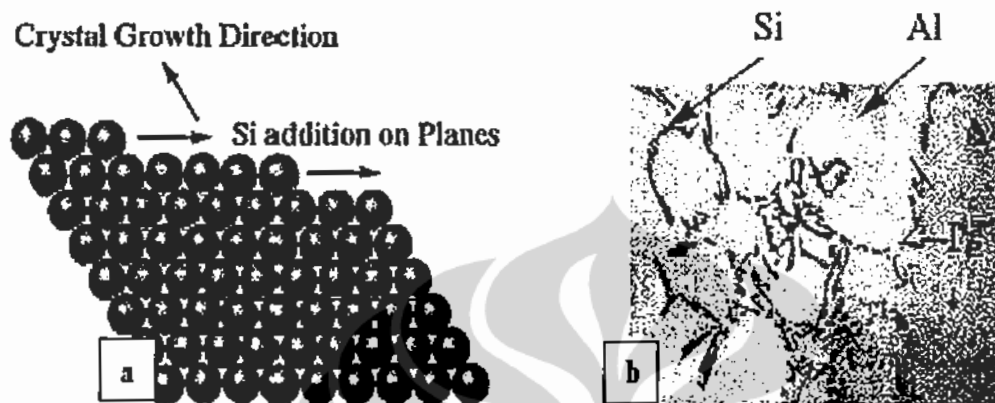
2.7. Pengaruh Penambahan Fe dan Sr Terhadap Pembentukan Fasa Intermetalik dan Nilai Fluiditas Paduan Aluminium Silikon akibatnya viskositas \uparrow

Adanya Fe dalam paduan Al-Si, menyebabkan penurunan sifat mekanis yang cukup merugikan. Tingginya kadar Fe dalam paduan Al-Si menyebabkan terjadinya penurunan fluiditas akibat viskositas paduan yang meningkat. Selain itu, sifat mekanis paduan akan menurun akibat terbentuknya fasa intermetalik Al-Fe-Si yang *brittle*. Sesuai mekanisme, fluiditas menurun akibat dari laju aliran yang terhalangi oleh serpihan-serpihan dendrit yang terdiri dari Al-Fe-Si. Oleh sebab itu, penambahan Sr dengan kadar yang tepat sangat diperlukan untuk memperbaiki sifat mekanis dari paduan aluminium ini. Selain itu, penambahan Sr pada paduan aluminium silikon yang kaya Fe, diharapkan dapat meningkatkan nilai fluiditas (mampu alir) dari paduan ini.

Penambahan *modifier* umumnya digunakan pada paduan tuang Al-Si untuk memodifikasi morfologi eutektik silikon dari bentuk serpihan (*flake*) dan kasar (*coarse*) menjadi serat halus (*fine fibrous*) dan juga merubah morfologi intermetalik. Mekanisme perubahan morfologi silikon tersebut dapat dijelaskan dengan teori di mana atom stronsium yang bergabung ke dalam struktur kristal dari silikon dapat menghambat pembentukan dari pertumbuhan bidang kembar (*twins plane*) dari silikon dan memutarnya menjadi bentuk serat (*fibrous*).^[30] Silikon yang tidak termodifikasi akan tampak seperti pelat dengan ujung yang

Universitas Indonesia

tajam, *angular feature* yang disebut *acicular* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.34.^[54]

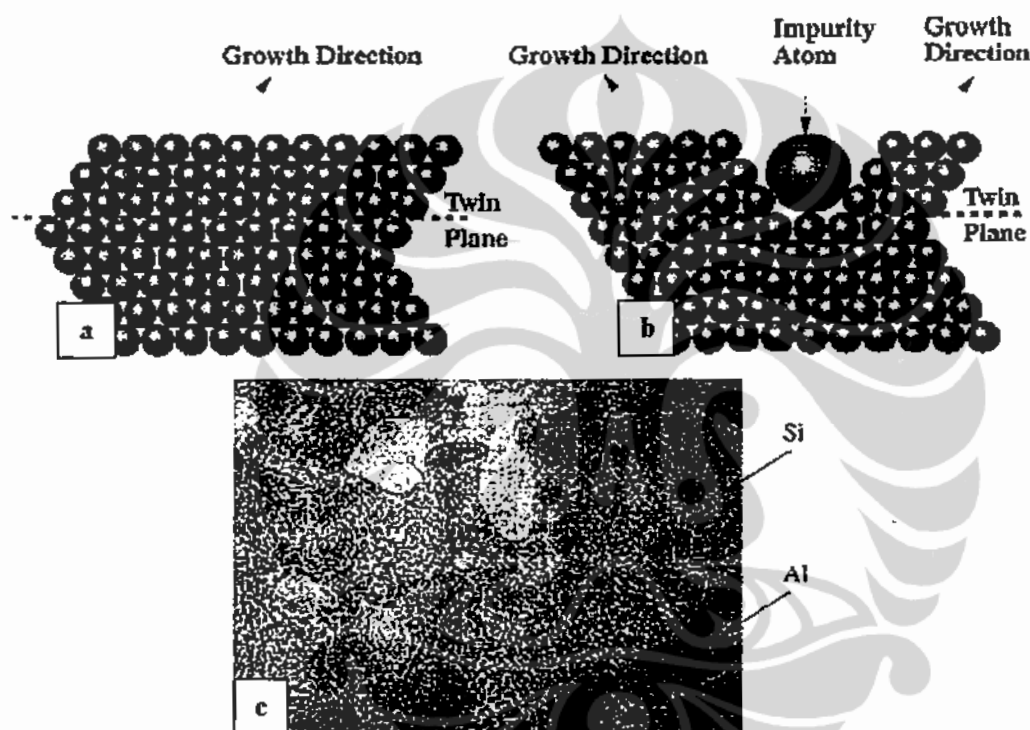


Gambar 2.34 (a) Model Pertumbuhan silikon, (b) *Acicular* silikon^[54]

Pembentukan *twin* secara natural biasanya terjadi hanya dalam jumlah yang kecil sehingga pengaruhnya pada struktur kristalin juga kecil. Pada Gambar 2.35 diperlihatkan (a) natural twin dan (b) *impurity induced twin*, dan (c) *fibrous structure modified silicon (Al-Si)*.^[54] Dapat dilihat bahwa pada Gambar 2.35(a) dan (b), *twinning* disebabkan karena adanya pengotor (*impurity-induced twinning*) yang akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap arah pertumbuhan kristal silikon dimana adanya endapan pengotor yang berulang pada bidang pertumbuhan kristal silikon menyebabkan percabangan kristal silikon secara terus menerus. Hal ini menghasilkan mikrostruktur silikon yang *fibrous* (Gambar 2.35(c)). Pengotor yang dimaksud adalah *modifier* yang ditambahkan pada paduan.

Paduan dengan struktur silikon bulat dan halus umumnya akan mengakibatkan cairan aluminium lebih mudah mengalir dibandingkan dengan cairan aluminium dengan struktur silikon serpihan dan kasar (*coarse silicon*). Pada fasa intermetalik Al-Fe-Si, penambahan Sr diharapkan dapat memperpendek

panjang jarum β -Al₅FeSi dan mengubah fasa β tersebut menjadi α -Al₈Fe₂Si yang sifat mekanisnya lebih baik.^[17] Penambahan elemen penetral (*neutralizing elements*), seperti Mn, Cr, dan Be dengan kadar yang tepat dapat mengubah fasa *monoclinic* β menjadi *cubic* α . Morfologi atau jenis intermetalik mempengaruhi sifat mampu cor dan fluiditas paduan.

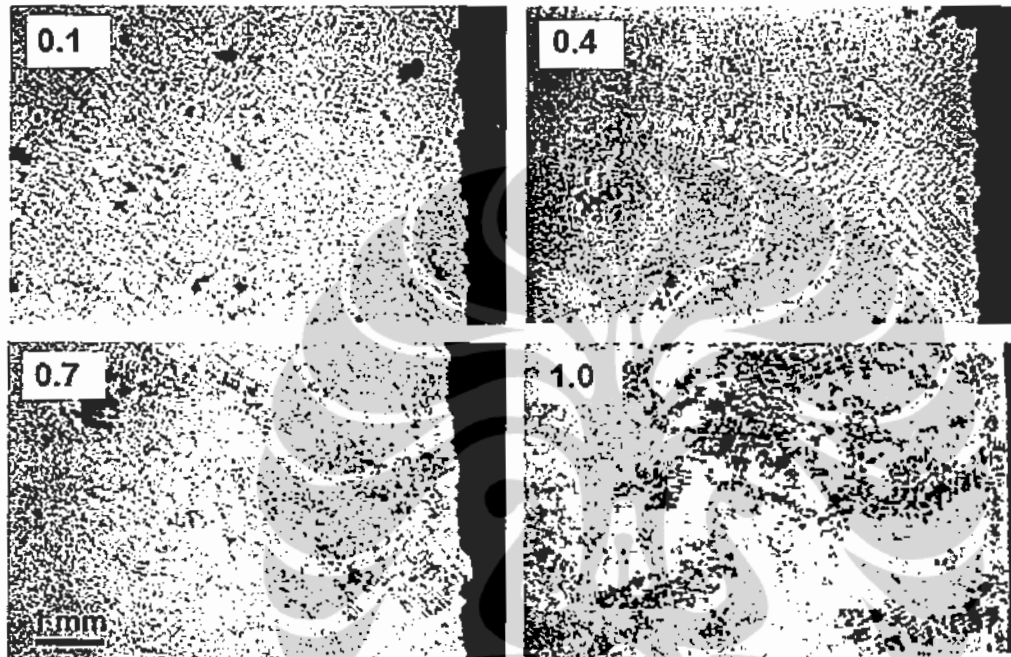


Gambar 2.35 (a) Model *natural twin*, (b) Model *impurity induced twin*, (c) *Fibrous structure modified silicon (Al-Si) 500X* ^[54]

Adanya unsur besi pada paduan aluminium berpotensi untuk menurunkan kemampuan sifat cor, serta mempunyai kecenderungan untuk membentuk porositas pada kandungan Fe tinggi. Pada Gambar 2.36 diperlihatkan porositas yang terjadi pada paduan Al-5Si-Cu-0,5Mg. Fasa β yang berbentuk pelat akan berperan sebagai lokasi nukleasi yang kuat untuk Al-Si eutektik. Dengan meningkatnya kadar Fe maka akan merusak tempat nukleasi dari Al-Si eutektik,

Universitas Indonesia

sehingga Al-Si eutektik yang terbentuk akan semakin lebih besar bersamaan dengan fasa β berbentuk pelat yang lebih besar yang mana fasa ini muncul untuk mengurangi permeabilitas dan *feeding* sehingga meningkatkan *shrinkage porosity*; untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 2.37.^[40]



Gambar 2.36 Porositas pada daerah *hot spot* pada *cylindrical casting* dari paduan Al-5Si-Cu-0,5Mg.^[40]

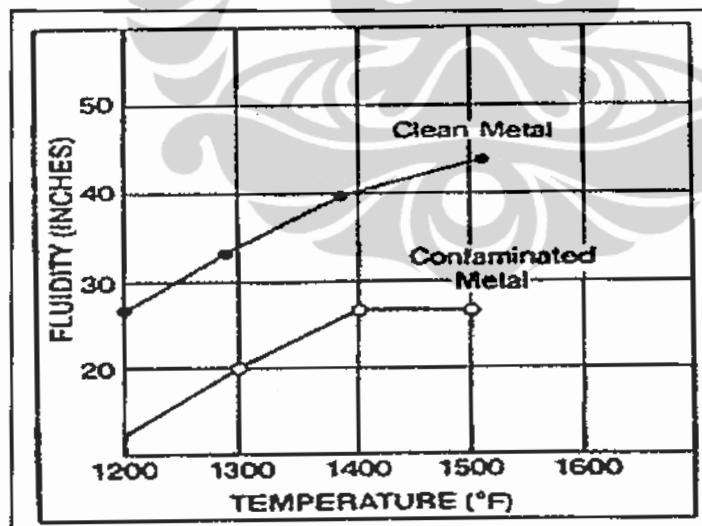
Pada Gambar 2.37 memperlihatkan aliran logam cair pada *channel* pengujian fluiditas. Selama pembekuan, dendrit mulai tumbuh pada ujung lelehan pada saluran aliran dan viskositas logam semakin naik dengan naiknya fraksi padat pada ujung aliran sehingga pada keadaan fraksi solid kritis, aliran lelehan akan berhenti. Naiknya jumlah pengotor atau fasa intermetalik pada lelehan akan menurunkan fraksi solid kritis pada ujung aliran sehingga akan mengurangi *flow time* dan panjang fluiditas. Fluiditas dari cairan logam dipengaruhi baik oleh morfologi maupun jumlah fraksi intermetalik. Morfologi yang berbentuk pelat mempunyai area antarmuka terbanyak dengan cairan logam

Universitas Indonesia

dan merupakan penyebab dari menurunnya fluiditas.^[55] Pada Gambar 2.38 di bawah terlihat bahwa logam yang terkontaminasi banyak pengotor (misalnya Fe) memiliki nilai fluiditas yang rendah. Sedangkan logam yang relatif lebih bersih memiliki nilai fluiditas relatif lebih tinggi. Netralisasi pengaruh buruk intermetalik terhadap paduan akan lebih dijelaskan pada sub bab berikutnya.



Gambar 2.37. Skema aliran logam cair pada *channel* fluiditas. Fraksi *solid* meningkat dengan berjalannya waktu, akumulasi pembekuan dendrit pada ujung aliran logam.^[52]



Gambar 2.38. Kurva perbandingan nilai fluiditas antara aluminium bersih dengan yang mengandung pengotor^[52]

2.8. Netralisasi Pengaruh Buruk Fasa β -AlFeSi

Fasa intermetalik α -AlFeSi dinilai mempunyai karakteristik yang lebih baik daripada fasa β -AlFeSi dari segi sifat mekanis dan sifat mampu cor. Netralisasi ini tujuan untuk mengurangi pengaruh yang berbahaya dari fasa intermetalik yang mempunyai pengaruh merusak yaitu diantaranya dengan cara :

- a. Penambahan *modifier* stronsium
- b. Penambahan *grain refiner*
- c. Pendinginan cepat (*rapid solidification*)
- d. Penambahan elemen paduan netralisasi
- e. *Non-equilibrium Heat Treatment*

2.8.1. Penambahan Stronsium

Stronsium merupakan elemen yang paling luas penggunaannya di dalam paduan aluminium-silikon. Stronsium umumnya digunakan untuk memodifikasi silikon eutektik menjadi lebih bulat. Pada paduan aluminium-silikon yang mengandung Fe, penambahan 30 ppm Sr akan meningkatkan pembentukan fasa α -AlFeSi selama pengecoran dimana struktur intermetaliknya lebih kasar daripada struktur yang dihasilkan oleh fasa β -AlFeSi yang seperti jarum. Selama pengecoran, stronsium akan membuat *interface layer* pada permukaan α -AlFeSi, sehingga mencegah Si terserap dan tumbuh pada interface layer α -AlFeSi. Pencegahan kelarutan dari Si kedalam fasa α -AlFeSi akan mencegah pembentukan fasa β -AlFeSi.

Stronsium meningkatkan *spheroidization rate* dan menurunkan *coarsening rate* dari partikel silikon eutektik. Samuel^[56] telah mempelajari pengaruh stronsium terhadap pembentukan fasa β pada paduan 319. Menurutnya, penambahan 300 ppm stronsium dapat meningkatkan pemecahan dan pembubaran fasa β -AlFeSi dan pembentukan fasa intermetalik Al_2Cu *blocky* selama proses solidifikasi. Pada paduan yang dimodifikasi Sr, pemecahan fasa β -AlFeSi diikuti dengan peningkatan *yield strength* pada paduan. Pada paduan 413, penambahan

Universitas Indonesia

stronsium juga dapat mengakibatkan pemecahan fasa β -Al₅FeSi dan meningkatkan jumlah dari fasa α -AlFeSi.

Kulunk dan Zuliani^[57] juga mempelajari pengaruh stronsium pada paduan 380 *high-pressure die-casting*. Hasil penelitian menunjukkan hasil bahwa reduksi ukuran dan jumlah fasa intermetalik Fe dapat dilakukan dengan melakukan penambahan stronsium, sehingga toleransi untuk tingginya kadar Fe yang terlarut dalam paduan dapat ditingkatkan tanpa merubah sifat mekanis paduan tersebut. Hal ini ditemukan pada penambahan 0,04-0,06% Sr kepada paduan A413, A413P, dan A413 yang memodifikasi ukuran fasa intermetalik dan meningkatkan transformasi dari fasa β -AlFeSi menjadi fasa α -Al₈Fe₂Si^[25]. Fat-halla menerangkan bahwa dengan penambahan 0,02% stronsium pada paduan tipe Al-13% Si dapat meningkatkan % elongasi dan nilai *ultimate tensile strength* tanpa merubah *yield strength* secara signifikan.

Farhadi Gholamali^[35] meneliti mengenai pengaruh stronsium pada paduan *wrought* 6201 dan 6063. Penambahan 0,015% Sr dapat meningkatkan transformasi fasa intermetalik yang ditemukan pada paduan ini, dari bentuk seperti *plate* fasa β -Al₅FeSi menjadi berbentuk *chinese script* fasa α -Al₈Fe₂Si. Hasil penelitiannya juga menyebutkan bahwa dengan penambahan stronsium pada paduan Al-Mg-Si menjadikannya *superior surface quality*. Modifikasi dengan stronsium menghasilkan jarak antar lengan α -AlFeSi menjadi *ultra fine* pada paduan *direct chilled* (DC). Stronsium memodifikasi banyak senyawa kompleks intermetalik pada bermacam-macam paduan sistem *wrought*. Pada paduan seri A7000, stronsium memperhalus fasa intermetalik, sedangkan penambahan stronsium dan seng menurunkan jumlah fasa intermetalik paduan seri A5000.

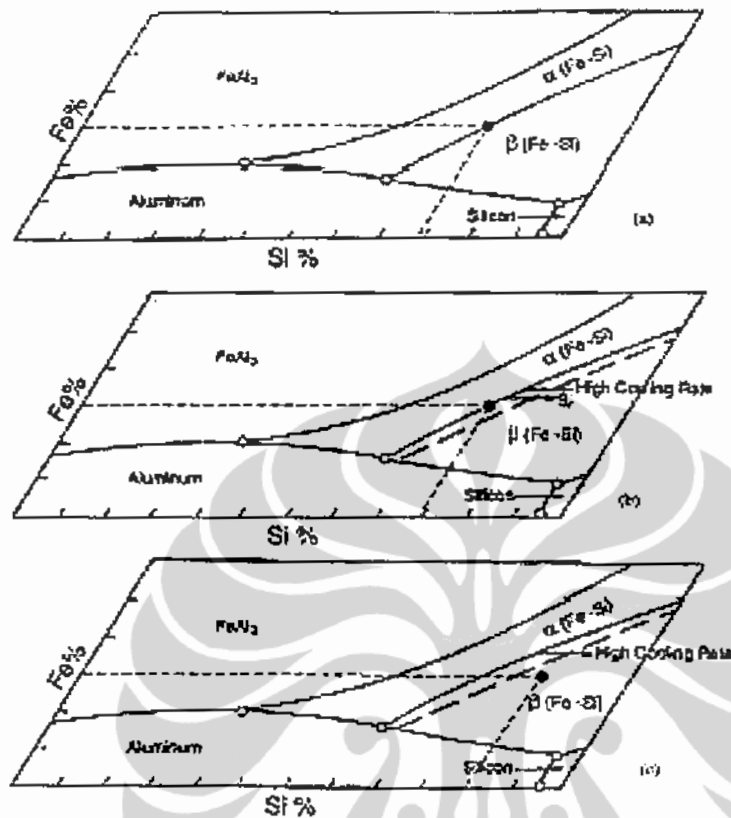
F.Paray^[58] telah meneliti tentang pengaruh stronsium pada paduan A6061. Penambahan 150-300 ppm stronsium pada paduan A6061 menghasilkan pembentukan fasa α -Al₈Fe₂Si dari pada fasa β -Al₅FeSi saat proses pembekuan *billet*. Paray juga menunjukkan bahwa dengan keberadaan 180 ppm stronsium dapat meningkatkan *surface finishing* paduan ini.

Universitas Indonesia

B.Closset^[59] menunjukkan bahwa pembentukan fasa α -Al₈Fe₂Si ditingkatkan dengan keberadaan stronsium, dan stronsium memiliki pengaruh positif pada *tensile strength* dan *electrical resistivity* pada paduan aluminium *electrical conductor* komersial A6201 yang mengandung 0,6% magnesium dan 0,6% silikon.

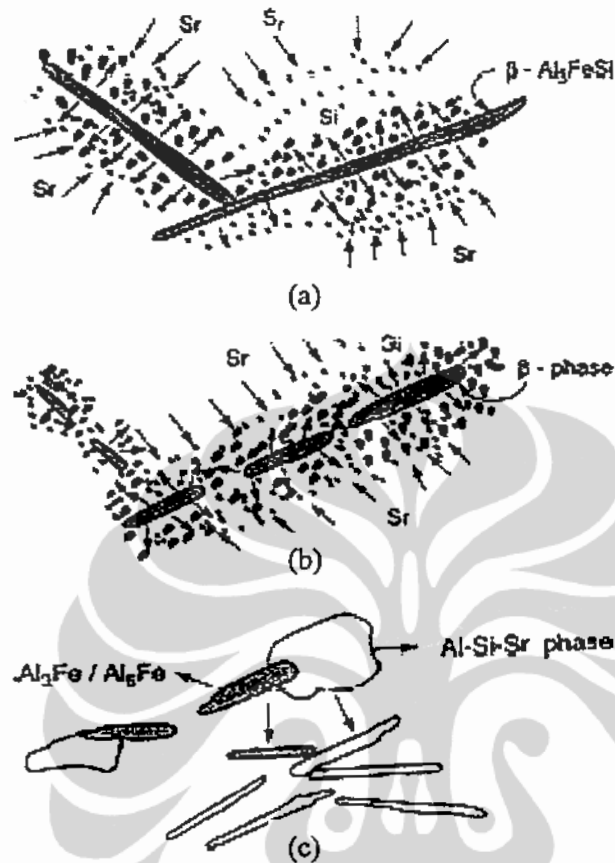
M.H.Mulazimoglu dkk.^[33] melaporkan bahwa modifikasi stronsium pada fasa intermetalik di paduan A6061 dan A5182. Penemuannya mengindikasikan bahwa stronsium merubah fasa β -Al₅FeSi yang berbentuk *plate* menjadi fasa α -Al₈Fe₂Si yang berbentuk *chinese script* pada paduan A6061. Berkenaan dengan pengaruh stronsium terhadap penstabilan fasa α -Al₈Fe₂Si, Mulazimoglu telah menyatakan bahwa penyerapan stronsium pada permukaan fasa α -Al₈Fe₂Si bertindak sebagai penghalang larutnya silikon kedalam fasa ini. Pada kondisi ini, transport silikon kedalam fasa α -Al₈Fe₂Si untuk membentuk fasa β -Al₅FeSi menjadi terlambat.

Gambar 2.39 memperlihatkan diagram *aluminum-rich corner* fasa Al-Fe-Si, dimana penambahan modifier Sr dan kecepatan pendinginan dapat memperluas area fasa α -AlFeSi. Pada paduan yang tidak dimodifikasi dan pada kecepatan pendinginan yang rendah, konsentrasi Fe dan Si berada pada tingkat kritisnya (titik hitam) untuk membentuk fasa α -AlFeSi di garis border α - β



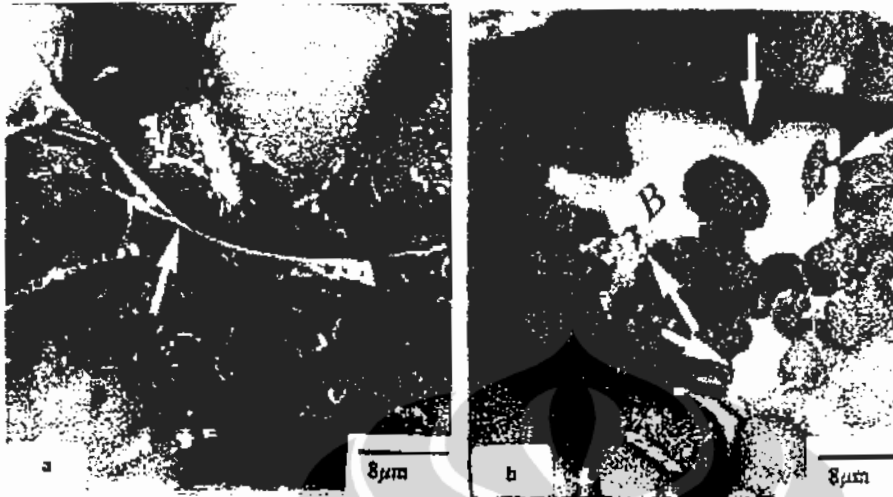
Gambar 2.39 Diagram *aluminum rich corner* fasa Al-Fe-Si yang menjelaskan pengaruh penambahan *modifier* Sr dan kecepatan pendinginan terhadap perluasan area fasa α -AlFeSi^[60]

Pada kondisi ini, dengan peningkatan kadar Sr atau kecepatan pendinginan yang cepat atau keduanya, garis border α - β akan bergeser kearah kanan. Hal ini menjelaskan tentang stabilitas fasa α -AlFeSi karena penambahan modifier Sr. Dengan peningkatan kadar silikon namun masih dalam kadar Fe yang konstan pada paduan, titik hitam akan bergeser jauh kearah area fasa β -AlFeSi. Dengan demikian, struktur mikro paduan yang terbentuk adalah fasa β -AlFeSi. Dalam beberapa kondisi, hanya kecepatan pendinginan yang tinggi yang dapat mempengaruhi terbentuknya fasa α -AlFeSi pada struktur mikro akhir dimana dapat menggeser garis border α - β kearah kanan.^[60]



Gambar 2.40 Skema ilustrasi terdekomposisinya fasa β platelets pada paduan Al- Fe-Si yang dimodifikasi Sr (rasio Fe/Si<1): (a) *under modification*, (b) *full modification*, dan (c) *overmodification*.^[61]

Pengujian *under modification*, *full modification* dan *over modification* telah dilakukan untuk mengindikasikan penambahan Sr yang sedikit, cukup dan berlebih.^[62] Pada gambar 2.40(a) yang ditambahkan sedikit Sr fasa β -Al₃FeSi tidak mengalami perubahan. Pada gambar 2.39(b) yang ditambahkan Sr yang cukup, terjadi fragmentasi fasa β -Al₃FeSi menjadi bagian-bagian yang lebih pendek. Pada gambar 2.40c yang ditambahkan Sr berlebih, terjadi presipitasi intermetalik AlSiSr.



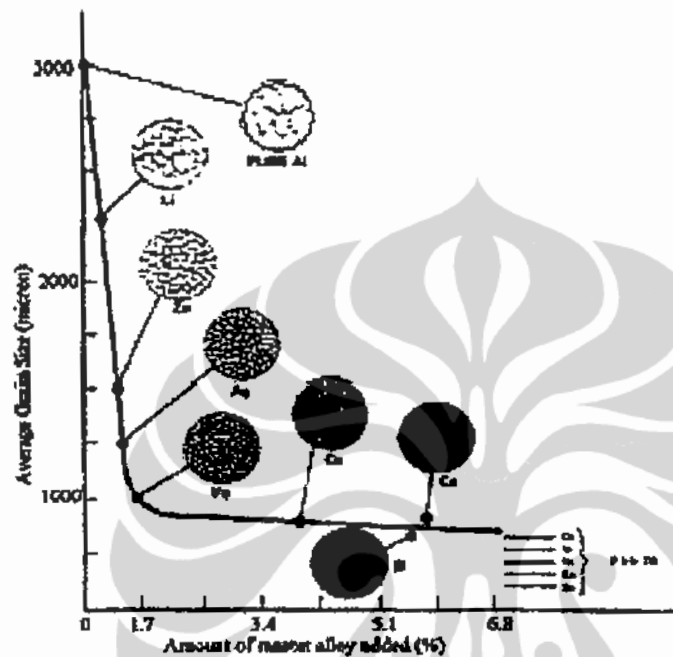
Gambar 2.41 *Scanning Electron Micrograph* morfologi fasa β *platelets* pada paduan Al-7%Si-0,8%Fe (a) tanpa modifikasi Sr dan (b) dengan modifikasi 250 ppm.^[62]

Gambar 2.41 menggambarkan bentuk morfologi fasa β -Al₅FeSi *platelets* pada paduan aluminium dengan 7% Si dan 0,8% Fe yang ditambahkan Sr dan tidak ditambahkan Sr. Dengan ketidakhadiran Sr (gambar 2.41a), fasa β -Al₅FeSi tampak dalam bentuk *platelets solid* seluruhnya, sedangkan dengan kehadiran Sr (gambar 2.41b), *platelets* berbentuk lebih berlubang dari pada *solid platelets*. Hal ini dikarenakan terjadinya penolakan Si dari *platelets*.^[62]

2.8.2. Penambahan *Grain Refiner*

Grain refiner Al-Ti-B pada paduan aluminium-silikon digunakan untuk mengontrol besarnya struktur butir. *Grain refiner* menghasilkan *nucleating site* untuk pembentukan *primary dendrites* dan menghasilkan sejumlah besar butir yang halus, *equiaxed* dan distribusi yang seragam. Pada paduan Al-Si yang mengandung Fe, butir yang halus akan menghasilkan intermetalik yang lebih

kecil dan distribusi yang lebih seragam. Untuk lebih jelasnya, perhatikan Gambar 2.42.



Gambar 2.42 Variasi dari rata-rata ukuran butir pada produk hasil coran dengan konsentrasi titanium dan sebagai fungsi parameter^[63]

Boone dkk.^[63], menggunakan *master alloy* aluminium yang terdiri dari aluminium-titanium-boron (Al-Ti-B) dan aluminium-stronsium (Al-Sr), menyatakan bahwa *grain refinement* dapat meningkatkan *mass feeding characteristics* selama proses pengecoran dan solidifikasi. Ukuran butir yang halus membuat fasa kedua intermetalik menjadi lebih kecil dan lebih seragam distribusinya.

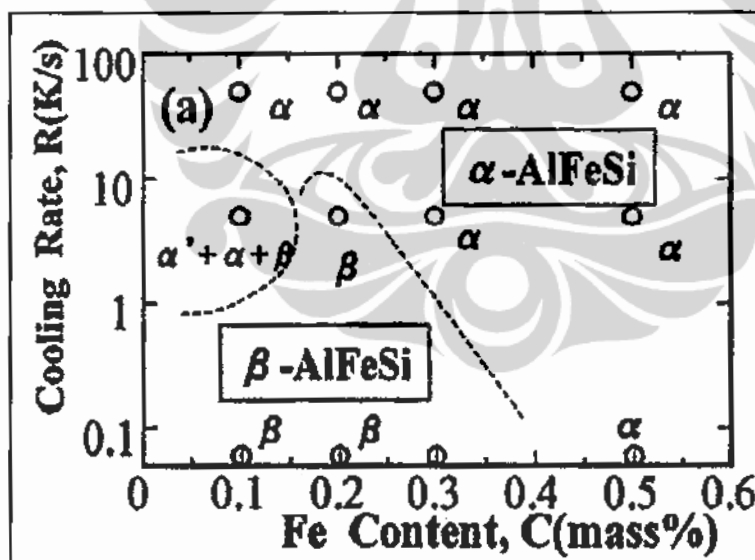
2.8.3. Pembekuan Cepat

Metode pembekuan cepat merupakan proses pembekuan lelehan dari paduan aluminium dengan kecepatan yang sangat tinggi dan akan mempengaruhi hampir seluruh parameter struktur mikronya. Pada kecepatan pembekuan yang

Universitas Indonesia

tinggi akan meningkatkan volume fraksi dari α -AlFeSi dan menurunkan volume fasa intermetalik dari β -AlFeSi seperti pada skema di bawah ini.^[36]

Y.Awano dan Shimizu^[64] berpendapat lain, mereka menyatakan bahwa fasa *chinese script* α -AlFeSi tidak dipengaruhi kecepatan pendinginan, tetapi dengan peningkatan kecepatan pendinginan akan menurunkan fraksi volume dari fasa intermetalik β -AlFeSi. Pada kecepatan pendinginan yang tinggi, fasa intermetalik yang terbentuk relatif lebih kecil dan lebih seragam. Akan tetapi, *rapid solidification* ini tidak mudah untuk dipraktekkan karena sangat tidak mungkin untuk mendapatkan kecepatan pembekuan yang seragam saat logam cair masuk kedalam rongga cetakan yang memiliki bentuk kompleks dan ketebalan yang berbeda-beda. Langsrud dkk.^[65] menyatakan bahwa perubahan fasa-fasa metastabil α dan β merupakan fungsi dari kecepatan pendinginan. Oleh karena itu, semakin banyak partikel silikon (seperti β) akan terbentuk saat kecepatan pendinginan lebih tinggi.

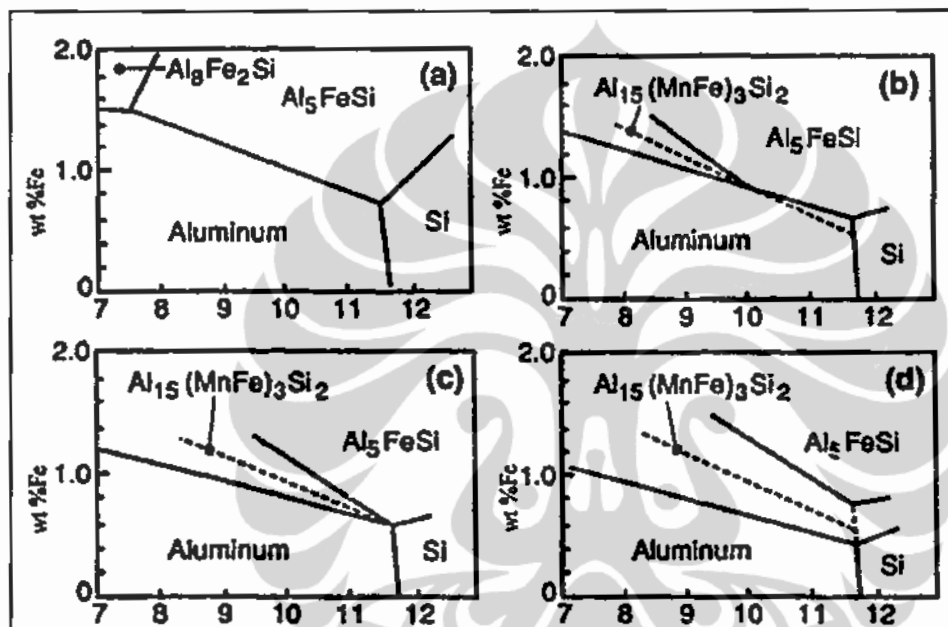


Gambar 2.43 Pengaruh kecepatan Pembekuan terhadap morfologi intermetalik AlFeSi^[65]

2.8.4. Penambahan Elemen Paduan Netralisasi

Mangan adalah paduan yang umum digunakan untuk menetralkan pengaruh dari Fe dan memodifikasi morfologi dari intermetaliknya. Dengan
Universitas Indonesia

meningkatnya kandungan mangan akan memperluas daerah fasa α -AlFeMnSi yang berbentuk chinese script. Sebagai hasil, kristalisasi dari α -AlFeMnSi dapat dimungkinkan dengan kandungan Fe yang tinggi. Morfologi dan komposisi kimia dari α -AlFeMnSi hampir serupa dengan α -AlFeSi yang terbentuk tanpa penambahan dari mangan. Gambar 2.44 memperlihatkan diagram fasa yang disederhanakan dari sistem Al-Fe-Si pada kandungan Mn yang bervariasi.^[66]



Gambar 2.44 Diagram fasa yang disederhanakan dari sistem Al-Fe-Si pada kandungan Mn a) 0% , b) 0,1% , c) 0,2% , dan d) 0,3%^[66]

Ketika rasio Mn:Fe adalah 1:2, unsur mangan dapat mematahkan jarum-jarum panjang fasa intermetalik β -AlFeSi, sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik dan *castability* dari paduan. Komiyama^[66] menyatakan bahwa kadar Mn memiliki pengaruh kuat kepada kekuatan tarik paduan hanya pada saat kadar Fe lebih dari satu persen. Narayan dan Samuel^[67] menemukan bahwa saat kecepatan pendinginan yang rendah, morfologi dari intermetalik Fe berubah menjadi tipe *script* dengan penambahan Mn, namun sebaliknya saat kecepatan pendinginan yang cepat, kedua fasa α dan β terkristalisasi.

Universitas Indonesia

2.8.5. Non-equilibrium Heat Treatment

Perlakuan ini dapat menghasilkan pelarutan sebagian dari fasa intermetalik β -AlFeSi yang berbahaya pada matriks paduan Al-Si. Pelarutan dari fasa intermetalik ini dapat meningkatkan temperatur larutan.

Gringer^[68] menemukan bahwa fasa α -AlFeSi yang terbentuk pada paduan 1XXX bertransformasi menjadi fasa Al_3Fe selama *heat treatment* pada temperatur antara 450-575°C untuk waktu yang dipanjangkan. Narayan dan Samuel^[67] mempelajari pengaruh dari temperatur larutan dan waktu terhadap perilaku pelarutan intermetalik Fe pada paduan aluminium dengan 6% Si-3,5% Cu-0,3% Mg-1% Fe, dan menemukan bahwa dengan meningkatnya temperatur pada larutan, maka fasa β -AlFeSi akan terlarut, sebaliknya fasa α -AlFeSi tidak mengalami pelarutan.

John Gruzleski dan Bernard^[69] melaporkan bahwa *heat treatment* pada paduan Al-Si yang mengandung Fe dapat mempercepat pelarutan dari fasa β - Al_5FeSi . Panjang jarum-jarum dari fasa β - Al_5FeSi menjadi minimal setelah 30 jam untuk paduan yang tidak dimodifikasi dan hanya 10 jam untuk paduan yang dimodifikasi. Pelarutan fasa β - Al_5FeSi terjadi dengan terdekomposisinya fasa β - Al_5FeSi menjadi Al_6Fe dan Si. Mekanisme pelarutan fasa β - Al_5FeSi adalah dengan penolakan Fe dan Si pada ujung-ujung (daripada sisi-sisi) jarum fasa β - Al_5FeSi , yang dapat menurunkan panjang jarum fasa β - Al_5FeSi daripada ketebalannya.

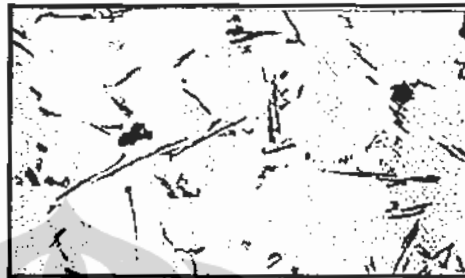
2.9. Pengaruh Modifikasi Pada Mikro Struktur

Perubahan mikrostruktur akibat penambahan *modifier* dapat bervariasi dari bentuk *acicular* hingga *fibrous* silikon, bahkan dengan penambahan sodium ataupun strontium yang tidak tepat akan didapatkan struktur campuran (*fibrous* silikon, *lamellar* silikon, dan *acicular* silikon). Modifikasi dengan menggunakan

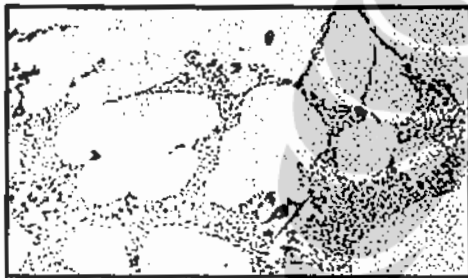
strontium menghasilkan struktur mikro yang kurang *uniform* dibandingkan dengan penambahan natrium telah dijelaskan oleh Ned Tenekedjiev dkk^[70]



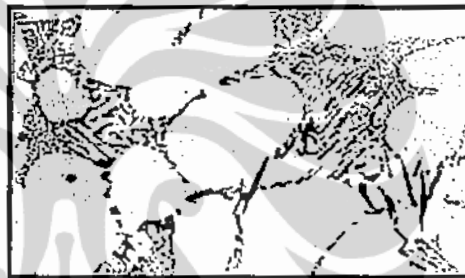
Class 1. Fully unmodified



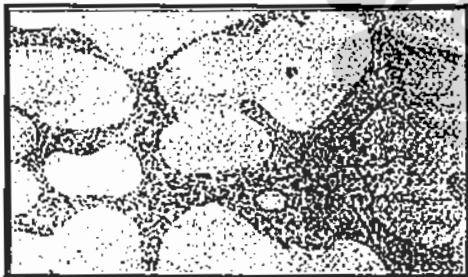
Class 2. Lamellar



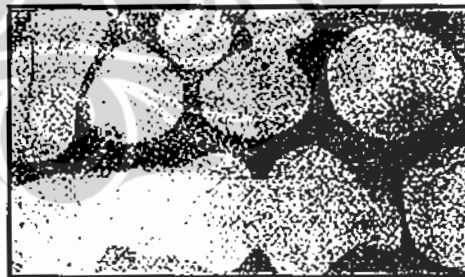
Class 3. Partially modified



Class 4. Absence of lamellar



Class 5. Fibrous silicon eutectic



Class 6. Very fine structure

Gambar 2.45. Sistem kelas pada mikrostruktur modifikasi^[71]

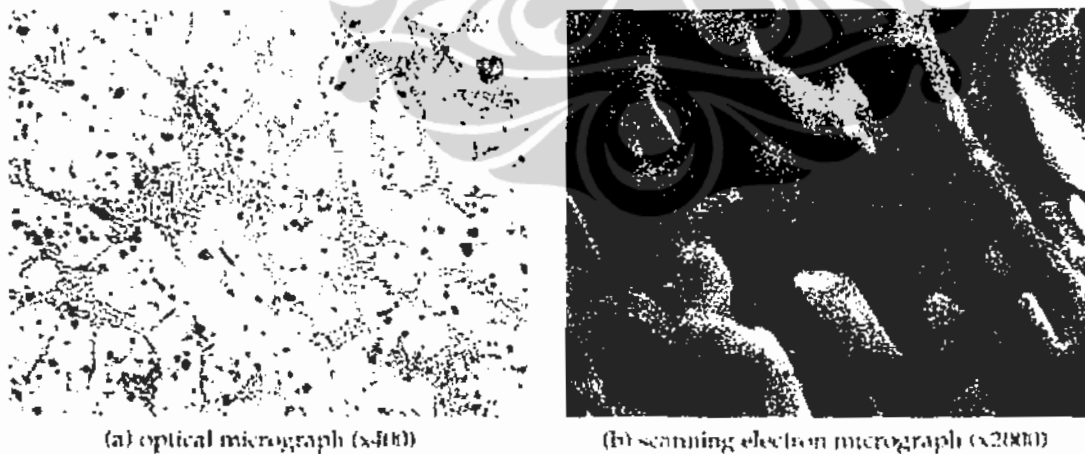
Struktur mikro yang mungkin terjadi pada modifikasi paduan hipoeutektik diperlihatkan pada Gambar 2.45. Struktur ini dibagi menjadi 6 kelas, dimana kelas 5 merupakan kelas dengan struktur modifikasi yang paling baik, *undermodified*

Universitas Indonesia

masuk kedalam kelas 2-4, struktur lamellar terjadi pada kelas 2. Pembentukan struktur yang sangat halus (*supermodified*) terjadi pada kelas 6. Kebanyakan struktur yang terbentuk setelah pengecoran adalah kelas 1-5.^[71]

2.9.1. Overmodifikasi (Modifikasi Berlebihan)

Dua fenomena yang berbeda terjadi pada overmodifikasi stronsium. Salah satunya adalah pengkasaran partikel silikon dan perubahan bentuk dari silikon bulat yang halus ke bentuk jarum yang saling berhubungan. Gambar 2.46 memperlihatkan foto mikro dari paduan 356 dengan kadar stronsium 0,09%. Hal lain yang terjadi ketika overmodifikasi strontium adalah kehadiran strontium yang mengandung fasa intermetalik pada mikrostruktur, seperti partikel Al_4SrSi_2 . Terkait dengan nilai fluiditasnya, overmodifikasi Sr akan menurunkan nilai mampu alir karena terjadi perubahan mikrostruktur yaitu struktur silikon dan fasa intermetalik. Untuk itu perlu diperhatikan penambahan unsur modifikasi yang tepat baik dari jenis *modifier* dan kadar penambahannya.



Gambar 2.46 Silikon kasar akibat overmodifikasi pada paduan A356^[70]

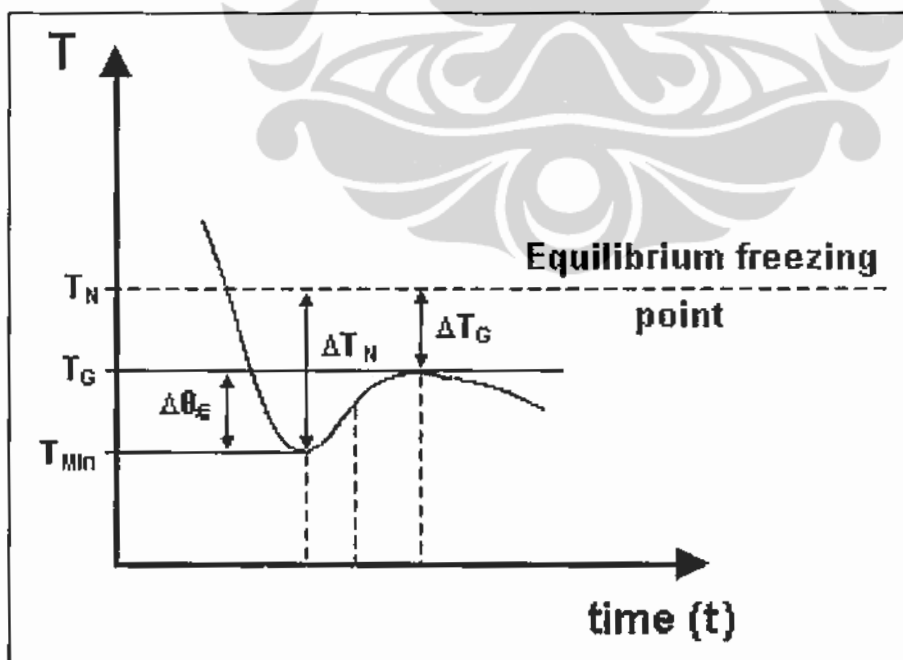
2.9.2. Teori Modifikasi dan Korelasinya dengan Fluiditas

Pengaruh modifikasi terhadap fluiditas sampai saat ini belum mencapai kesepakatan yang jelas. Namun beberapa teori dapat dijadikan landasan berpikir dalam menerangkan terjadinya mekanisme tersebut, yaitu:^[70]

2.9.2.1. Teori Undercooling

Seperti kita ketahui bahwa untuk mencapai nukleasi yang stabil atau mendapatkan struktur kristal yang teratur, cairan logam harus menurunkan temperatur dibawah titik kesetimbangan pembekuan (*equilibrium freezing point*) sebelum proses solidifikasi dimulai. Proses ini yang dinamakan dengan proses *undercooling* dan diilustrasikan pada Gambar 2.47. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan inti (*nucleus*) yang cukup untuk proses pembekuan. Besarnya nilai *undercooling* yang digunakan umumnya berkisar antara 2°C - 10°C .

Berikut ini merupakan skematis kurva pendinginan (*cooling curves*) yang menggambarkan *thermal undercooling* pada logam murni.



Gambar 2.47. Kurva pendinginan pada logam murni^[70]

T_G = Temperatur pertumbuhan dalam keadaan “*steady state*”

T_N = Awal nukleasi. T_N umumnya disebut sebagai “potensi” dari partikel inti terdapat dalam cairan. Titik ini dapat dikenali dengan perubahan kemiringan garis pada kurva.

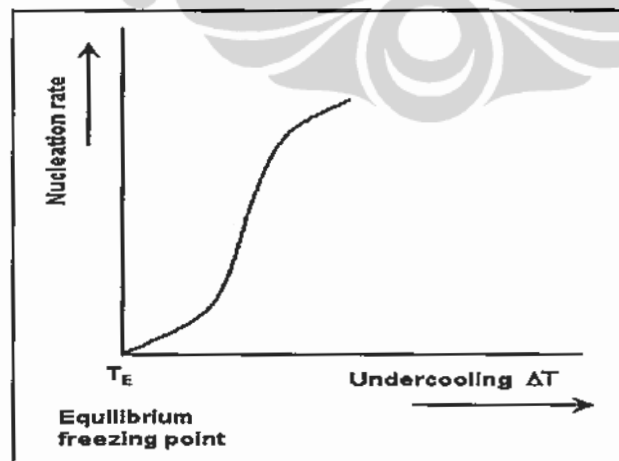
T_{Min} = Pada titik ini inti kristal baru tumbuh menjadi bentuk tertentu dimana kalor laten dibebaskan untuk menyeimbangkan panas yang diambil dari sampel. Setelah kondisi ini cairan menaikkan temperatur hingga temperatur pertumbuhan “*steady state*”.

ΔT_N = *undercooling* yang diperlukan untuk menghasilkan inti yang stabil

$\Delta\theta_e$ = temperatur dimana terjadi pelepasan panas yang diperlukan untuk mencapai temperatur pertumbuhan “*steady state*”

ΔT_G = *undercooling* yang diperlukan untuk mempertahankan tingkat pertumbuhan dari inti.

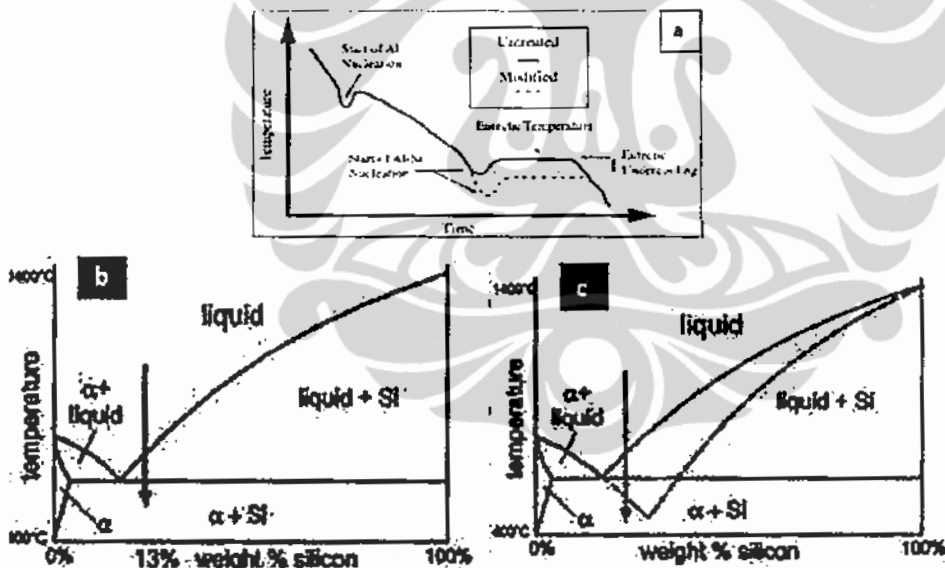
Jumlah temperatur yang diperlukan untuk menghasilkan inti (*nuclei*) yang stabil akan meningkat seiring dengan *heat loss* sehingga terjadi kenaikan jumlah inti. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.48 yang menunjukkan plot antara laju nukleasi (*nucleation rate*) terhadap *undercooling*.



Gambar 2.48. Pengaruh *undercooling* terhadap laju nukleasi sebelum solidifikasi.^[70]

Gambar 2.49 memperlihatkan (a) analisis termal pembekuan paduan Al-13%Si (b) diagram fasa yang belum dimodifikasi, dan (c) adalah diagram fasa yang sudah dimodifikasi.

Pengaruh dari suatu unsur modifier terhadap paduan aluminium juga bisa didasarkan pada teori bahwa apabila *modifier* ditambahkan, misalnya stronsium, maka unsur ini akan teradsorpsi pada *interface solid-liquid* kristal silikon dan mengakibatkan terhambatnya proses nukleasi dan pertumbuhan kristal silikon pada temperatur eutektik normalnya. Keduanya akan berlangsung di bawah kondisi tersebut, dan akibatnya proses *undercooling* akan meningkat, sehingga kecepatan nukleasi kristal silikon akan lebih cepat dari proses pertumbuhannya dan kristal yang dihasilkan akan lebih halus. Pada kondisi ini, *range* pembekuan akan menjadi lebih pendek sehingga fluiditas meningkat.



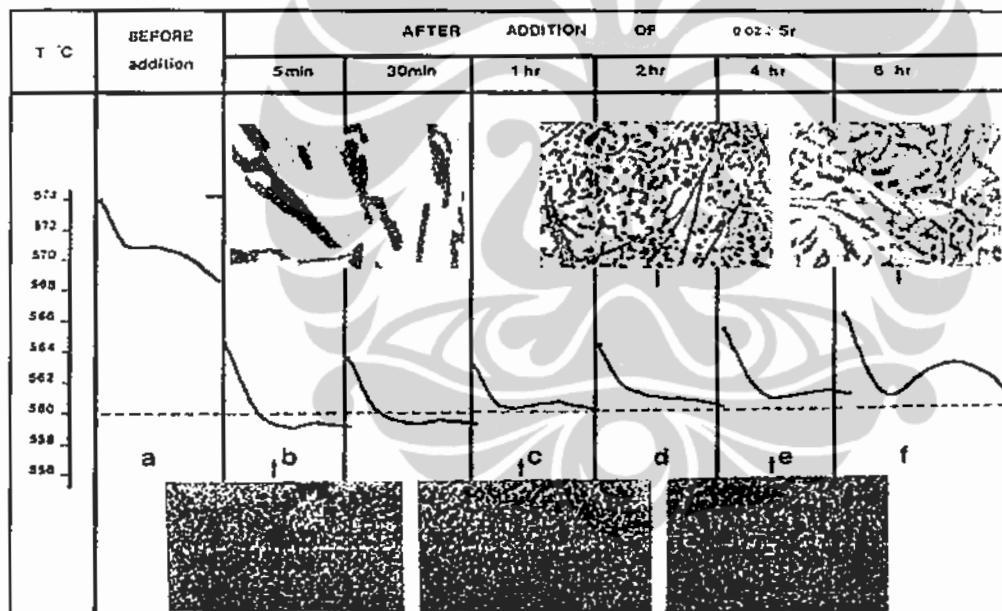
Gambar 2.49 (a) Analisis termal pembekuan paduan Al-13%Si (b) Diagram fasa unmodified, (c) modified^[70]

Gambar 2.50 merupakan contoh kurva pendinginan (*cooling curve*) hasil penambahan *modifier* stronsium (Al-3,5% Sr) pada paduan A356 dengan variasi level Sr pada beberapa eksperimen.^[70]

Universitas Indonesia

Penambahan stronsium juga berpengaruh terhadap temperatur solidifikasi eutektik dan dapat diketahui bahwa :

- Terjadi penurunan temperatur nukleasi dan juga temperatur pertumbuhan sekitar 10°C .
- Temperatur nukleasi mencapai titik minimum setelah $\frac{1}{2}$ hingga 2 jam.
- Saat modifikasi optimal tercapai, kurva eutektik menunjukkan garis horisontal tanpa pelepasan panas.
- Setelah efek modifikasi memudar (efek *fading*), temperatur nukleasi dan pertumbuhan kembali naik.



Gambar 2.50 Kurva pendinginan A356 dengan *modifier* 0,02%Sr; perbesaran 560x
[70]

2.9.2.2. Teori Tegangan Permukaan

Stronsium membentuk lapisan oksida $\text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ pada aluminium cair, dimana lapisan oksida ini tidak bersifat protektif daripada lapisan oksida Al_2O_3 . Dengan keberadaan unsur modifikasi, tegangan permukaan antara silikon dan

aluminium cair menjadi turun. Sehingga dalam proses nukleasi partikel silikon, diperlukan energi permukaan yang lebih besar, dan mengakibatkan proses nukleasi menjadi sulit.

2.9.2.3. Teori Morfologi Silikon

Penambahan *modifier* digunakan pada aluminium tuang untuk memodifikasi morfologi eutektik silikon dari serpihan (*flake*) dan kasar (*coarse*) menjadi serat halus (*fine fibrous*). Mekanisme perubahan morfologi silikon tersebut dapat dijelaskan dengan teori atom stronsium yang bergabung kedalam struktur kristal silikon dan menghambat pembentukan dari pertumbuhan bidang kembar (*twins plane*) silikon dan memutarnya menjadi bentuk serat (*fibrous*). Paduan dengan struktur silikon bulat dan halus umumnya mengakibatkan aluminium cair lebih mudah mengalir dibandingkan dengan struktur silikon serpihan dan kasar (*coarse*).

BAB III

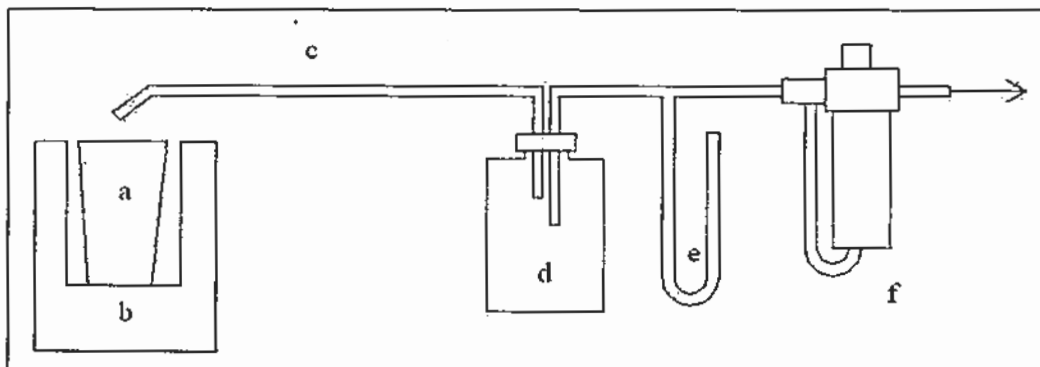
PROSEDUR PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

3.1.1 Perancangan dan Pembuatan Alat Uji Fluiditas Metode Vakum

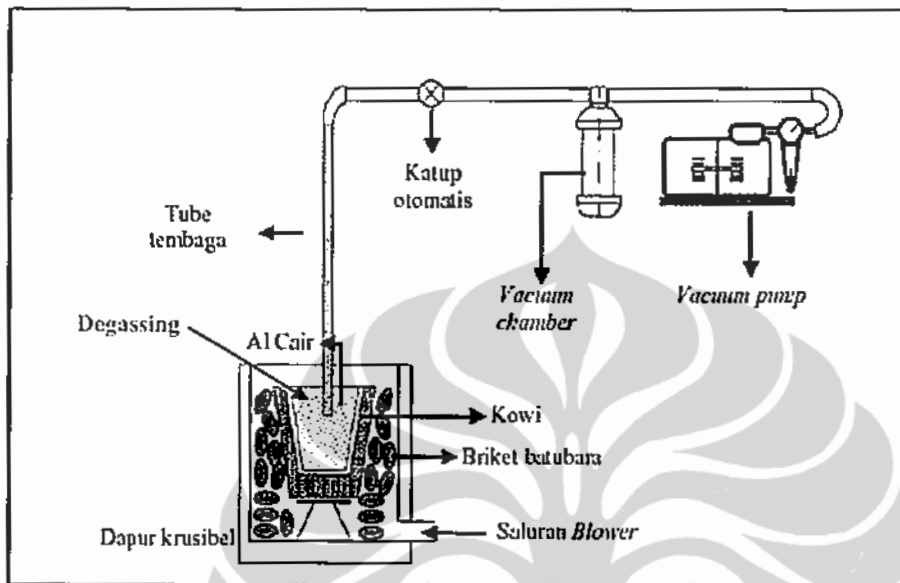
Salah satu sifat yang diinginkan pada paduan aluminium adalah kemampuannya untuk mengisi rongga cetakan terutama cetakan yang memiliki celah sempit dan tipis, dikenal dengan sifat fluiditas (mampu alir). Telah banyak metode yang dikembangkan untuk pengujian nilai fluiditas ini, antara lain pengujian fluiditas metode spiral, *double spiral*, spiral kotak, *cross suction channel*, dan metode vakum. Dari banyak penelitian yang telah dilakukan umumnya menggunakan metode spiral dikarenakan relatif murah dan sederhana, akan tetapi memiliki kelemahan didalam pengujian fluiditas logam cair yang tergantung pada tinggi dan kecepatan penuangan. Untuk itu pada penelitian ini dikembangkan alat uji fluiditas metode vakum yang memiliki keunggulan dari metode lainnya yaitu ketepatan pengukuran variabel temperatur tuang dan nilai fluiditasnya.

Dari salah satu penelitian yang ada didapat sketsa gambar alat uji fluiditas metode vakum seperti diperlihatkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Gambar ilustrasi alat uji fluiditas^[50]

Dari gambar tersebut dikembangkan dalam bentuk sketsa seperti yang terlihat pada Gambar 3.2 di bawah ini:



Gambar 3.2 Gambar sketsa alat uji fluiditas vakum

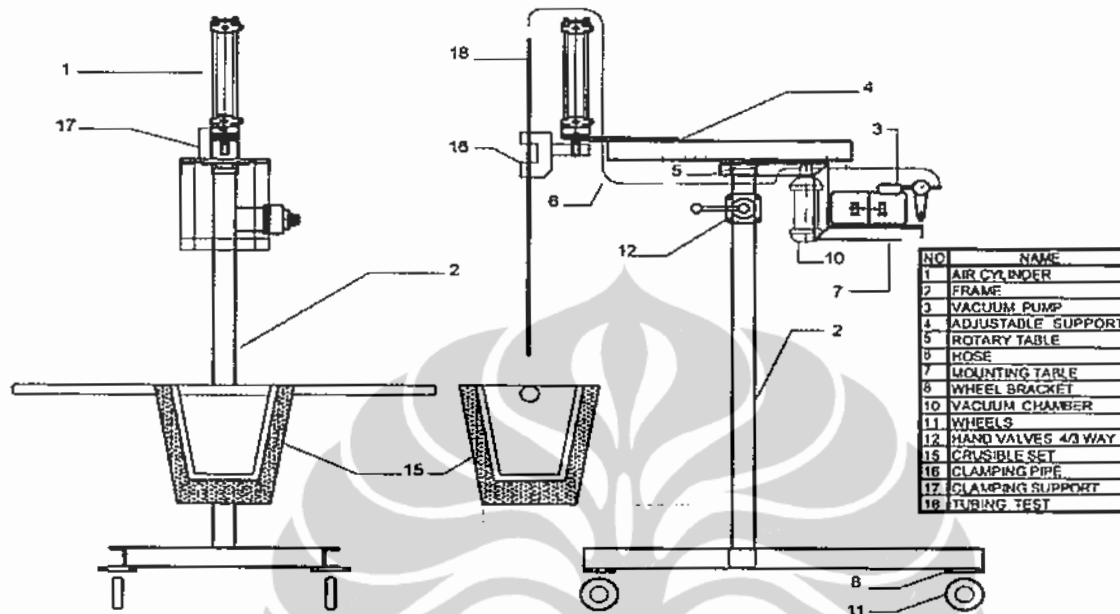
Dari sketsa dibuat gambar teknik alat uji fluiditas metode vakum (Gambar 3.3) dan dilanjutkan dengan pembuatan alat uji fluiditas metode vakum seperti Gambar 3.6. Proses pengujian fluiditas metode vakum ini pengoperasiannya jauh lebih mudah. Perancangan dan pembuatan alat uji fluiditas metode vakum ini dilakukan di laboratorium pengecoran logam Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.

Rangkaian yang terdapat pada alat uji fluiditas metode vakum meliputi komponen-komponen utama seperti :

- *Generator Vacuum*

Berfungsi untuk membangkitkan tekanan vakum dibawah atm, sehingga mengkondisikan besaran tekanan tertentu pada *vacuum chamber* untuk dialirkan nantinya ke pipa sebagai cetakan. Terdapat dua katup otomatis yang berfungsi untuk mengalirkan tekanan ke pipa. Kedua pipa ini akan membuka ketika ada sesuatu yang mengenai sensor ketinggian.

Universitas Indonesia



Gambar 3.3 Gambar teknik alat uji fluiditas metode vakum

- *Vacuum chamber*

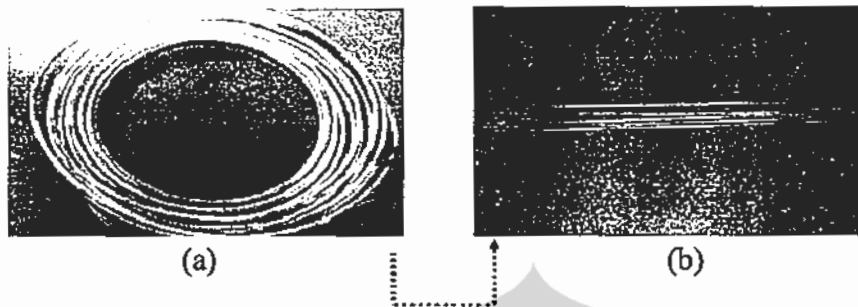
Berfungsi untuk menjaga kekonstanan tekanan pada keadaan vakum tertentu. Sebelum digunakan, alat ini perlu dikalibrasi dengan menggunakan *pressure calibration*, dimana proses bertujuan agar didapat tekanan vakum yang konstan pada saat penggunaan.

- *Air Cylinder*

Berfungsi untuk membantu naik turunnya pipa tembaga dari/ke dalam aluminium cair. Piston ini didukung oleh komponen-komponen lain seperti kompresor, yang bertugas menyuplai angin untuk menggerakkan piston, dan lengan piston yang bertugas untuk menyangga dan menjaga kestabilan naik turun atau lurus-tidaknya posisi pipa pada piston.

Sebagai cetakan untuk menghisap aluminium cair dari tungku peleburan digunakan pipa yang terbuat dari tembaga, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.4.

Universitas Indonesia



Gambar 3.4 Pipa tembaga (a) sebelum dan (b) setelah diluruskan

Alat uji fluiditas terdiri dari dua sistem, yang pertama adalah sistem vakum dan sistem hidrolik. Sistem vakum berfungsi untuk memberikan tekanan vakum didalam *vakum chamber* oleh *vakum generator* yang nantinya akan menghisap aluminium cair mengisi pipa sebagai cetakan. Sistem hidrolik berfungsi untuk menggerakkan *air cylinder* yang akan menggerakkan pipa naik dan turun. Apabila pipa telah turun, maka katup tekanan akan terbuka secara otomatis sehingga terjadi tarikan aluminium cair kedalam pipa.

Pengambilan sampel dilakukan secara semi otomatis dimana piston akan menurunkan pipa tembaga yang akan bertindak sebagai cetakan aliran logam cair ke kedalaman tertentu dari krusibel. Dengan menekan tuas pada alat uji fluiditas vakum, pipa yang telah dipasang akan bergerak turun dengan bantuan hidrolik. Saat pipa mencapai bawah dan masuk ke dalam aluminium cair, sensor pada alat tersebut tertekan dan vakum akan menghisap logam cair dengan tekanan yang telah diatur. Proses penghisapan ini dibuat konstan hanya dalam waktu 3 detik untuk setiap sampel agar menghindari pipa tidak ikut melebur. Dalam 3 detik maka operator alat akan menaikkan piston melalui *hand valve* untuk melihat panjang fluiditas dari aluminium cair.

Pada alat uji fluiditas metode vakum ini dilakukan terlebih dahulu kalibrasi tekanan vakum dengan alat *Pressure Calibration* untuk mendapatkan tekanan vakum yang diinginkan. Pemilihan tekanan vakum juga berkaitan dengan

Universitas Indonesia

dimensi pipa tembaga yang digunakan sebagai cetakan pengujian fluiditas. Perancangan dan pembuatan alat uji ini juga harus memenuhi aspek ergonomis (mudah dioperasikan) dan aspek estetika alat. Dimensi alat dibuat sebaik mungkin, efektif, dan efisien sehingga dapat diproduksi secara massal dan dalam pengoperasiannya membutuhkan energi, waktu, dan biaya yang rendah.



Gambar 3.5. Gambar alat uji fluiditas metode vakum

Gambar teknik alat uji fluiditas metode vakum ini secara detail dapat dilihat pada Lampiran A

3.1.2 Validasi Alat uji Fluiditas Metode Vakum Menggunakan Paduan Komersil ADC12

Untuk menguji kehandalan dan validasi dari alat ini maka dilakukan dilakukan serangkaian pengujian dengan menggunakan paduan komersil ADC12 (paduan Al-12% Si). Tujuan validasi alat ini untuk membuktikan bahwa alat ini dapat digunakan untuk pengujian fluiditas logam secara baik. Alat ini disebut

Universitas Indonesia

teruji (*valid*) jika dapat digunakan berulang (*repeatable*) dan menghasilkan data pengujian yang presisi dalam berbagai kondisi.

Pengujian kehandalan dan validasi alat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

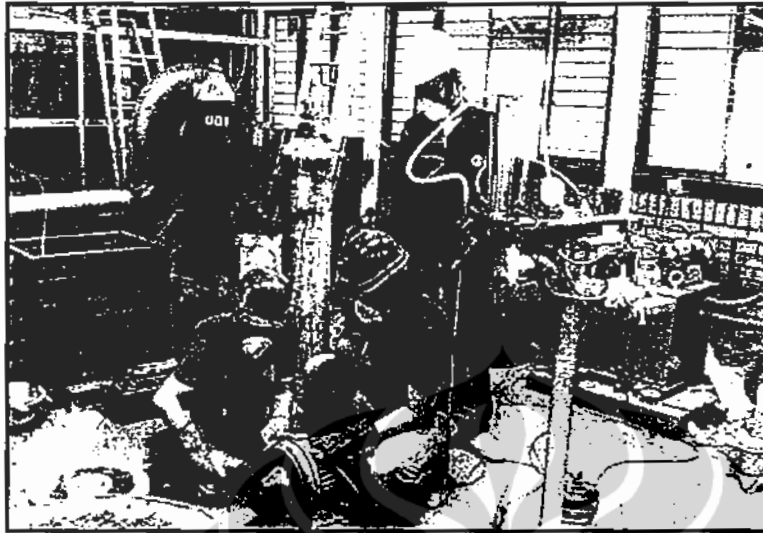
3.1.2.1 Temperatur Tuang, Jenis Pipa dan Tekanan

Sesuai dengan hasil rancangan alat uji fluiditas yang telah dibuat maka sangat penting untuk melakukan pengujian validasi jenis pipa sebagai cetakan yang digunakan untuk menghisap aluminium cair dari tungku peleburan dan tekanan vakum yang digunakan dengan variabel temperatur tuang.

Jenis pipa yang akan digunakan pada proses ini adalah pipa tembaga, pipa *stainless steel*, dan pipa besi dengan dimensi pipa diameter luar : 7 mm, diameter dalam: 5 mm, panjang: 800 mm. Sedangkan variasi tekanan yang akan digunakan adalah 6 , 8 dan 10 inHg dengan temperatur tuang 660, 680, 700, dan 720⁰C.

Pengujian pertama dilakukan dengan memvariasikan tekanan 6 inHg, 8 inHg dan 10 inHg, tetapi menggunakan satu jenis pipa saja yaitu pipa tembaga , sedangkan pengujian berikutnya dengan memvariasikan ketiga jenis pipa dengan tekanan yang konstan sebesar 8 inHg. Temperatur tuang yang digunakan adalah 660, 680, 700, dan 720⁰C. Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik

Setelah peralatan dan bahan selesai disiapkan sesuai prosedur, maka dilakukan persiapan proses peleburan (*melting*) dan kemudian dilakukan pengujian fluiditas untuk memvalidasi alat. Proses persiapan pengujian fluiditas metode vakum terlihat pada Gambar 3.6 di bawah ini:



Gambar 3.6. Persiapan proses peleburan dan pengujian fluiditas

3.1.2.2 Validasi Alat Uji Fluiditas Metode Vakum Menggunakan Paduan Komersil ADC12 Dengan Penambahan *Modifier Sr* dan *Grain Refiner AlTiB*

Pengujian validasi berikutnya dilakukan dengan menggunakan material paduan komersil ADC 12 dengan menambahkan *modifier Sr* dan *grain refiner AlTiB*. Alat dan bahan yang digunakan pada pengujian sama dengan alat dan bahan pada uji validasi jenis pipa dan tekanan. Pipa hisap (*suction pipe*) yang digunakan adalah pipa tembaga dan tekanan konstan sebesar 8 inHg. Temperatur tuang pengujian dengan rentang antara 660, 680, 700 dan 720⁰C. Sebelum pengambilan data uji fluiditas pada paduan komersil dilakukan :

- *Proses Peleburan dan Treatment Aluminium Cair.*

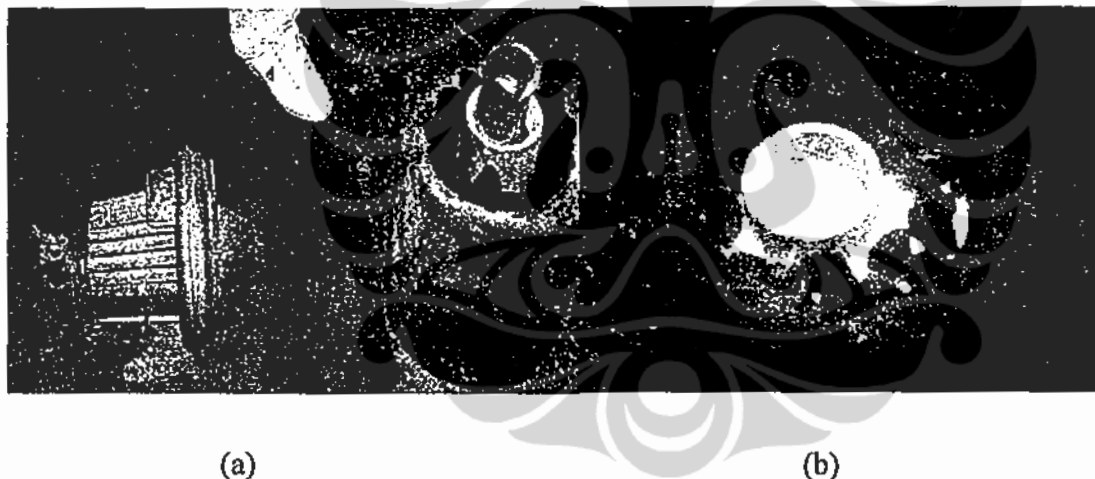
Proses Peleburan dilakukan dengan menggunakan dapur krusibel dengan bahan bakar briket batubara. Bejana untuk tempat peleburan (*kowi*) terbuat dari bahan refraktori dan mempunyai kapasitas ± 1400 gram. Untuk meningkatkan intensitas pembakaran dilakukan penghembusan udara menggunakan *blower* melalui celah yang terdapat pada bagian bawah krusibel.

Universitas Indonesia

- *Charging Material*

Sebelum dilakukan peleburan, bejana (*kowi*) dan peralatan lain terlebih dahulu dicoating untuk menghindari masuknya pengotor-pengotor lain dalam paduan aluminium yang akan diuji fluiditasnya dan menjaga umur peralatan tersebut akibat proses pemanasan yang berulang. Setelah itu bejana peleburan (*kowi*) dimasukkan kedalam krusibel dan dilakukan pembakaran dengan briket batubara (Gambar 3.7). Setelah beberapa menit atau setelah *kowi* mengalami pemanasan awal, material ADC 12 yang sudah ditimbang untuk masing-masing komposisi dimasukkan kedalam *kowi*.

Jumlah material yang akan dilebur ditimbang berdasarkan hasil dari perhitungan *material balance*.



Gambar 3.7.(a) Peletakkan *blower*, *kowi* dan dapur briket (b) Proses *melting*

Setelah dilakukan perhitungan *material balance* untuk menentukan berat *scrap* material ADC 12 dan *modifier* stronsium yang digunakan berdasarkan kapasitas krusibel, yaitu 1400 gr. Lima komposisi disiapkan melalui proses penimbangan dan pemotongan sebelum peleburan dilakukan, yaitu dengan penambahan *modifier* stronsium 0,015%; 0,03%; 0,045%, dan 0,06%. Sedangkan

Universitas Indonesia

variasi penambahan Al_5TiB sebesar 0,05%; 0,1%; 0,15% dan 0,2%. Tiap komposisi tersebut dipisahkan dan disertakan dengan fluks sebanyak 0,2%.

- *Proses Fluxing*

Setelah seluruh material aluminium melebur seluruhnya, kemudian menaburkan *cover flux* ke atas permukaan aluminium cair dengan tujuan untuk mengikat kotoran-kotoran berupa oksida-oksida dan *impurities* lainnya yang terdapat di dalam aluminium cair. Sebelum ditambahkan *flux* dipanaskan terlebih dahulu untuk mengurangi kandungan air sehingga tidak terjadi percikan logam aluminium ketika ditambahkan. Kotoran yang telah berikatan dengan *fluxing agent* dibuang dengan cara *drossing* di permukaan aluminium dengan menggunakan sendok plat besi yang telah di-*coating* dan selanjutnya dibuang.

- *Proses Degassing*

Proses *degassing* dilakukan ketika temperatur berkisar $\pm 720^\circ C$ untuk membersihkan gas-gas yang larut akibat temperatur tinggi. *Degassing* dilakukan dengan pemberian gas argon melalui *lance* selama 1 menit yang akan menghasilkan gelembung inert vakum di dalam aluminium cair sehingga gas-gas yang terlarut pada aluminium cair akan masuk kedalam gelembung vakum. Selanjutnya gas-gas tersebut akan terangkat keluar bersama gelembung vakum gas argon tersebut.

- *Proses Pengujian Fluiditas*

Pipa tembaga merupakan cetakan yang digunakan untuk mendapatkan nilai fluiditas pada penelitian ini. Seperti telah dijelaskan, alat uji fluiditas metode vakum yang dipakai akan menghisap logam cair ke dalam pipa tembaga ini, dan kemudian nilai fluiditas didapat dari ketinggian yang didapat. Ketersediaan pipa tembaga ini sebelumnya masih dalam bentuk gulungan logam sepanjang 15 m, sehingga untuk dapat bisa dipakai maka persiapan yang dilakukan adalah dengan

Universitas Indonesia

meluruskan pipa-pipa tersebut ke dalam ukuran yang ditetapkan. Pipa tembaga yang dipakai pada penelitian ini menggunakan ukuran yang tetap yaitu sepanjang 800 mm.

Setelah aluminium mencair seluruhnya, temperatur dari aluminium cair tersebut dicek menggunakan *thermocouple* (tipe *portable digital*). Temperatur tuang yang diinginkan untuk melakukan pengujian fluiditas ini adalah 660, 680, 700, dan 720°C dan tekanan vakum 8 inHg. Pengambilan data uji fluiditas dilakukan dengan dua sampai tiga kali pengujian untuk masing-masing temperatur yang kemudian diambil nilai rata-rata nya.

- *Proses pengukuran sample uji fluiditas vakum*

Setelah terkumpul pipa-pipa tembaga yang telah terisi dengan aluminium cair yang telah membeku, untuk mengukur nilai fluiditasnya yaitu dengan menggunakan suatu kawat logam dimana kawat tersebut dimasukkan ke dalam pipa melalui bagian yang kosong, dan ditandai batas ketika kawat tersebut mengenai puncak logam di dalam pipa dan dikeluarkan lalu diukur dengan penggaris.

Ketinggian logam didalam pipa tembaga didapat dari pengurangan panjang pipa tembaga terhadap panjang kawat yang telah ditandai tadi, dalam artian bahwa ini merupakan pengurangan dari panjang pipa terhadap bagian pipa yang kosong. Ketinggian inilah yang mewakili nilai fluiditas dari aluminium tersebut

- *Pengamatan Struktur Mikro*

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui bentuk struktur aluminium silikon dan fasa-fasa yang terbentuk pada sampel yang telah dihasilkan pada uji fluiditas validasi alat ini hanya menggunakan mikroskop optik yang dilakukan di laboratorium metalografi seperti pada Gambar 3.8 di bawah ini:



Gambar 3.8. Mikroskop optik merek *Olympus*

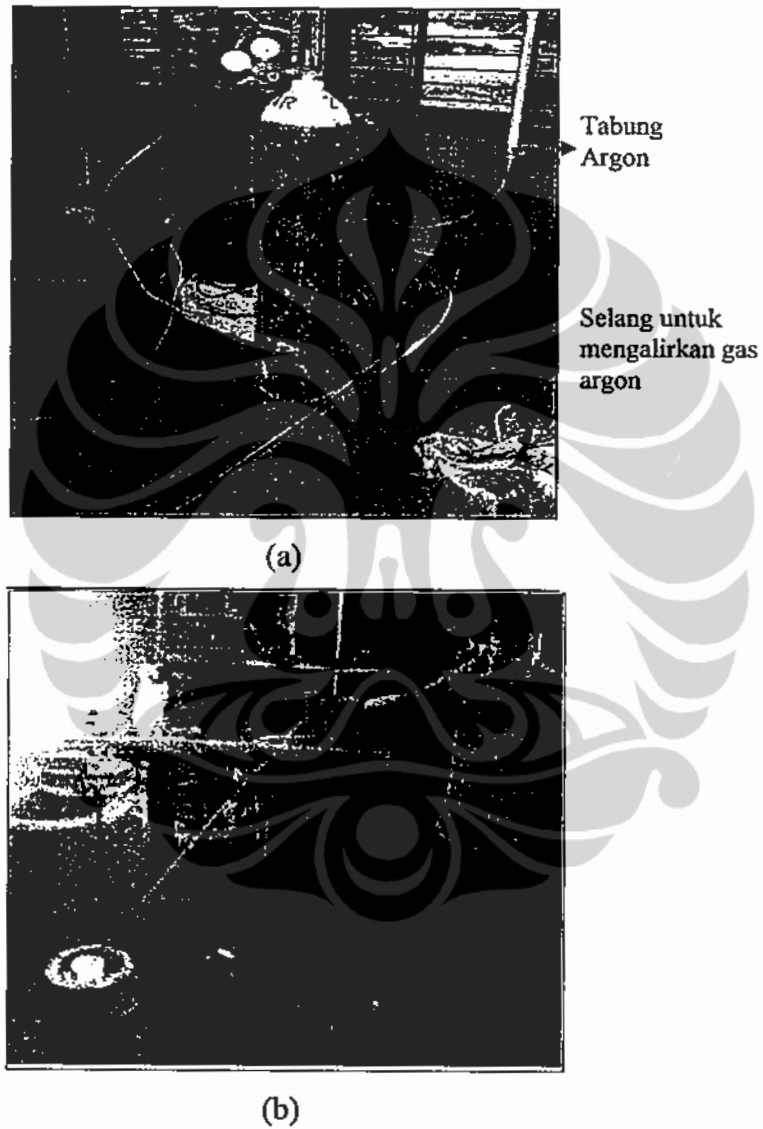
Seluruh benda uji yang akan diamati struktur mikronya harus melalui tahapan persiapan sampel metalografi berdasarkan standar pengujian ASTM E 3-80. Pada penelitian selanjutnya pengujian struktur mikro secara kualitatif dan kuantitatif dilakukan dengan alat uji SEM/EDX dan XRD

3.1.2.3. Validasi Alat uji Fluiditas Metode Vakum Menggunakan Paduan Komersil ADC12 Dengan variasi waktu *Degassing*

Validasi alat uji fluiditas berikut ini adalah dengan variabel *degassing* dan tanpa *degassing* serta waktu temperatur *degassing*. Variasi waktu yang dipakai adalah 0, 1, 2, dan 4 menit. Pada variabel 2 dan 4 menit, untuk menghindari larutnya logam selang yang diinjeksikan ke dalam aluminium cair maka perlu dikeluarkan dari cairan setiap 1 menit. Temperatur tuang yang digunakan adalah 660, 680, 700, dan 720°C dan tekanan 8 inHg. Pipa yang digunakan jenis pipa tembaga. Pada Gambar 3.9 di bawah ini adalah tabung gas argon dan selang untuk mengalirkan gas argon ke tungku peleburan. Peralatan, bahan, dan prosedur

Universitas Indonesia

pengujian yang dilakukan sama dengan pengujian validasi sebelum ini dan Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik.



Gambar 3.9. (a) Tabung gas argon dan pipa *degassing* (b) Proses *degassing*

3.1.3 Pembuatan dan Pengecoran *Master Alloy* Aluminium Silikon (Paduan Al-7% Si dan Al-11% Si)

Setelah dilakukan serangkaian pengujian validasi alat uji fluiditas metode vakum menggunakan paduan komersil ADC12, maka material yang akan digunakan untuk penelitian melihat pengaruh penambahan Fe (besi) dan Sr (stronsium) harus merupakan material yang terkontrol, atau kita sebut dengan *master alloy*. Untuk itu dilakukan proses pengecoran *master alloy* Al-7% Si dan Al-11% Si. Paduan *master alloy* Al-Si ini dicetak dalam bentuk batangan atau *ingot*

Persiapan pembuatan *master alloy* terdiri dari persiapan material yang akan dilebur dan persiapan peralatan peleburan. Material yang akan dilebur dilakukan perhitungan material balance dan kemudian ditimbang sesuai dengan komposisi kimia yang diinginkan yaitu Al-7% Si dan Al-11% Si. Peralatan untuk peleburan (*melting*) dan pencetakan *ingot* juga disiapkan, termasuk ladle dan termokopel untuk mengukur temperatur. Ladle sebelum digunakan dilapisi dengan bahan *coating* HOLCOTE 110 dan dipanaskan terlebih dahulu, sedangkan cetakan dilapisi dengan PLUNGER LUBEX 509 (PL 509)

Material yang akan dilebur untuk membuat *master alloy* ini adalah 10 batang aluminium dengan berat total 227 kg dan silikon sebanyak 28 kg. Pada pembuatan *master alloy* ini dilakukan pengujian komposisi kimia menggunakan alat uji komposisi spektrometer yang bertujuan untuk memastikan komposisi kimia sesuai dengan perhitungan *material balance* dan target yang diinginkan. Kemudian dilakukan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Pada penelitian berikut, *master alloy* akan ditambahkan Fe dan Sr serta melihat pengaruhnya terhadap struktur mikro dan nilai fluiditasnya.

3.1.4 Rekayasa penambahan Fe (Besi) dan Sr (Stronsium) pada *Master Alloy*

Rekayasa penambahan Fe dan Sr pada *master alloy* bertujuan untuk melihat pengaruh penambahan Fe dan Sr terhadap nilai fluiditas dan struktur mikro *master alloy* hipoeutetik dan eutektik (Al-7% Si dan Al-11% Si). Pada *master alloy* terlebih dahulu ditambahkan Fe yang disesuaikan dengan perhitungan komposisi kimia *material balance*. Setelah Fe larut sempurna di dalam aluminium cair maka sesuai dengan temperatur tuang yang diinginkan dilakukan pengujian fluiditas menggunakan alat uji fluiditas metode vakum .Pada paduan yang ditambahkan Fe dilakukan juga pengamatan struktur mikro dan pengujian komposisi kimia. Selanjutnya Sr ditambahkan pada paduan *master alloy* yang mengandung Fe. Gambar 3.10 berikut ini adalah diagram alir proses rekayasa penambahan Fe dan Sr pada *master alloy*.

Elemen besi yang ditambahkan berupa paduan Al-80% Fe dengan efektivitas 95% Fe sehingga diperlukan penambahan berat paduan Al-80% Fe sebesar 5% dan *modifier* stronsium yang digunakan juga berupa *master alloy* (Al-10%Sr) pada setiap variabel komposisi.

3.1.4.1 Peralatan

Peralatan yang dipergunakan melakukan pengujian fluiditas sebagai berikut:

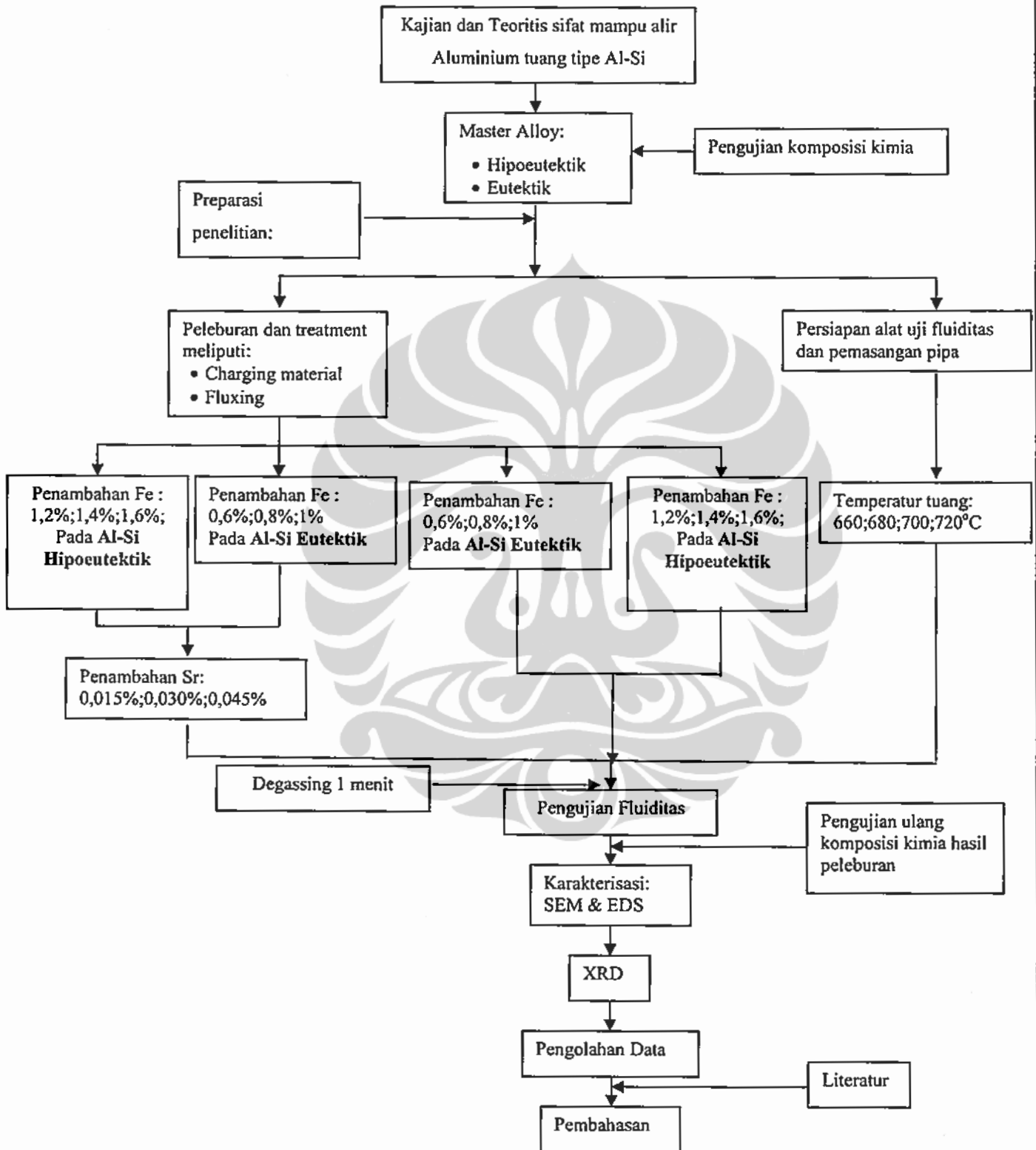
1. Dapur peleburan tipe krusibel dan *blower*
2. Kowi (kapasitas 1400 gr aluminium)
3. *Thermocouple* (tipe *portable digital*)
4. Alat uji fluiditas vakum
5. Kompresor
6. Cetakan ingot

7. Timbangan digital
8. *Plunger*, tang penjepit, dan sendok besi
9. Pemotong pipa, gerinda, dan gergaji besi
11. Peralatan keselamatan (masker dan sarung tangan)

3.1.4.2 Bahan

Bahan yang digunakan untuk melakukan pengujian mampu alir (fluiditas) paduan aluminium Al-11% Si dan Al-7% Si, yaitu sebagai berikut:

1. *Master alloy* Al-7% Si dan Al-11% Si
2. Unsur Fe yang berupa paduan Al-80%Fe dengan efektifitas 95%
3. *Modifier* stronsium (Al-10%Sr)
4. Pipa tembaga standar ASTM B88.S ¼ inch.OD, tebal 0,89mm X5,8m
5. *Flux coverall*
6. *Thermal coating*
7. Briket batubara
8. Gas Argon
9. *Resin* dan *hardener*
10. Kertas amplas 120#, 240#, 400#, 600#, 800#, 1000#, dan 1500#.
11. Kain poles beludru dan zat poles Alumina
12. Zat etsa HF (Hidrogen Fluorida) 0,5 % dan Alkohol



Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian

Universitas Indonesia

3.1.4.3 Prosedur Peleburan

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Proses Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Sebelum dilakukan proses peleburan, terlebih dahulu dilakukan perhitungan *material balance* untuk mendapatkan komposisi kimia yang diinginkan pada saat peleburan. Peleburan dilakukan dengan tungku menggunakan bahan bakar briket batubara dan dibantu dengan *burner*. Paduan yang akan dilebur disesuaikan dengan kapasitas kowi dan dimasukkan secara bertahap.

Setelah dilakukan perhitungan *material balance* selanjutnya dilakukan proses peleburan dan pengambilan data nilai fluiditas seperti diagram alir diatas (Gambar 3.10). Elemen besi ditambahkan dalam bentuk bongkahan kecil paduan Al-80Fe pada temperatur di atas 800°C dan dilakukan pengadukan agar besi lebih merata ke seluruh aluminium cair. Paduan Al-80%Fe memiliki efektivitas 95% karena mengandung *flux* sehingga ketika dimasukkan ke dalam aluminium cair akan menghasilkan abu (*flux* yang terbakar). Penambahan Fe dilakukan dengan cara digerus terlebih dahulu sampai halus dan kemudian dibungkus dengan *aluminium foil* agar Fe dapat terlarut sempurna pada saat proses peleburan. Proses dilakukan dengan *plunger* selama 5 menit.

Sedangkan Al-10%Sr yang ditambahkan dalam bentuk batangan. Untuk melarutkan unsur Sr ke dalam aluminium cair dengan mencelupkan batang tersebut sampai batas tertentu. Awalnya batangan tersebut ditimbang dan diukur panjangnya, kemudian dilakukan perbandingan panjang berdasarkan berat Al-10%Si yang ingin ditambahkan kedalam aluminium cair. Stronsium dimasukkan ke dalam logam aluminium cair pada temperatur 740°C sehingga efek *feeding* tidak terjadi. Sebelum pengujian fluiditas dilakukan proses degassing selama 1 menit

3.1.4.4 Pengujian Fluiditas

Untuk penarikan aluminium cair dari tungku peleburan diawali dengan pemasangan pipa tembaga pada alat uji fluiditas vakum. Setelah itu pipa tembaga yang telah dijepit diletakkan tepat di atas kowi yang terisi aluminium cair. Lalu untuk menurunkan pipa yaitu dengan memutar tuas piston sehingga hidrolis akan membawa pipa turun lalu naik sesuai dengan yang dikehendaki. Penarikan dilakukan konstan untuk tiap kali percobaan yaitu dalam waktu 2 detik, dengan tujuan selain untuk menyeragamkan penarikan pada tiap percobaan, juga untuk mencegah pipa tembaga meleleh di dalam aluminium cair tersebut. Penarikan dilakukan sebanyak dua kali untuk masing-masing temperatur sehingga nantinya didapat nilai fluiditas rata-rata pada masing-masing penarikan.

3.1.4.5 Pengujian komposisi kimia

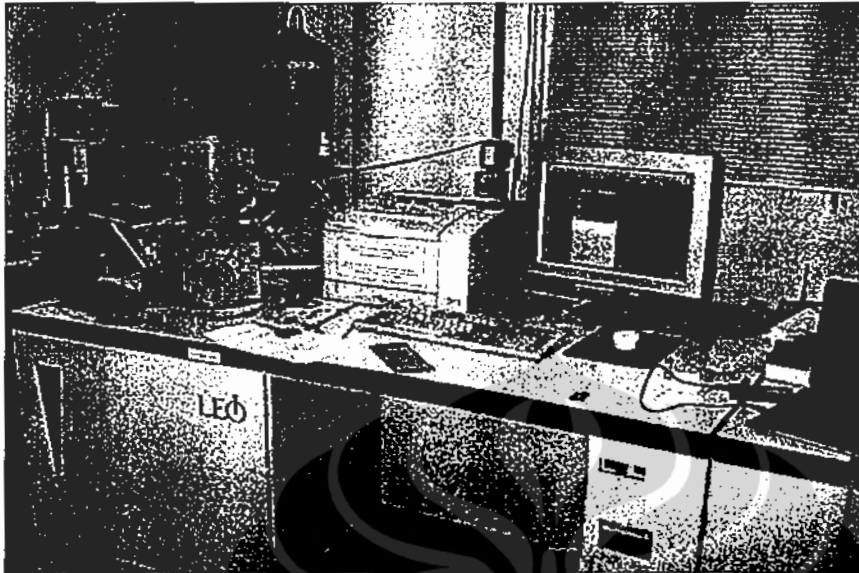
Aluminium cair yang telah ditambahkan Fe dan Sr dituang ke dalam cetakan khusus, setelah membeku aluminium dikeluarkan dari cetakan dan dilakukan preparasi dengan cara diratakan permukaannya menggunakan mesin gerinda. Setelah didapatkan permukaan yang rata, sampel dilakukan pengujian menggunakan *Optical Emission Spectrometer* untuk mengetahui komposisi kimia. Pengujian komposisi kimia ini dilakukan untuk memastikan kandungan unsur Fe dan Sr yang ditambahkan telah sesuai atau belum dengan yang diharapkan.

3.2 Karakterisasi Material Hasil Pengujian Paduan Hipoeutektik (Al-7%Si) dan Eutektik (Al-11%Si)

3.2.1 Karakterisasi Struktur Mikro (SEM / EDX)

Pengamatan mikrostruktur ini dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) LEO 420 dilengkapi dengan *Energy-Dispersive Spectroscopy* seperti yang terlihat pada Gambar 3.11 di bawah ini:

Universitas Indonesia



Gambar 3.11 Alat *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang dilengkapi EDX.

Pengamatan struktur mikro menggunakan SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi fasa intermetalik yang terbentuk. Preparasi sampel dengan menggunakan larutan etsa HF 0,5% serta pengambilan gambar SEM dengan perbesaran 500-1000 kali. Dengan menggunakan SEM/ EDX diharapkan dapat mengidentifikasi matrik aluminium silikon, struktur silikon, fasa intermetalik dan morfologinya, dimana fasa α -AlFeSi mempunyai bentuk *chinese script* dan fasa β -AlFeSi mempunyai morfologi seperti pelat dan jarum-jarum, tetapi pengujian SEM tidak dapat menentukan jenis intermetalik yang terbentuk.

3.2.1.1 Preparasi Sampel

Sebelum sampel dilakukan pengujian SEM/ EDX, sampel harus dilakukan preparasi terlebih dahulu. Tahapan pengujian struktur mikro didasarkan pada standar persiapan dan pengamatan metalografi. Tahapan persiapan tersebut adalah sebagai berikut:

- *Cutting*

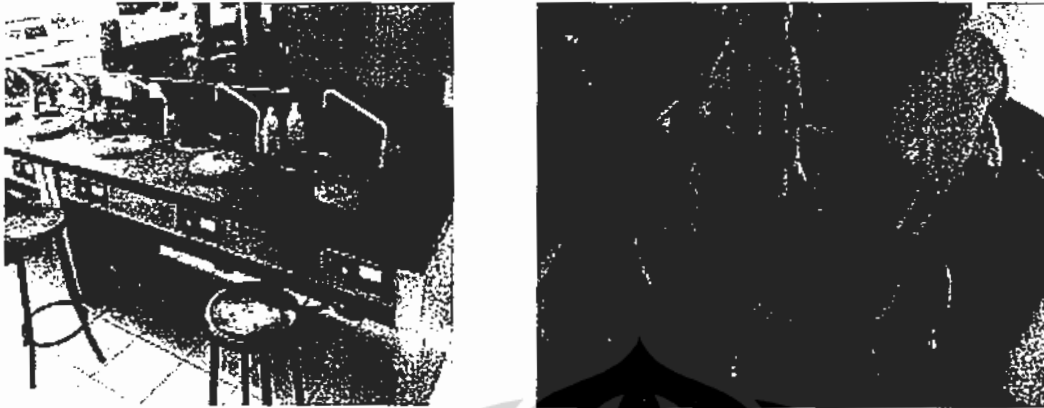
Tahapan yang paling awal dilakukan adalah memotong dan mengeluarkan sampel dari bagian pipa tembaga. Pemotongan dilakukan dengan menggunakan gergaji, kemudian pengeluaran sampel dengan menggunakan obeng negatif.

- *Mounting*

Proses *mounting* bertujuan menempatkan sampel pada suatu media, untuk memudahkan penanganan sampel yang berukuran kecil dan tidak beraturan tanpa merusak sampel. Media *mounting* yang digunakan berupa *resin* dan *hardener* yang diletakkan terlebih dahulu di cetakan sebelum diletakkan sampel. Untuk mempersingkat proses preparasi dalam satu *mounting* berisikan sampai 10 buah sampel. *Mounting* dilakukan dengan menambahkan *resin* dan *hardener* di cetakan yang terlebih dahulu diletakkan sampel

- *Grinding (Pengamplasan)*

Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas dengan amplas nomor grid #120, #240, #360, #400, #600, #800, #1000, dan #1500, yang dilakukan secara bertahap dimulai dari amplas dengan nomor grid paling kecil (kasar) ke nomor grid yang besar (halus). Proses pengamplasan dilakukan dengan dialiri air yang bertujuan untuk menghindari panas akibat gesekan permukaan sampel dengan amplas, untuk membuang geram hasil pengamplasan agar tidak menggores permukaan sampel, serta memperpanjang usia pakai amplas tersebut. Setiap pergantian kertas amplas, pergantian arah pengamplasan pada sampel dilakukan agar goresan hasil pengamplasan sebelumnya dapat dihilangkan oleh pengamplasan berikutnya. Proses pengamplasan ini bertujuan untuk mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan sampel.



Gambar 3.12 Peralatan pengamplasan dan pemolesan sampel

- *Polishing (pemolesan)*

Sampel yang permukannya telah halus dan rata kemudian akan dipoles dengan menggunakan mesin pemoles dan zat poles alumina. Proses ini dilakukan setelah pengamplasan dengan tujuan untuk menghilangkan goresan-goresan akibat pengamplasan, sehingga didapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap.

Awal tahap proses pemolesan ini dilakukan dengan agak memberi tekanan pada sampel yang berguna untuk menghilangkan goresan dari hasil pengamplasan. Kemudian secara bertahap sampel dipoles dengan tidak memberi tekanan seperti pada awal proses pemolesan agar didapatkan permukaan sampel yang halus dan mengkilap.

- *Pengamatan struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik*

Setelah sampel dilakukan pemolesan sampai didapatkan hasil permukaan yang halus dan mengkilap, pengamatan struktur mikro perlu dilakukan untuk memastikan bahwa struktur mikro pada sampel sudah dapat terlihat dan juga untuk memeriksa apakah masih terdapat goresan-goresan halus akibat dari proses pengamplasan dan pemolesan yang kurang sempurna. Apabila hasil pengamatan struktur mikronya belum sempurna, proses pengamplasan atau pemolesan dapat diulang kembali.

Universitas Indonesia

- *Etching (Etsa)*

Untuk mengamati mikrostruktur perlu dilakukan proses etsa, yaitu proses korosi terkontrol yang bertujuan untuk mengikis batas butir, sehingga nantinya struktur mikro akan terlihat lebih jelas. Untuk pengamatan struktur aluminium zat etsa yang diberikan adalah HF 0.5% pada bagian permukaan sampel (\pm 30detik). Setelah dilakukan etsa kemudian sampel akan dibersihkan dengan air dan alkohol 70% dan dikeringkan. Setelah melalui tahapan proses ini, sampel siap dilakukan pengujian pengamatan struktur mikro menggunakan SEM.

3.2.1.2 Pengamatan Struktur Mikro menggunakan SEM dan EDX

Setelah dilakukan preparasi sampel, selanjutnya dilakukan pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) milik Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Prinsipnya pengujian ini adalah dengan menembakan sampel dengan menggunakan elektron, dan nantinya pantulan elektron dari tumbukan dengan sampel tadi akan ditangkap oleh detektor-detektor yang kemudian dapat menampilkan gambar struktur mikro pada monitor.

Pertama-tama, permukaan sampel dilakukan *coating* menggunakan unsur Au kira-kira sekitar satu jam agar tidak terjadi *charging* berlebih ketika ditembakkan dengan elektron dan untuk meningkatkan kontras warna pada gambar. Kemudian sampel dimasukan kedalam alat pengujian SEM dan divakum selama kira-kira 10 menit. Selanjutnya sampel dapat ditembakkan elektron dengan *probe level* tertentu. Pantulan elektron setelah menumbuk sampel dapat ditangkap oleh detektor *secondary electron* (SE1) atau *backscattered electron* (QBSD). Detektor SE1 digunakan untuk mengamati topografi permukaan sampel yang diuji, sedangkan detektor QBSD digunakan untuk mengamati terbentuknya fasa-fasa yang terdapat pada sampel yang diuji. Pengamatan fasa didasarkan pada perbedaan terang dan gelap fasa tersebut. Bila suatu fasa memiliki berat atom

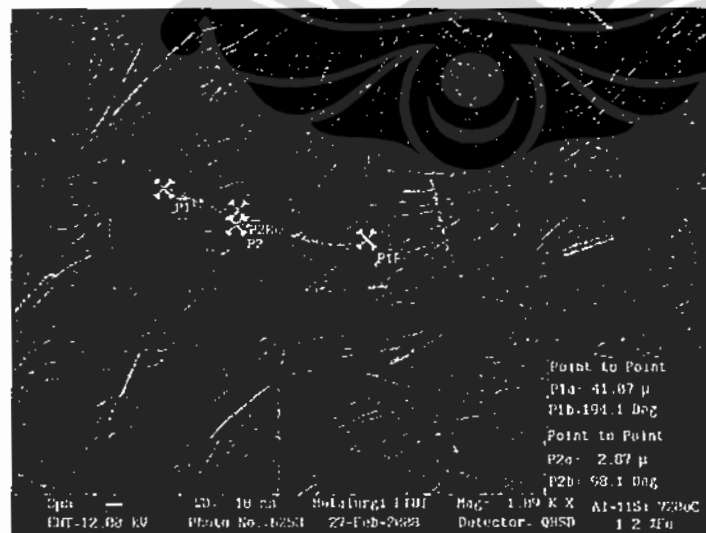
Universitas Indonesia

yang ringan, maka fasa yang terlihat pada monitor adalah berwarna terang, sedangkan fasa yang memiliki berat atom yang berat akan ditunjukkan dengan warna yang gelap pada monitor.

Pada pengujian EDX, dilakukan penembakan pada titik atau *spot* yang diinginkan dalam hal ini adalah pada intermetalik, eutektik silikon dan matrik aluminium. Pengujian EDX pada suatu titik/*spot* pada sampel menghasilkan keluaran dalam bentuk persentase unsur saja (bukan senyawa seperti yang dihasilkan dari pengujian XRD) Dari pengujian tersebut diperoleh indikasi adanya unsur-unsur kimia yang ada pada spesimen paduan Al-7% Si dan Al-11% Si

3.2.1.3 Perhitungan Panjang dan Tebal Fasa Intermetalik

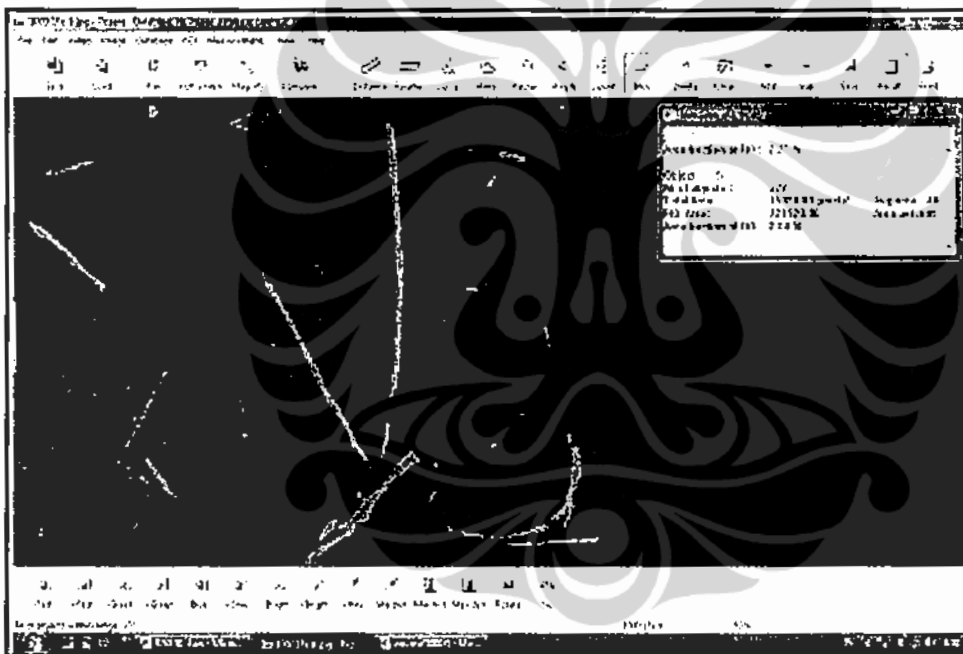
Perhitungan panjang dan lebar intermetalik ini menggunakan fasilitas yang tersedia pada perangkat lunak yang digunakan pada peralatan SEM. Perhitungan ini dilakukan dengan tujuan mengetahui korelasi hubungan antara penambahan kadar Fe ataupun Sr dengan panjang intermetalik yang terbentuk. Pada Gambar 3.13 diperlihatkan cara pengukuran panjang dan lebar fasa intermetalik.



Gambar 3.13 Pengukuran panjang intermetalik pada Al-13,4%Si-1,12%Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.

3.2.1.4 Perhitungan Fraksi Area Fasa Intermetalik

Pengujian kuantitatif struktur mikro dari sampel, yang dilakukan berikutnya adalah menghitung persentase fraksi area fasa intermetalik yang terbentuk dalam sampel. Perhitungan fraksi area fasa dilakukan dengan menggunakan suatu *software* PICSARA.^[72] Dengan menggunakan *software* ini, dapat dilakukan perhitungan luas suatu area berdasarkan perbedaan kontras warna yang terdapat pada gambar struktur mikro hasil pengamatan menggunakan SEM. Pada gambar 3.14 dapat dilihat cara pengukuran fraksi luas area intermetalik yang terbentuk pada paduan aluminium silikon.

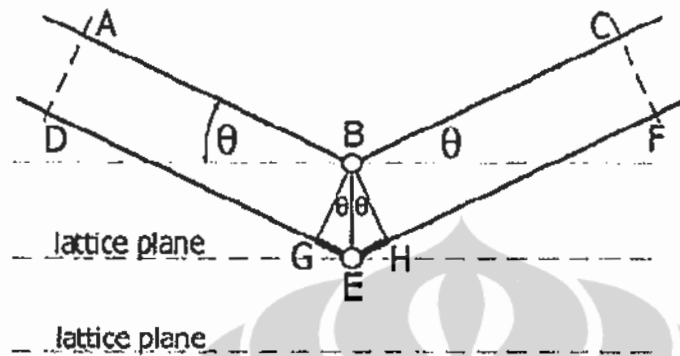


Gambar 3.14 Perhitungan fraksi area fasa Intermetalik menggunakan *software* PICSARA

3.3. Identifikasi Senyawa dengan Pengujian XRD

Senyawa atau fasa yang terdapat pada sampel dapat diidentifikasi secara kualitatif dan kuantitatif dengan menggunakan peralatan (XRD) *X-ray Diffraction*. Prinsip kerja dari peralatan ini adalah dengan menembakan sinar-X dengan panjang gelombang tertentu dari berbagai arah sudut penembakan kepada

sampel, kemudian pantulan sinar-X tadi ditangkap oleh detektor dan selanjutnya dikonversi menjadi data output berupa grafik 2θ versus intensitas (Gambar 3.15).



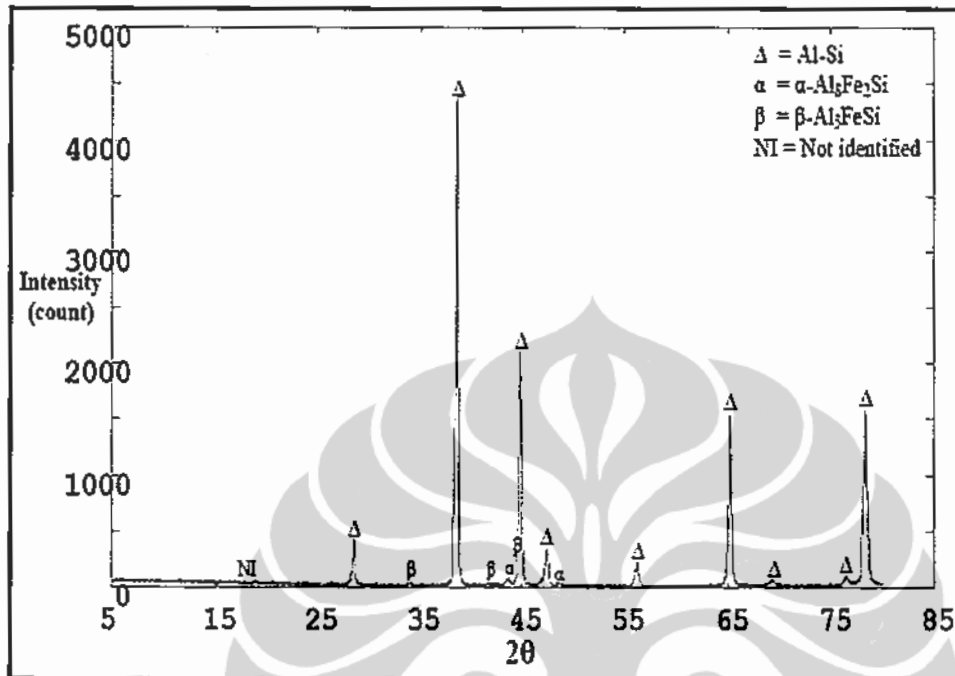
Gambar 3.15 Geometri pemantulan X-Ray.

Setiap fasa memiliki nilai 2θ -nya masing-masing. Untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang terbentuk secara kuantitatif adalah dengan mencocokkan puncak-puncak dari grafik hasil pengujian dengan nilai 2θ standar fasa dari *database* yang ada. Bila terdapat minimal dua puncak yang sesuai, maka fasa tersebut dapat dikatakan terkandung dalam sampel yang diuji tersebut. Peralatan pengujian XRD dapat kita lihat pada Gambar 3.16 dan hasil pengujiannya ditampilkan pada Gambar 3.17 di bawah ini:



Gambar 3.16 Peralatan X-ray Diffraction

Universitas Indonesia



(a)

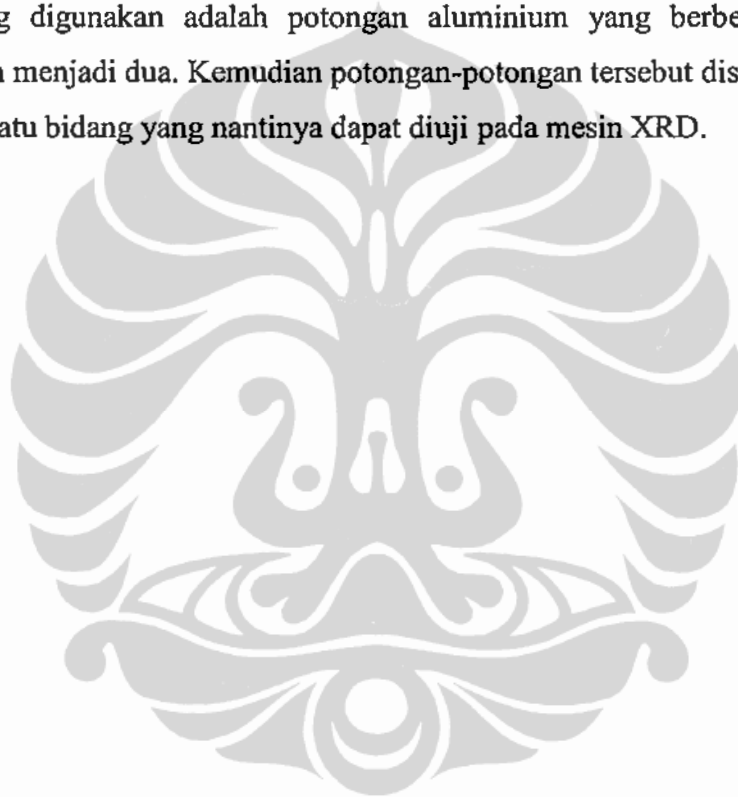
2 θ	Area	fasa
18.724	208	NI
28.622	3696	Al-Si
34.149	208	β -AlFeSi
38.647	26531.8	Al-Si
38.762	8280.2	Al-Si
41.688	184	β -AlFeSi
43.774	288	α -AlFeSi
44.626	1764	β -AlFeSi
45.001	5849.9	Al-Si
47.439	3850	Al-Si
48.659	245	α -AlFeSi
56.253	1596	Al-Si
65.253	10920	Al-Si
65.409	4248.1	Al-Si
69.287	308	Al-Si
76.508	750	Al-Si
total	68927	

(b)

Gambar 3.17 (a) Grafik hasil pengujian XRD dan (b) data *output* pengujian menggunakan XRD

Identifikasi fasa secara kuantitatif menggunakan hasil data output XRD adalah dengan menghitung luas area dibawah puncak fasa yang ingin diketahui. Untuk menghitung luas area dibawah puncak dapat dilakukan perhitungan manual menggunakan formula integral, atau untuk mempermudah perhitungan dapat digunakan suatu *software* khusus untuk menganalisis data-data hasil XRD yang disebut *PowderX*^[73] dan *XPowder*^[74]

Sampel yang digunakan adalah potongan aluminium yang berbentuk silinder yang dibelah menjadi dua. Kemudian potongan-potongan tersebut disusun sehingga menjadi suatu bidang yang nantinya dapat diuji pada mesin XRD.



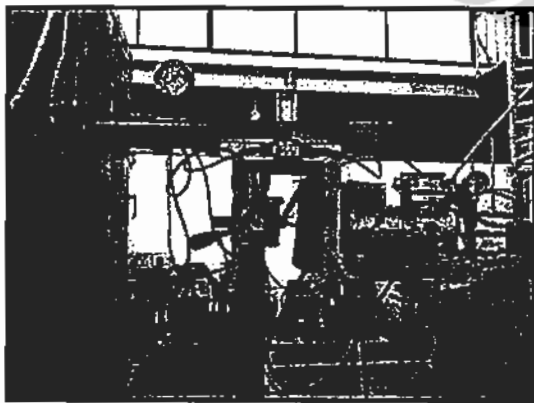
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

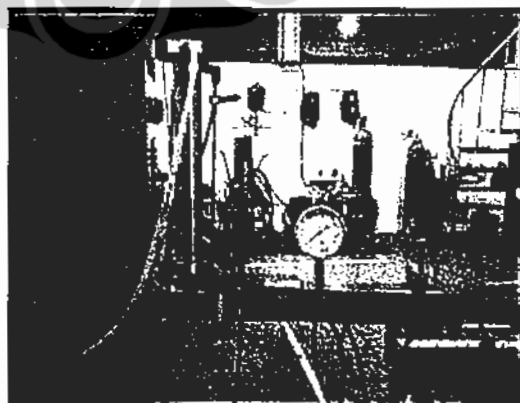
4.1 Perancangan, Pembuatan, dan Validasi Alat Uji Fluiditas Metode Vakum

4.1.1 Perancangan dan Pembuatan Alat Uji Fluiditas

Perancangan dan pembuatan alat uji fluiditas metode vakum ini dilakukan untuk meminimalisasi kekurangan-kekurangan yang didapat dari pengujian fluiditas metode spiral, spiral kotak, dan metode lainnya. Diharapkan hasil perancangan dan pembuatan alat ini akan mendapatkan pengukuran temperatur dan kecepatan tuang yang lebih presisi pada saat melakukan pengujian fluiditas logam. Perancangan dan pembuatan alat uji fluiditas vakum ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi Proses Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Sebagian besar material untuk pembuatan dan perancangan alat uji fluiditas ini didapatkan dari komponen-komponen lokal, kecuali beberapa komponen seperti pompa vakum (*vacuum pump*), tabung vakum (*vacuum chamber*), dan *air cylinder*, yang diimpor dari luar negeri.



(a)



(b)

Gambar 4.1.(a) Komponen pompa vakum (*vacuum pump*) dan (b) *air cylinder*

Salah satu komponen penting yang digunakan pada pengujian fluiditas metode vakum adalah pipa hisap (*suction pipe*) atau *tubing test* yang akan digunakan sebagai cetakan untuk menghisap aluminium cair dari tungku peleburan. Pada perancangan alat uji fluiditas metode vakum ini digunakan tiga jenis pipa yaitu pipa tembaga, pipa *stainless steel*, dan pipa baja. Beberapa penelitian menggunakan pipa *quartz* tetapi pipa ini sulit untuk didapatkan di pasaran dan harganya relatif mahal, karena itu tidak digunakan dalam penelitian ini.

Prinsip kerja alat uji fluiditas metode vakum ini terdiri dari dua bagian utama yaitu sistem kontrol pompa vakum dan sistem kontrol pergerakan. Sistem kontrol pompa vakum untuk mendapatkan tekanan vakum yang akan disimpan pada tabung tekanan vakum (*vacuum chamber*) dan kemudian dialirkan ke pipa tembaga (*tubing test*) untuk menghisap aluminium cair yang berada di tungku peleburan. Sementara itu, sistem kontrol pergerakan adalah sistem untuk menaikturunkan pipa dari dan ke dapur peleburan yang dikontrol secara manual.

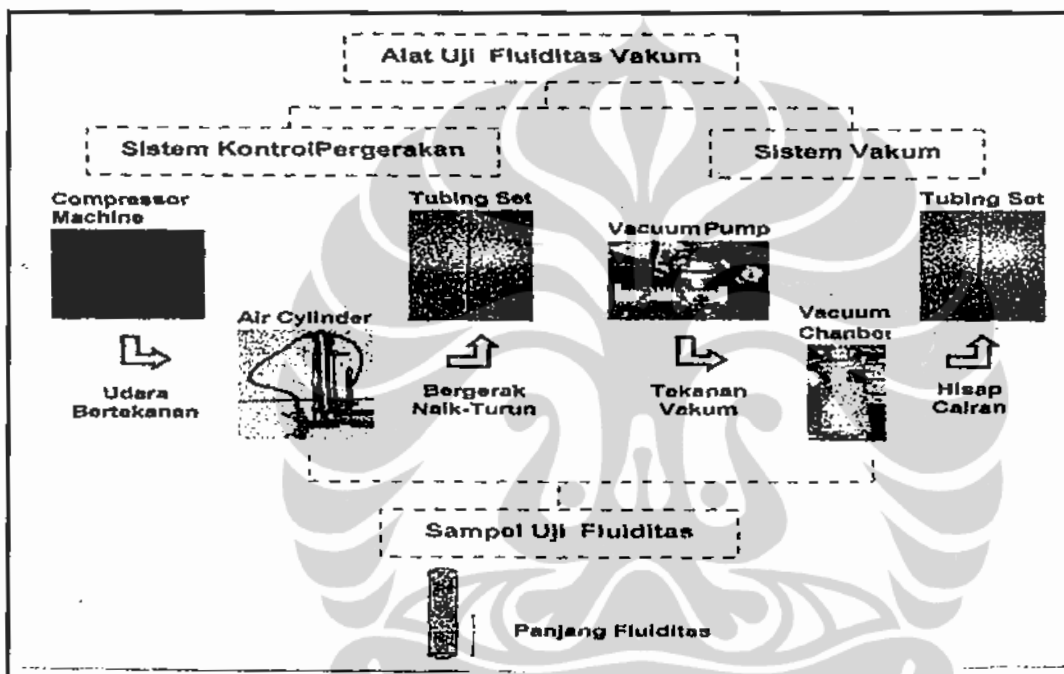
Media pergerakan untuk menaikturunkan pipa berupa tekanan udara yang berasal dari kompresor yang dialirkan ke *air cylinder*. Pergantian pipa yang digunakan untuk pengujian fluiditas metode vakum ini dilakukan secara manual. Pipa yang telah digunakan untuk menghisap aluminium cair tidak dapat digunakan lagi untuk pengujian berikutnya (hanya sekali pakai). Sistem kerja alat uji fluiditas metode vakum ini secara skematis ditampilkan pada Gambar 4.2.

Dari hasil perancangan dan pembuatan alat uji fluiditas metode vakum ini telah memenuhi aspek yang diinginkan, antara lain:

1. Dimensi alat tidak terlalu besar sehingga mudah untuk dioperasikan serta mudah untuk dipindah-pindahkan.
2. Estetika alat dirancang sedemikian rupa sehingga menarik bagi *user* dan waktu pembuatannya yang relatif cepat.
3. Ergonomis, dalam arti bagaimana merancang alat yang murah tetapi tetap berkualitas dan handal digunakan untuk pengujian.
4. Dari hasil kalibrasi telah didapatkan ukuran tekanan vakum yang diinginkan.

Universitas Indonesia

Agar alat uji fluiditas metode vakum ini dapat digunakan secara tepat pada penelitian dan industri maka disusun SOP (Standart Operational Procedure) sehingga secara teknis memenuhi standar peralatan pengujian. Secara terinci, SOP ditampilkan pada Lampiran A. Alat uji fluiditas ini juga sudah didaftar-patenkan di Departement Hukum dan HAM RI.



Gambar 4.2. Sistem kerja alat uji fluiditas metode vakum

4.1.2 Validasi Alat Uji Fluiditas Metode Vakum

Setelah dilakukan perancangan dan pembuatan alat uji fluiditas metode vakum ini, untuk memastikan bahwa alat ini dapat digunakan untuk mengukur fluiditas logam, dilakukan serangkaian pengujian validasi terhadap alat tersebut. Validasi ini juga untuk melihat apakah alat uji fluiditas metode vakum ini handal untuk digunakan dan dapat dipakai berulang-ulang dalam berbagai kondisi. Pengujian validasi ini menggunakan paduan komersial ADC12 sebagai material uji

4.1.2.1 Validasi Alat Uji Dengan Memvariasikan Temperatur Tuang, Jenis Pipa, Dan Tekanan Vakum

- *Validasi Alat Uji dengan Memvariasikan Jenis Pipa*

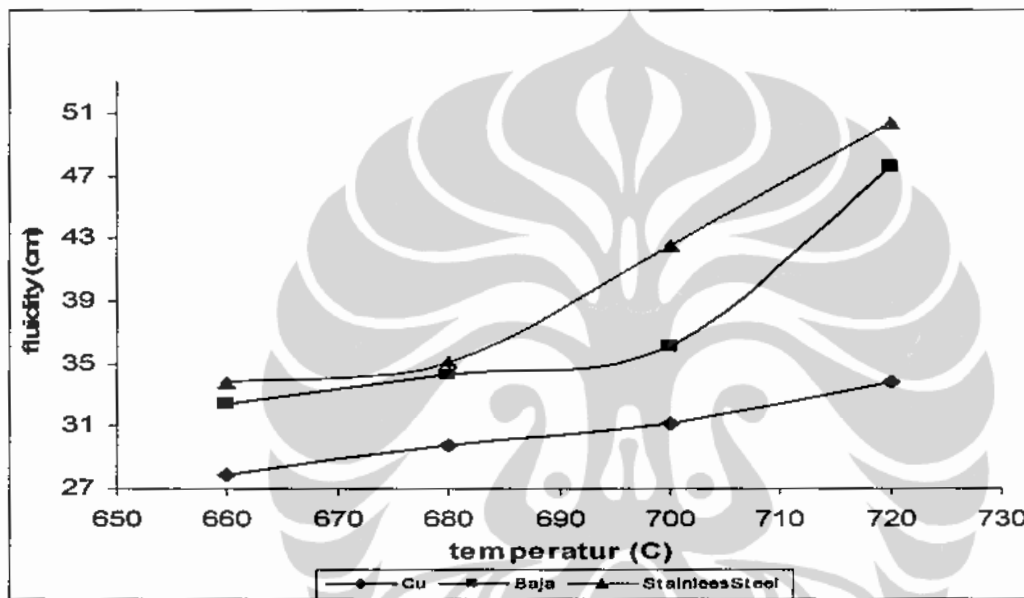
Pipa hisap (*suction pipe/tubing test*) merupakan komponen utama yang digunakan sebagai cetakan (*dies*) yang bersifat bahan habis pakai (*consumable*). Pada pengujian ini digunakan 3 macam material pipa yaitu pipa tembaga, baja, dan *stainless steel*. Pemilihan jenis pipa hisap yang akan digunakan pada validasi alat uji ini menimbang faktor mudah didapatkan di pasaran, harga relatif terjangkau, dan aspek teknis lainnya.

Pengujian validasi pertama, dilakukan dengan memvariasikan jenis pipa (pipa tembaga, baja dan *stainless steel*) dan temperatur tuang (660, 680, 700, dan 720°C) pada tekanan konstan 8 inHg (hasil kalibrasi). Material yang digunakan adalah paduan komersial ADC12 yang termasuk jenis paduan aluminium silikon eutektik. Proses dimulai dari persiapan alat dan bahan, persiapan proses peleburan, dan pengujian fluiditas. Untuk mendukung data uji fluiditas dilakukan pengamatan struktur mikro dengan alat mikroskop optik. Dari hasil pengujian didapatkan sebuah grafik nilai uji fluiditas seperti diberikan dalam Gambar 4.3. Dari grafik pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa dengan semakin meningkatnya temperatur tuang paduan komersial ADC12, mulai dari temperatur 660°C sampai 720°C, didapatkan nilai fluiditas yang semakin meningkat pula. Hal ini juga berlaku pada semua jenis pipa hisap yang digunakan sebagai alat untuk menghitung nilai fluiditas.

Secara kuantitatif, peningkatan fluiditas menggunakan pipa *stainless steel* pada temperatur 660°C adalah sebesar 33,77 cm dan pada temperatur 680°C sebesar 35,13 cm atau meningkat sebesar 4,03%. Dari temperatur 680°C ke 700°C meningkat sebesar 21%, dan dari temperatur 700°C ke 720°C meningkat sebesar 18,43 %. Peningkatan rata – rata setiap 20°C menggunakan pipa *stainless steel* dari temperatur 660°C ke 720°C adalah sebesar 14,47%. Sementara itu, dengan menggunakan pipa baja, peningkatan setiap 20°C derajat *superheat* memberikan

Universitas Indonesia

peningkatan fluiditas sebesar 14,23%. Untuk pipa tembaga, peningkatan setiap 20°C memberikan peningkatan fluiditas sebesar 6,63%. Peningkatan ini terjadi karena derajat *superheat* menentukan kuantitas panas yang dilepas sebelum proses solidifikasi. Dalam hal ini, semakin tinggi derajat *superheat* maka jumlah panas yang harus dilepas sebelum terjadinya solidifikasi juga semakin banyak.



Gambar 4.3. Hubungan antara temperatur tuang dengan fluiditas pada variasi material pipa.

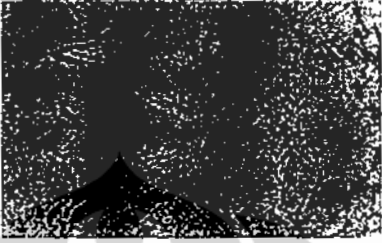


Lebih tingginya nilai fluiditas menggunakan pipa *stainless steel* dibandingkan dengan pipa baja dan tembaga disebabkan karena nilai konduktifitas thermal *stainless steel* lebih rendah bila dibandingkan dengan nilai konduktifitas thermal baja dan tembaga. Konduktifitas thermal adalah kemampuan untuk menghantarkan panas. Apabila nilai konduktifitas thermal material rendah, artinya material tersebut akan mampu untuk mempertahankan panas yang lebih lama, dengan kata lain paduan aluminium cair ADC12 dapat lebih lama mengalir di dalam pipa atau membeku setelah waktu yang lebih lama. Nilai konduktifitas thermal *stainless steel* adalah 14 W/mK, baja sebesar 45 – 46 W/mK, dan tembaga sebesar 401 W/mK. Hasil yang didapat ini sesuai dengan

beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, antara lain penelitian yang dilakukan oleh Tran Duc Huy dkk.^[4] dalam mengukur fluiditas dari AC2B, AC4B, AC4CH, AC9A, ADC12, dan ADC 14 menggunakan metode vakum dengan *vertikal tube*. Pipa yang digunakan sebagai cetakan adalah *stainless steel* diameter dalam 4,7 mm dan 6,35 mm, tembaga diameter dalam 2, 3, dan 4 mm, quartz diameter dalam 3,5 mm. Test fluiditas dilakukan pada derajat *superheat* yang berbeda, yaitu: 0, 30, 60, 90, dan 120⁰K dan pada 4 variasi tekanan (ΔPa) : 1,33; 2,67; 4 ; dan 6,67 kPa, dimana ΔPa adalah tekanan atmosfer dikurangi tekanan yang digunakan.

Penelitian lain, Wattanachai Prukkanon dan Limmaneevichitr^[5] melakukan penelitian fluiditas pada Aluminium A356 dan A380 menggunakan metode vakum. Pipa yang digunakan sebagai cetakan adalah pipa quartz diameter dalam 7 mm, diameter luar 9 mm. Tekanan diatur pada 5 cmHg. Temperatur tuang 660^o C, 690^o C dan 720^oC. Dengan hasil semakin tinggi derajat *superheat*, maka nilai fluiditas juga semakin besar. Nilai fluiditas tertinggi didapatkan pada Aluminium paduan A380 tanpa modifikasi. Niyama Eisuke dkk.^[8] juga telah melakukan eksperimen pengukuran nilai fluiditas pada aluminium paduan AC4CH menggunakan metode vakum dengan pipa *quartz*, tembaga, *stainless steel* dan *mullte* diameter dalam 4 mm. Didapatkan hasil bahwa semakin tinggi derajat *superheat* akan meningkatkan nilai fluiditas baik itu menggunakan pipa tembaga maupun *quartz*.

Setelah dilakukan uji fluiditas, sampel ADC12 selanjutnya diambil untuk dilakukan pengujian metalografi. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik. Gambar struktur mikro dari sampel ADC12 ini diperlihatkan dalam Tabel 4.1. Dari gambar tersebut, struktur mikro terdiri dari matrik aluminium yang berwarna terang dan struktur silikon berbentuk jarum dan berwarna lebih gelap. Pada gambar tersebut memperlihatkan bahwa struktur mikro dengan penggunaan material pipa hisap yang berbeda pada temperatur yang sama tidak memperlihatkan perubahan bentuk struktur maupun distribusi fasa eutektik silikon yang cukup berarti.

Tabel 4.1 Foto struktur mikro ADC 12 pada berbagai jenis pipa hisap

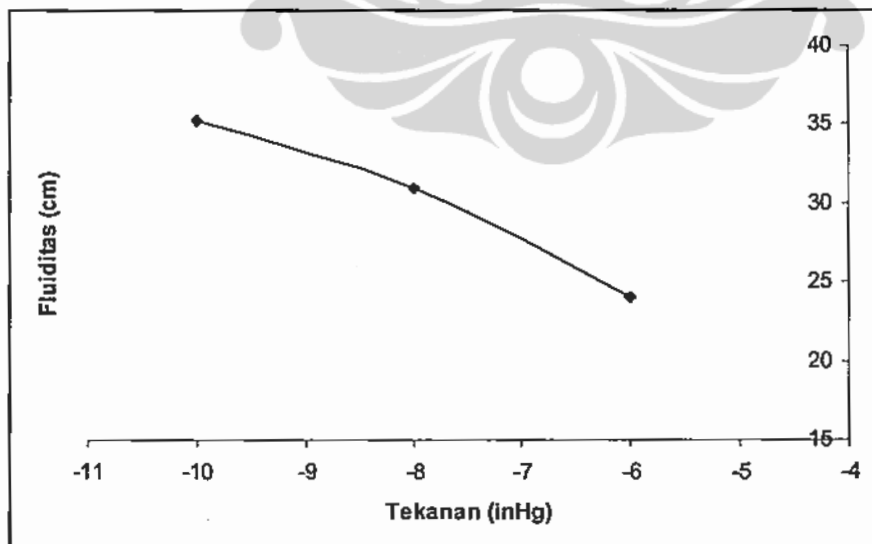
Pipa	Temp. °C	Mikrostruktur
Stainless Steel	720	
Baja	720	
Tembaga	720	

Karena tidak memperlihatkan perbedaan struktur mikro yang berarti, maka pada pengujian validasi berikutnya dipilih pipa tembaga sebagai pipa hisap atau *tubing test* untuk mengukur nilai fluiditas logam. Beberapa alasan lain dipilihnya pipa tembaga adalah lebih mudah dan murah untuk didapatkan, mudah untuk dilakukan pengamatan makro pada pengujian fluiditas disebabkan terjadinya perubahan warna pada pipa tembaga pada saat logam aluminium cair mengalir di dalam pipa, dan gaya adhesifitas atau kemampubasahan antara dinding pipa penguji terhadap material uji rendah sehingga akan memudahkan pengambilan sampel mikrostruktur. Pipa tembaga pertama dipotong menjadi ukuran panjang 80 cm dari awalnya yang berbentuk gulungan pipa tembaga yang harus terlebih dahulu diluruskan.

Universitas Indonesia

- *Validasi Alat Uji Fluiditas dengan Memvariasikan Tekanan*

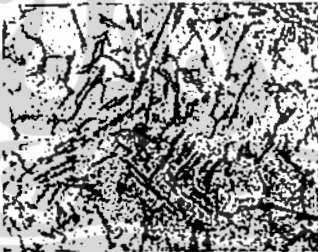
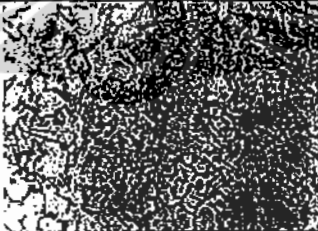
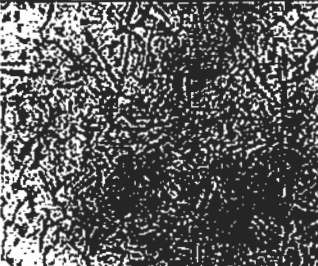
Pengujian validasi kedua dilakukan dengan memvariasikan tekanan (6 inHg, 8 inHg, dan 10 inHg) pada temperatur yang konstan 680°C. Hasil uji fluiditasnya dapat dilihat pada Gambar 4.4. Dari hasil grafik pada Gambar 4.4 dapat diperhatikan bahwa semakin rendah tekanan (semakin vakum) yang diberikan maka nilai fluiditas yang didapatkan juga semakin tinggi. Semakin vakum tekanannya, maka kecepatan alirannya juga semakin tinggi, hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan tekanan yang semakin besar. Semakin rendah tekanan yang diberikan, maka akan meningkatkan nilai fluiditas. Peningkatan rata-rata fluiditas aluminium paduan komersil ADC12 setiap penurunan tekanan sebesar 2 inHg, pada temperatur 680°C adalah sebesar 21,52%. Pemilihan tekanan 6, 8, dan 10 inHg disesuaikan dengan dimensi (diameter dan panjang pipa yang digunakan untuk menghisap aluminium cair). Pada tekanan lebih besar dari 10 inHg, maka tidak sesuai lagi dengan panjang pipa tembaga yang digunakan sebagai pipa hisap yaitu 80 cm. Setelah dilakukan proses peleburan dan pengujian fluiditas, juga dilakukan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik.



Gambar 4.4. Hubungan tekanan vakum dengan nilai fluiditas paduan ADC12 pada temperatur 680°C, menggunakan pipa tembaga

Hasil foto struktur mikro pengujian validasi dengan variasi tekanan pada paduan komersial ADC12 ini dapat dilihat pada Tabel 4.2. Dari foto struktur mikro pada Tabel 4.2 memperlihatkan pengaruh perbedaan tekanan pada fluiditas paduan komersial ADC12 terhadap struktur mikro dengan pipa tembaga sebagai pipa hisap tidak terlalu signifikan, di mana bentuk struktur maupun distribusi dari fasa eutektik silikon hampir sama. Dalam hal ini, dapat dikatakan bahwa tekanan hanya berpengaruh terhadap nilai fluiditas saja. Karena itu, pada pengujian berikutnya dipilih tekanan sebesar 8 inHg untuk ketepatan pengukuran nilai fluiditas yang disesuaikan dengan panjang, jenis, dan diameter pipa tembaga yaitu sepanjang 80 cm.

Tabel 4.2 Struktur mikro ADC 12 dengan variasi tekanan menggunakan pipa tembaga

Tekanan (inHg)	Temperatur (°C)	Struktur Mikro
- 10 inHg	680	
- 8 inHg	680	
- 6 inHg	680	

4.1.2.2 Validasi Alat Uji Dengan Penambahan *Modifier Sr*

Paduan komersial ADC12 pada umumnya digunakan dalam industri komponen otomotif. Hasil pengujian komposisi kimia paduan komersial ADC12 yang baru didapat (100% *scrap* atau yang belum ditambahkan *modifier Sr*), yang dilakukan dengan menggunakan alat *Metal Analysis Spectrometer*, diberikan dalam Tabel 4.3. Komposisi kimia paduan komersial ADC12 sesuai dengan standard JIS selanjutnya diberikan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.3 Komposisi kimia paduan ADC12 komersial (100% *scrap*)

Sampel Uji	Komposisi Kimia (% berat)											
	Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Cr
A	84,5	2,17	0,16	10,63	0,881	0,17	0,184	0,902	0,076	0,023	0,046	0,025
B	85,9	1,96	0,133	9,71	0,773	0,151	0,164	0,827	0,069	0,019	0,05	0,023
Rata-rata	85,2	2,065	0,1465	10,17	0,827	0,1605	0,174	0,8645	0,0725	0,021	0,048	0,024

Tabel 4.4 Komposisi kimia paduan ADC12 komersial sesuai dengan standard JIS^[75]

JIS	Komposisi Kimia (% berat)											
	Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Cr
Min	-	1,5	-	9,6	-	-	-	-	-	-	-	-
Max	-	3,5	0,3	12	1,3	0,5	0,5	1	-	0,3	-	-

Dari hasil pengujian komposisi kimia terlihat bahwa paduan komersial ADC12 termasuk kepada paduan aluminium silikon eutektik karena mengandung rata-rata 10%Si. Terdapat kandungan Fe dengan nilai rata-rata 0,8wt%Fe. Paduan aluminium jenis ADC 12 adalah paduan aluminium tuang sesuai dengan standar JIS (*Japan International Standard*). Sesuai dengan Standar JIS H 5302 (1976), paduan ini tergolong ke dalam kelas 12, dengan sistem paduan Al-Si-Cu. Dengan

Universitas Indonesia

sistem paduan Al-Si-Cu, paduan ADC12 umumnya diaplikasikan untuk produk yang membutuhkan sifat mekanis antara kekuatan dan ketangguhan yang tinggi. Selain itu paduan ADC12 ini tahan terhadap korosi, dan paduan ini dikenal juga dengan nama *copper silumin*. Paduan ini merupakan material yang umumnya diaplikasikan pada proses pengecoran cetak tekanan tinggi (*high pressure die casting*).^[71] Umumnya digunakan pada produk berupa *cylinder barrel, head cover, crank case, wheel hub*, dan sebagainya.

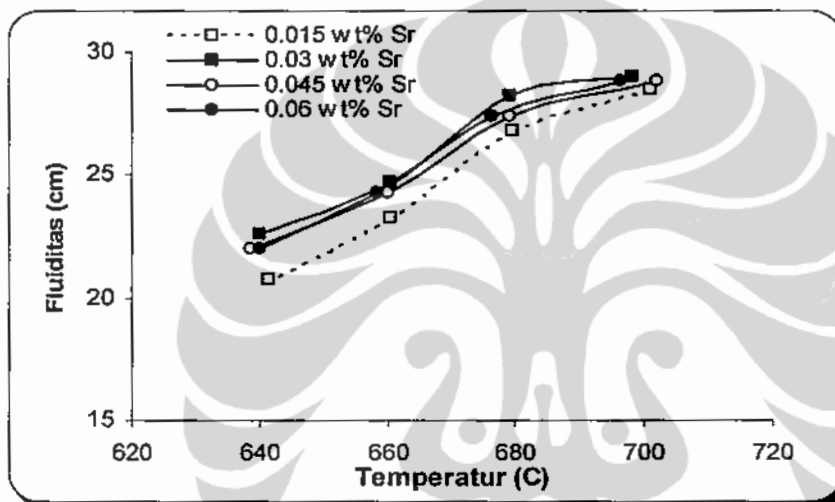
Seperti prosedur pada pengujian fluiditas sebelumnya, maka pada tahap ini terlebih dahulu dimulai dengan persiapan alat dan bahan, penimbangan material paduan ADC12 dan dilanjutkan dengan proses peleburan. Pengujian nilai fluiditas aluminium paduan ADC12 (100% *scrap*) dan dengan penambahan *modifier* stronsium 0,015%; 0,03%; 0,045%, dan 0,06% diambil dalam rentang temperatur tuang antara 640, 660, 680, dan 700°C. Secara komprehensif hasil pengujian fluiditas paduan komersial ADC12 yang ditambahkan *modifier* Sr ditampilkan pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.5.

Tabel 4.5 Data pengujian nilai fluiditas aluminium paduan ADC12 (100% *scrap*) dengan penambahan Sr yang bervariasi antara 0,015%; 0,03%; 0,045%, dan 0,06wt%.

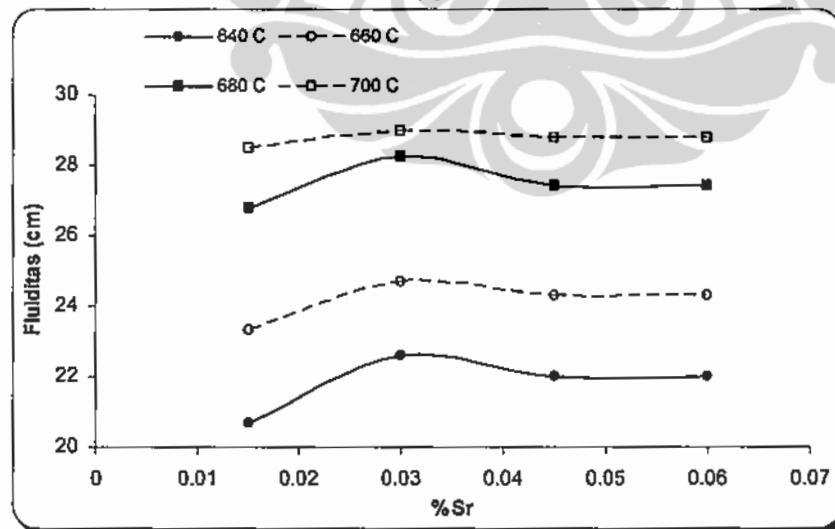
ADC 12							
0,015 %Sr		0,03 %Sr		0,045 %Sr		0,06 %Sr	
Temperatur (°C)	Fluiditas (cm)	Temperatur (°C)	Fluiditas (cm)	Temperatur (°C)	Fluiditas (cm)	Temperatur (°C)	Fluiditas (cm)
701,0	28,5	698	29,00	702	28,8	696,5	28,8
679,5	26,8	679	28,25	679	27,4	676,5	27,4
660,5	23,3	660	24,70	660	24,3	658,5	24,3
641,5	20,7	640	22,60	638	22,0	640,0	22,0

Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa dengan penambahan *modifier* stronsium 0,03 wt%, terjadi peningkatan fluiditas dari 20,7 cm (pada 640°C) menjadi 23,3 cm (pada 660°C) atau meningkat sekitar 12,56%. Peningkatan yang serupa juga terjadi dari 23,3 cm (660°C) menjadi 26,8 cm (pada 680°C) atau meningkat

sekitar 15,02%; dari 26,8 cm (pada 680°C) menjadi 28,5 cm (pada 700°C) atau meningkat sekitar 6,34%. Dari hasil yang didapat tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan *modifier* stronsium 0,03% telah terjadi peningkatan nilai fluiditas sekitar 11,31% setiap kenaikan temperatur tuang sebesar 20°C ($\Delta T=20^\circ\text{C}$). Hasil ini sesuai dengan literatur^[30], bahwa temperatur (derajat *superheat*) memiliki hubungan yang linear terhadap nilai mampu alir (fluiditas).



(a)



(b)

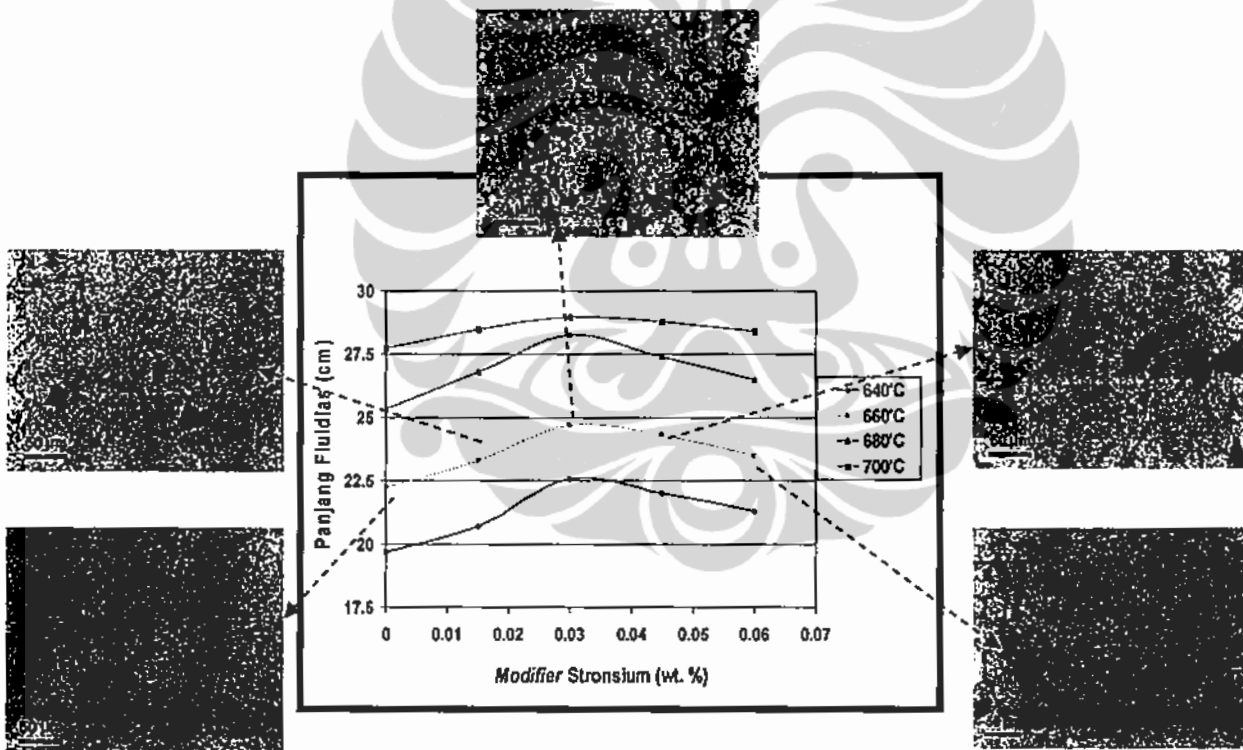
Gambar 4.5 (a) Hubungan antara temperatur tuang dengan fluiditas (b) Hubungan penambahan Sr yang bervariasi antara 0,015%- 0,06%.

Fluiditas logam cair merupakan faktor yang penting dalam pengecoran, khususnya untuk menghindari cacat-cacat yang sering terjadi pada benda cor. Cacat-cacat yang dihasilkan oleh benda cor menyebabkan semakin tingginya tingkat *reject* dari produk-produk yang dihasilkan. Oleh karena itu, material yang digunakan dalam pengecoran harus memiliki kualitas yang baik. Penanganan sifat mampu alir (fluiditas) pada paduan komersial ADC12 dengan cara menaikkan temperatur proses cairan tidak dapat memberikan hasil yang positif. Karena walaupun nilai fluiditas cairan paduan komersial ADC12 dapat ditingkatkan, jenis-jenis cacat yang lain justru dapat dialami oleh produk paduan komersial ADC12, terutama cacat *gas porosity* dan *shrinkage porosity*. Untuk itu, untuk memperbaiki struktur eutektik silikon yang semula berbentuk jarum-jarum kasar menjadi lebih bulat (*fibrous*) maka perlu dilakukan pemberian *modifier*. Dengan penambahan *modifier* ini diharapkan akan dapat meningkatkan sifat mekanis paduan komersial ADC12, mempermudah proses *machinability*, dan juga dapat meningkatkan *castability* paduan ADC12.

Dengan menggunakan mikroskop optik, dilakukan pengambilan foto struktur mikro pada 5 buah sampel dengan 5 variasi persentase penambahan *modifier* stronsium yaitu 0%; 0,015%; 0,03%; 0,045%, dan 0,06%. Pengambilan foto struktur mikro masing-masing dilakukan sebanyak dua kali, yaitu dengan perbesaran 100 dan 500 kali, dan hasilnya diberikan pada Gambar 4.6. Dari foto struktur mikro pada Gambar 4.6 terlihat bahwa penggunaan *modifier* stronsium memberikan pengaruh yang cukup jelas terhadap bentuk struktur maupun distribusi dari fasa eutektik silikon. Pada kondisi tanpa penggunaan *modifier* stronsium (0%) terlihat struktur dari fasa eutektik silikonnya masih berbentuk jarum atau serpihan, dan tingkat pendistribusiannya di dalam matriks aluminium kurang merata. Struktur eutektik silikon yang menyerupai jarum ini menandakan bahwa logam cair yang digunakan pada proses pengecoran belum dilakukan *treatment* atau modifikasi dengan menggunakan *modifier* stronsium. Jika dilakukan modifikasi maka struktur silikon eutektik akan tampak lebih bulat dan lebih halus dan hal ini akan berakibat baik pada nilai fluiditas (mampu alir) dari aluminium cair.

Universitas Indonesia

Pada penggunaan *modifier* stronsium sebesar 0,015%, terlihat struktur dari fasa eutektik silikon sudah mulai tampak bulat dan halus walaupun pada beberapa bagian struktur silikon masih kasar dan berbentuk jarum/serpihan. Pada kondisi ini struktur baru mengalami apa yang dinamakan *partially modification* atau modifikasi yang belum sempurna. Hal ini dikarenakan penggunaan stronsium yang kadarnya masih belum cukup untuk memodifikasi struktur silikon. Gambar struktur mikro paduan komersil ADC12 yang ditambahkan Sr ditampilkan pada Lampiran B.



Gambar 4.6 Hubungan penambahan *modifier* stronsium terhadap nilai fluiditas pada tiap variasi temperatur tuang

Pada penggunaan *modifier* stronsium sebesar 0,03%, terlihat struktur dari fasa eutektik silikon yang ideal (bulat dan terdistribusi) atau *fully modified*. Kondisi ini membuktikan bahwa nilai fluiditas (mampu alir) optimum diperoleh pada pengujian fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium sebesar 0,03

wt%. Hal ini sesuai dengan literatur^[30] bahwa dengan penambahan *modifier* stronsium 0,02%- 0,03% pada paduan A380.0 dapat menghasilkan struktur mikro yang halus sehingga dihasilkan nilai fluiditas (mampu alir) yang baik.

Sementara itu, pada penambahan *modifier* stronsium sebesar 0,045 % dan 0,06 % terlihat pengkasaran partikel silikon dan perubahan bentuk dari silikon bulat yang halus ke bentuk jarum yang saling berhubungan. Hal ini dikarenakan reaksi perubahan struktur eutektik tidak berlangsung dengan baik atau berlebihan (*overmodified*), sehingga struktur eutektik yang dihasilkan menjadi tidak lagi ideal (tidak bulat), akibatnya nilai fluiditas paduan aluminium tuang ADC12 menjadi rendah. Hasil yang didapat ini sesuai dengan apa yang telah dilakukan oleh McDonald Stuart D. dkk,^[10] di mana penambahan stronsium (Al-10%Sr) dalam modifikasi silikon pada komposisi Al-10% Si dapat menaikkan nilai fluiditas. Dalam modifikasi silikon, penambahan stronsium dapat menurunkan temperatur nukleasi dan pertumbuhan eutektik. Teknik ini umumnya digunakan dalam menentukan besarnya derajat modifikasi secara tidak langsung.

Pendapat yang senada juga diutarakan oleh A. M. Samuel dkk,^[11] bahwa dengan penambahan stronsium pada paduan aluminium hipoeutektik 319 (Al-7%Si-3,5%Cu) dapat menaikkan nilai fluiditas (mampu alir). Stronsium (Sr) umumnya digunakan pada paduan tuang Al-Si untuk memodifikasi morfologi eutektik silikon dari bentuk serpihan (*flake*) dan kasar (*coarse*) menjadi serat halus (*fine fibrous*). Mekanisme perubahan morfologi silikon tersebut dapat dijelaskan dengan teori atom stronsium yang bergabung ke dalam struktur kristal dari silikon dapat menghambat pembentukan dari pertumbuhan bidang kembar (*twins plane*) dari silikon dan memutarnya menjadi bentuk serat (*fibrous*). Umumnya, modifikasi dengan Sr dapat menurunkan temperatur reaksi eutektik. Penurunan temperatur eutektik ini dapat digunakan sebagai indikator kehadiran struktur modifikasi Si yang diharapkan pada proses cor (*casting*), dimana makin rendah temperatur eutektik maka makin besar efek dari modifikasi yang dihasilkan.

Dalam penelitian lainnya, S. Sanchez dkk,^[12] menyimpulkan bahwa penambahan stronsium dengan kadar 42, 65, 87, 102, 126 dan 144 ppm pada

Universitas Indonesia

paduan A356 dengan menggunakan metode fluiditas vakum (*vacuum suction pipe*) dapat meningkatkan nilai fluiditas mulai dari temperatur 700°C hingga 760°C. Peningkatan nilai fluiditas ini ditunjukkan dengan perubahan karakteristik dari silikon. Diameter serat (*fiber*) dari morfologi silikon lebih besar dari fasa morfologi awal. Namun, penambahan stronsium mulai menunjukkan titik jenuh (*saturation point*) pada penambahan 144 ppm Sr.

4.1.2.3 Validasi Alat Uji Dengan Penambahan Penghalus Butir (*Grain Refiner*)

Pengujian validasi fluiditas metode vakum pada paduan komersial ADC12 juga dilakukan dengan penambahan Al_5TiB . Dalam proses ini, pengambilan sampel dilakukan pada rentang 640, 660, 680, dan 700°C dengan variasi penambahan *grain refiner* Al_5TiB 0-0,2%. Data dan hasil pengujian fluiditas paduan ADC12 komersial yang ditambahkan Al_5TiB dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.7.

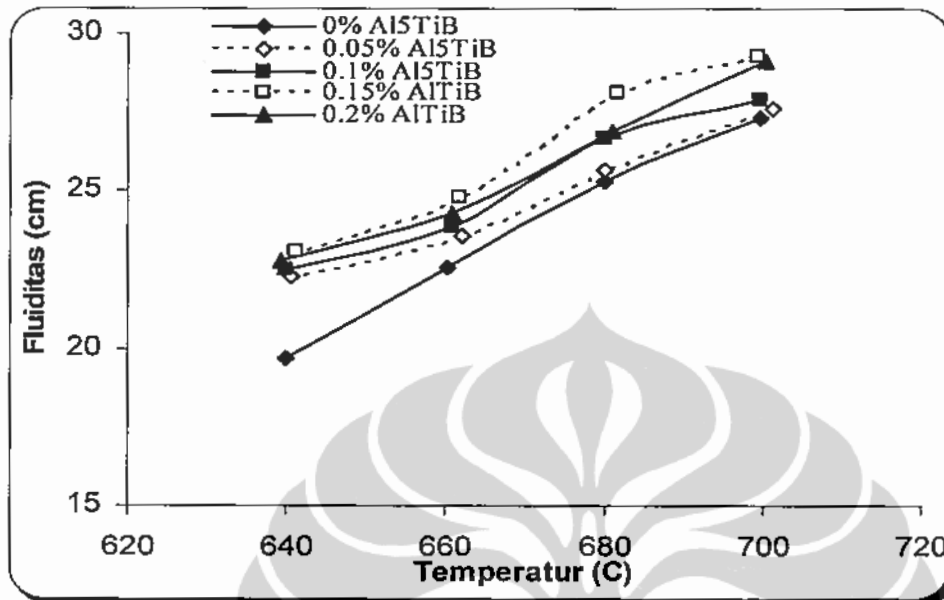
Tabel 4.6 Data pengujian nilai fluiditas aluminium paduan ADC 12 (100% *scrap*) dengan penambahan Al_5TiB yang bervariasi antara 0-0,2%

Paduan ADC12 komersial (% berat)									
0% Al_5TiB		0,05% Al_5TiB		0,1% Al_5TiB		0,15% Al_5TiB		0,2% Al_5TiB	
Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)
699,7	27,3	701,3	27,6	699,7	27,9	699,3	29,3	700,3	29,1
680,0	25,3	680,0	25,7	680,0	26,7	681,7	28,1	681,0	26,9
660,3	22,6	662,0	23,6	660,7	23,9	661,7	24,8	660,7	24,3
640,0	19,7	640,7	22,3	640,0	22,5	641,3	23,1	639,3	22,8

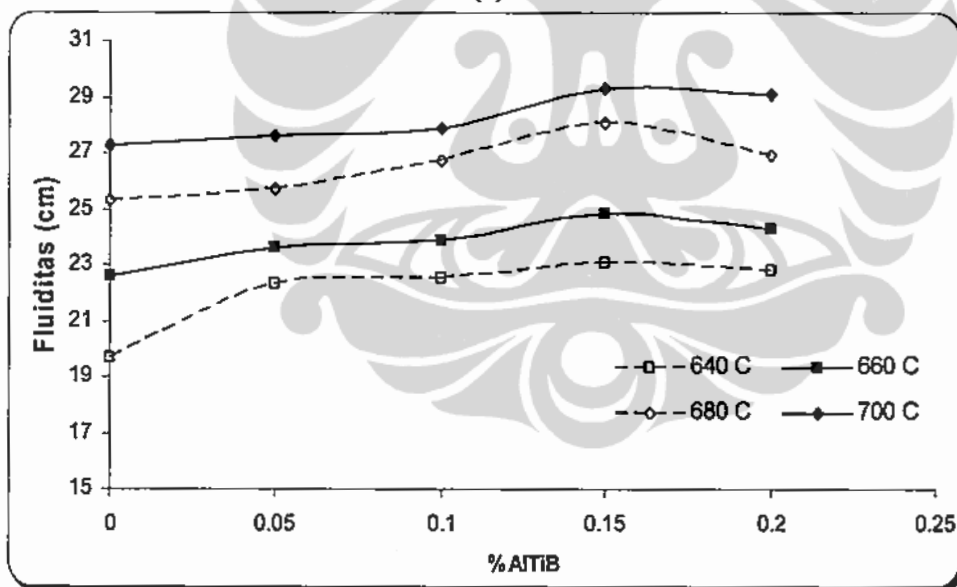
Fluiditas aluminium cair merupakan faktor kompleks yang dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya adalah temperatur tuang dan komposisi kimia. Penambahan *grain refiner* juga mempengaruhi nilai fluiditas paduan karena akan mengubah morfologi fasa yang ada pada struktur mikro paduan ADC12. Hasil

pengujian fluiditas pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa fluiditas aluminium akan meningkat seiring dengan penambahan *grain refiner* Al_5TiB sampai titik optimum tertentu, yaitu 0,15%. Selanjutnya, nilai fluiditas akan kembali menurun. Fenomena naiknya nilai fluiditas sebagai fungsi dari penambahan *grain refiner* ditelusuri dengan pengambilan sampel pada temperatur tuang paduan komersial ADC12 yang umum dipakai pada industri, yaitu $680^{\circ}C$. Gambar 4.7 juga mengindikasikan bahwa fluiditas paduan komersial ADC12 pada temperatur tuang $680^{\circ}C$ akan meningkat secara linear dari 25,4 cm sampai optimum pada penambahan Al_5TiB sebanyak 0,15% dengan panjang fluiditas 28,2 cm. Jika dibandingkan dengan hasil pengujian tanpa penambahan *grain refiner* (0% Al_5TiB), penambahan *grain refiner* sampai pada jumlah optimumnya (0,15% Al_5TiB) akan meningkatkan nilai fluiditas hingga 11%. Sementara itu, penambahan Al_5TiB yang berlebihan, yang dalam pengujian ini adalah 0,2%, memiliki efek negatif terhadap nilai fluiditas, yaitu menurunkan fluiditas hingga hanya memiliki panjang aliran 26,9 cm.

Temperatur yang tinggi erat kaitannya dengan kondisi peleburan aluminium cair yang akan kehilangan viskositasnya. Berat jenis aluminium cair akan menjadi lebih rendah ($2,3 \text{ g/cm}^3$) daripada kondisi padat ($2,7 \text{ g/cm}^3$) dan bervariasi di kenaikan temperatur sehingga kemudahan alirannya semakin tinggi. Selain itu dengan semakin tingginya temperatur, pergerakan atom akan semakin tinggi dibandingkan dengan atom-atom di temperatur rendah yang sudah memposisikan diri untuk membentuk suatu struktur kristal. Temperatur tinggi juga akan menurunkan tegangan permukaan logam cair. Akibatnya tekanan balik (*back pressure*) yang dihasilkan akan semakin rendah. Hal tersebut akan memberi efek positif terhadap peningkatan fluiditas.



(a)



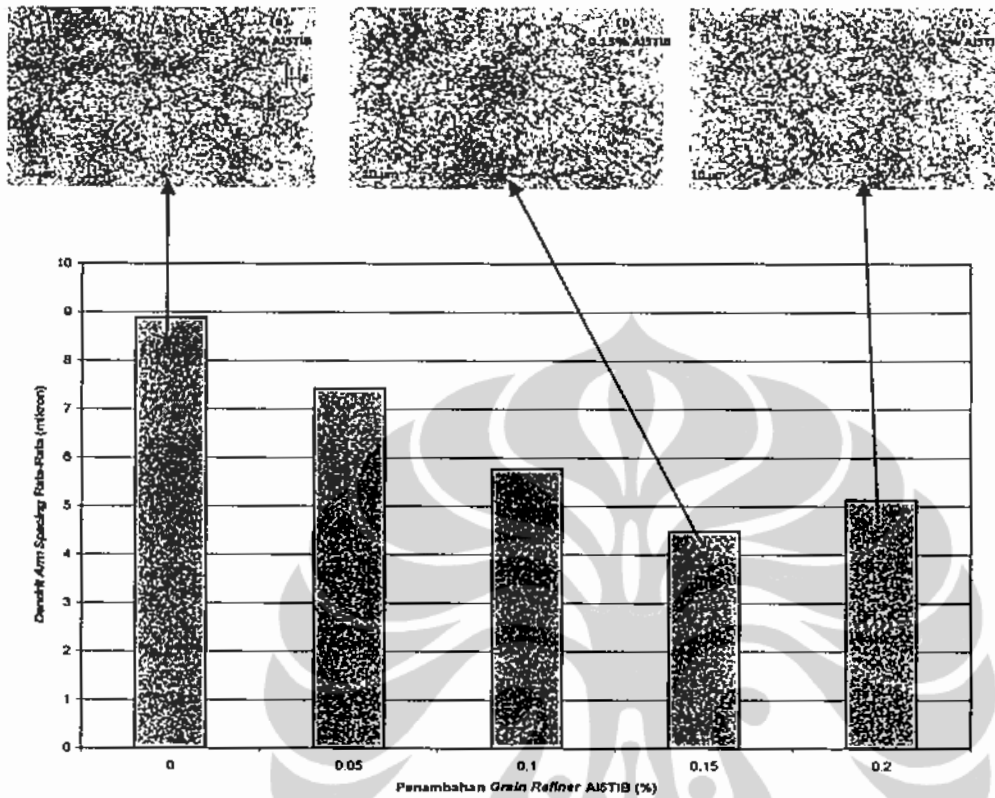
(b)

Gambar 4.7 (a) Hubungan temperatur dengan fluiditas dengan variasi penambahan Al_5TiB . (b) Hubungan variasi penambahan Al_5TiB terhadap nilai fluiditas

Bila ditinjau dari perpindahan panas, temperatur tuang yang lebih tinggi menunjukkan jumlah panas yang harus dikeluarkan lebih banyak untuk terjadinya proses pembekuan. Di dalam kondisi cetakan yang sama, aluminium dengan temperatur tuang tinggi akan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk

mentransfer panasnya. Akibatnya kondisi cair di dalam *channel* akan lebih lama dan akan memiliki kemampuan alir yang lebih tinggi. Penambahan *grain refiner* Al_5TiB juga memiliki pengaruh yang besar terhadap reduksi ukuran butir. Ukuran butir memiliki korelasi yang erat dengan ukuran DAS (*dendrite arm spacing*), dimana dengan semakin ukuran kecil butir maka ukuran DAS juga akan semakin kecil. Penambahan *grain refiner* sampai jumlah tertentu akan meningkatkan fluiditas dikarenakan *grain refiner* berperan dalam penghalusan ukuran butir dan DAS. Akibatnya, fraksi padat kritis yang diperlukan untuk terjadinya pembekuan akan semakin banyak, sehingga memungkinkan terjadinya jarak alir yang lebih tinggi. Dengan pemberian *grain refiner*, inti yang terbentuk akan semakin banyak sehingga butir yang dihasilkan selama proses solidifikasi akan semakin kecil.

Gambar 4.8 memperlihatkan pengaruh penambahan *grain refiner* terhadap ukuran butir DAS. Dapat dilihat bahwa hasil pengamatan struktur mikro secara umum menunjukkan struktur paduan komersial ADC12 terdiri atas 2 daerah, yaitu daerah yang berwarna terang merupakan fasa aluminium eutektik, sementara daerah gelap merupakan silikon eutektik. Struktur yang terbentuk menunjukkan bahwa material ini merupakan hasil *casting* karena hadirnya dendrit. Struktur mikro menunjukkan bahwa DAS akan semakin kecil dengan penambahan Al_5TiB sampai 0,15%, namun akan membesar kembali pada penambahan Al_5TiB 0,2%. Perhitungan kuantitatif DAS dapat digunakan sebagai salah satu metode untuk menggambarkan mekanisme penghalusan (*refinement*).^[71] Dalam penelitian ini, *software sigma scan* digunakan untuk mengukur besarnya DAS dengan menarik garis tegak lurus diantara dua garis tengah dendrit. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.7. Dari tabel ini dapat disimpulkan bahwa penambahan *grain refiner* Al_5TiB sampai jumlah optimal akan mereduksi ukuran butir hingga 50% dari 8,8 μm tanpa *grain refiner* hingga 4,5 μm dengan penambahan 0,15% *grain refiner* Al_5TiB pada paduan komersial ADC12 komposisi 100% *scrap*.



Gambar 4.8 Pengaruh penambahan *grain refiner* terhadap ukuran *dendrite arm spacing* pada temperatur tuang 680 °C.

Tabel 4.7 Hasil pengukuran DAS pada struktur mikro paduan komersial ADC12 dengan temperatur tuang 680 °C (satuan μm)

	0% Al ₅ TiB (A)	0,05% Al ₅ TiB (B)	0,1% Al ₅ TiB (C)	0,15% Al ₅ TiB (D)	0,2% Al ₅ TiB (E)
Titik 1	11,080	7,913	7,162	4,194	3,825
Titik 2	8,865	7,008	5,817	3,324	5,102
Titik 3	9,003	7,747	6,388	5,442	4,244
Titik 4	7,544	8,660	4,774	5,738	5,312
Titik 5	7,957	5,835	4,774	3,751	7,216
Rata-Rata besar butir	8,890	7,433	5,783	4,490	5,140

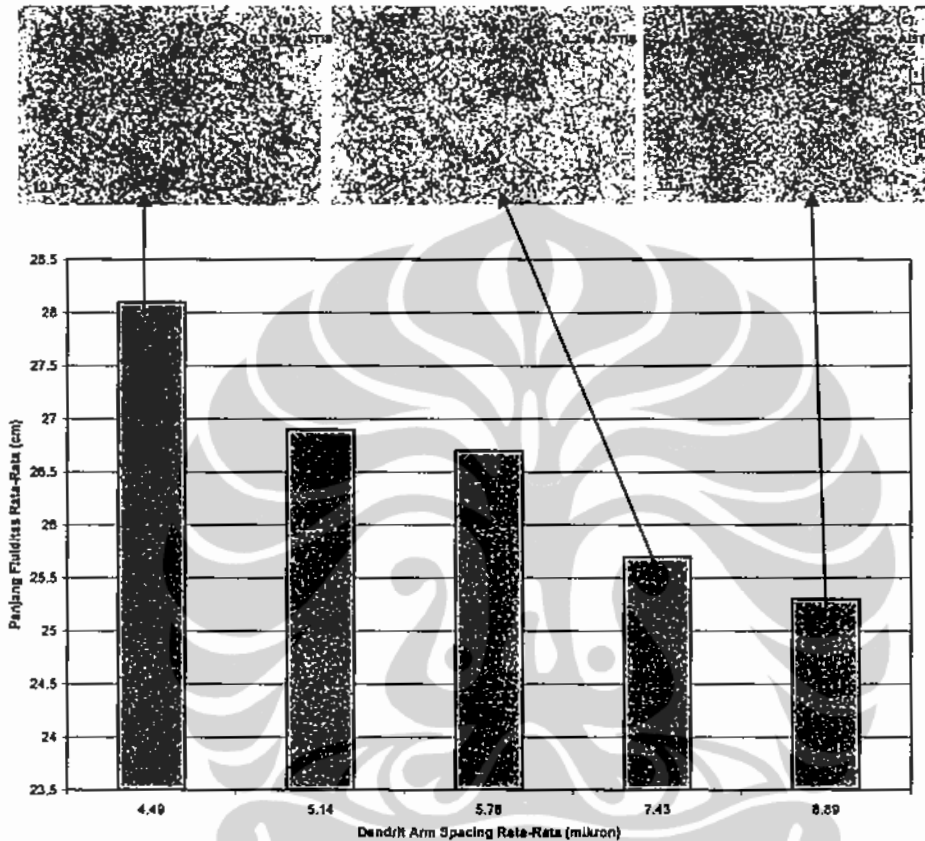
Material dengan butir atau DAS yang besar akan mencapai titik koherensi yang lebih cepat. Titik tersebut akan menunjukkan bahwa dendrit yang terbentuk sudah mengalami mekanisme *interlocking* sehingga membutuhkan energi yang relatif besar untuk melewatinya. Dengan DAS yang lebih kecil tentunya logam cair akan masih mungkin bergerak dengan rentang waktu yang lebih lama. Dengan penambahan *grain refiner*, maka besar butir, dendrit dan DAS yang terbentuk akan semakin kecil dan waktu yang diperlukan untuk terjadinya tumbukan antara satu dengan lainnya akan semakin lama sehingga logam cair akan terus mengalir.

Berdasarkan rangkaian pengujian yang telah dilakukan ini dapat terlihat adanya suatu korelasi antara penambahan *grain refiner*, ukuran DAS, dan fluiditas dari paduan komersial ADC12. Korelasi tersebut diperjelas melalui Gambar 4.9 yang memperlihatkan pengaruh ukuran DAS terhadap fluiditas pada temperatur tuang 680°C. Penambahan *grain refiner* sampai jumlah optimum 0,15% akan menghasilkan struktur yang lebih halus, yang ditandai dengan semakin kecil ukuran DAS yang mencapai nilai 4,5 µm, serta memiliki fluiditas yang tinggi yaitu 28,1 cm. Optimalitas *grain refiner* terhadap penghalusan butir dan DAS relatif sama dengan fluiditas yang juga terjadi akibat jumlah *nucleant* TiAl₃ dan TiB₂ di dalam aluminium cair cukup jumlahnya untuk menjadi aktif. Sebaliknya, *grain refiner* yang ditambahkan tidak lagi membentuk *nucleant* aktif yang akan menghaluskan ukuran butir dan DAS, namun akan menghasilkan inklusi.

Aluminium dalam rentang eutektik akan mengalami proses berhentinya aliran berdasarkan tumbukan antara dendrit atau butir kolumnar berhadapan yang tumbuh di sepanjang permukaan *channel* selama proses solidifikasi. Pemberian *grain refiner* akan berfungsi menambahkan inti yang ada di dalam aluminium cair yang disertai proses pertumbuhan yang lambat sehingga sedikit mengubah mode solidifikasi di rentang eutektik tersebut. Aliran akan terhenti dikarenakan tumbukan dendrit atau butir *equiaxed* yang tumbuh bebas di dalam aluminium cair. Dengan penambahan *grain refiner* maka besar butir, dendrit dan DAS yang terbentuk akan semakin kecil dan waktu yang diperlukan untuk terjadinya

Universitas Indonesia

tumbukan antara satu dengan lainnya akan semakin lama sehingga logam cair akan terus mengalir.



Gambar 4.9 Pengaruh ukuran *dendrite arm spacing* terhadap fluiditas pada temperatur tuang 680 °C

Material dengan butir atau DAS yang besar akan mencapai titik koherensi yang lebih cepat. Titik tersebut akan menunjukkan bahwa dendrit yang terbentuk sudah mengalami mekanisme *interlocking* sehingga membutuhkan energi yang relatif besar untuk melewatinya. Dengan DAS yang lebih kecil tentunya logam cair akan masih mungkin bergerak dengan rentang waktu yang lebih lama.

Berbagai penelitian yang telah dilakukan oleh berbagai peneliti mengenai pengaruh *grain refiner* terhadap fluiditas yang telah dilakukan merujuk pada suatu kesimpulan akhir yang berbeda-beda. Young Dong Kwon dan Zin-Hyong Lee^[23] dalam penelitiannya menyatakan bahwa penambahan *grain refiner*

Universitas Indonesia

0,03%Ti dari Al_5TiB pada Aluminium A356 (Al-Cu-Mn) akan meningkatkan fluiditas. Dijelaskan bahwa fenomena tersebut didasari oleh menurunnya ukuran dendrit pada ujung *channel* aliran akibat penambahan *grain refiner* sehingga fraksi padatan di ujung akan semakin sedikit dan mencapai waktu yang lama untuk mencapai fraksi padat kritis serta membuat aliran fluiditas semakin panjang. Pendapat yang serupa juga dikemukakan oleh A.M. Detomi dkk^[24] yang meneliti paduan aluminium Al-Mg terhadap penambahan *grain refiner* Al_5TiB dan AlTiC dimana kedua meningkatkan fluiditas, namun efek fluiditas yang diberikan AlTiC lebih tinggi daripada Al_5TiB . Meskipun demikian, ukuran butir aluminium dengan penambahan Al_5TiB lebih halus dibandingkan dengan AlTiC. A.K. Dahle dkk^[25] dalam penelitiannya juga menyatakan bahwa penambahan *grain refiner* Al_5TiB di atas 0,12% Ti akan menaikkan fluiditas pada paduan $AlSi_7Mg$ dan $AlSi_{11}Mg$ namun akan menurunkan fluiditas dengan penambahan di bawah 0,12 % Ti. Hal ini disebabkan karena penambahan *grain refiner* di atas 0,12% Ti akan menjadikan butir globular, bukan struktur dendrit yang bercabang, sehingga alirannya akan semakin panjang.

Dalam penelitian yang berbeda, A. K. Dahle dkk^[76] menyatakan bahwa penambahan *grain refiner* pada paduan $AlSi_7Mg$, $AlSi_{11}Mg$, $AlCu_2$, $AlCu_4$, $AlMg$ dan $AlMg_5$ akan memberikan efek yang berbeda berdasarkan jumlah *grain refiner* yang ditambahkan. Dengan kata lain, adanya rentang optimal penambahan *grain refiner*, dalam konteks ini Al_5TiB , pada tiap paduan. Secara umum, penambahan Al_5TiB di atas konsentrasi tertentu akan meningkatkan fluiditas dan koherensi fraksi solid. Hal ini berkaitan dengan mekanisme pemberhentian aliran melalui terbentuknya jaringan dendrit koheren di bagian ujung. Penambahan Al_5TiB di bawah konsentrasi tertentu akan menurunkan fluiditas dan koherensi. Akan tetapi penambahan Al_5TiB yang paling tinggi memberikan nilai fluiditas yang lebih rendah dari yang tidak diberi *grain refiner* tersebut. Hal ini terjadi karena kemungkinan bahwa aliran tidak berhenti setelah mencapai *dendrit coherency* dengan saat ditambahkan *grain refiner* di bawah level tertentu.

Hal yang serupa juga dibahas oleh S. Venkateswaran^[9] pada paduan aluminium eutektik dengan 11,4% silikon. Penambahan *grain refiner* titanium dari 2 – 10% akan menurunkan fluiditas.

Tidak adanya efek penambahan *grain refiner* terhadap fluiditas dibahas pada penelitian M.Tiryakioglu dkk.^[27] .Pengujian ini mengetengahkan paduan aluminium A319 dan A356 dengan metode pengujian spiral. Melalui pendekatan mode solidifikasi dijelaskan bahwa aluminium jenis tersebut merupakan hipoeutektik sehingga memiliki rentang pembekuan yang panjang. Karakteristik tersebut akan menghadirkan butir *equiaxed* yang terus terbawa sampai ujung aliran cairan logam dan menghasilkan penurunan terhadap nilai fluiditas. Kehadiran *grain refiner* akan memperburuk fluiditas dengan mempertinggi probabilitas terbentuknya butir *equiaxed*. Dengan kondisi paduan aluminium yang sudah membentuk butir *equiaxed*, penambahan *grain refiner* tidak memberikan efek yang signifikan. Namun penambahan *grain refiner* dalam rentang komposisi eutektik akan menurunkan nilai fluiditas karena mode solidifikasinya yang kolumnar.Hal yang sama juga diungkapkan oleh M. Sabatino dan L. Arnberg^[28] dalam penelitiannya pada aluminium paduan A356 dengan penambahan *grain refiner* Al₅TiB. Foto struktur mikro secara lengkap ditampilkan pada Lampiran C.

4.1.2.4 Validasi Alat Uji dengan Variasi Waktu *Degassing*

Proses degassing merupakan suatu perlakuan yang dilakukan terhadap aluminium cair dengan tujuan untuk mengeluarkan kandungan gas, khususnya hidrogen yang masuk ke dalam aluminium cair tersebut. Dengan semakin meningkatnya temperatur maka ikatan atom yang terjadi akan semakin lemah sehingga vibrasi atom lebih mudah terjadi. Hal ini akan menyebabkan viskositas dari cairan logam akan semakin rendah sehingga dengan viskositas yang rendah maka logam cair akan lebih mudah mengalir pada suatu saluran atau dengan kata lain cairan logam tersebut akan semakin jauh mengalir yang menandakan nilai fluiditasnya akan semakin tinggi. Namun perlu diperhatikan bahwa dengan meningkatnya temperatur tuang dari suatu aluminium akan meningkatkan

Universitas Indonesia

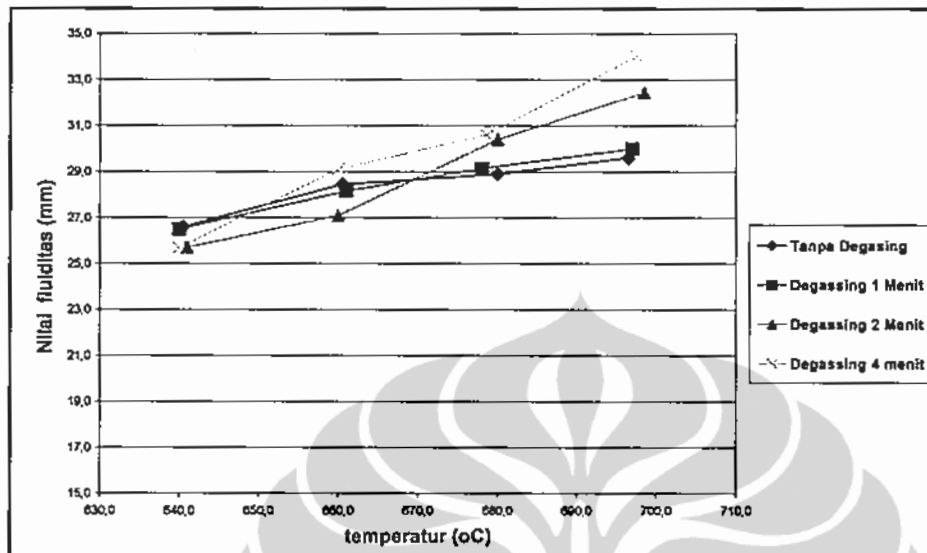
kandungan hidrogen yang terlarut. Kandungan hidrogen yang berlebih ini dapat menimbulkan cacat produksi seperti porositas, dan *shrinkage*. Cacat-cacat ini nantinya dapat menurunkan sifat mekanis dari aluminium tersebut. Untuk mengurangi atau menghindari cacat akibat gas tersebut maka dilakukan proses *degassing*.

Dari berbagai metode *degassing*, yang paling sering digunakan pada perkembangan di industri saat ini adalah metode *Gas Purging*. Metode ini menggunakan suatu gas inert, gas reaktif dan kombinasi dari keduanya dimana nantinya gas tersebut dimasukkan ke dalam aluminium cair untuk mengangkat gas-gas yang ada di dalam aluminium cair.

Semakin tinggi temperatur maka akan meningkatkan nilai fluiditas paduan komersial ADC12. Temperatur (derajat *superheat*) berhubungan dengan transfer panas pada saat logam cair mengalami penurunan temperatur. Data hasil pengujian fluiditas menggunakan paduan komersial ADC12 dengan variasi waktu *degassing* diberikan dalam Tabel 4.8, sedangkan grafik hubungan antara temperatur dan nilai fluiditas dengan berbagai variasi waktu *degassing* diberikan dalam Gambar 4.10. Foto struktur mikro paduan komersial ADC12 yang dilakukan perlakuan *degassing* secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran D.

Tabel 4.8 Data pengujian fluiditas *degassing* paduan komersial ADC12

Temperatur (°C)	Fluiditas (cm)			
	Tanpa degassing	1 menit	2 menit	4 menit
640	26,6	26,5	25,7	25,7
660	28,5	28,2	27,1	29,1
680	28,9	29,2	30,4	30,6
700	29,6	30,0	32,5	34,0



Gambar 4.10 Grafik hubungan antara temperatur dan nilai fluiditas dengan berbagai variasi waktu *degassing*

Dari Tabel 4.8 dan grafik pada Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan nilai fluiditas dari paduan komersial ADC12 seiring dengan kenaikan temperatur. Peristiwa tersebut hampir seluruhnya terjadi pada semua variabel waktu *degassing* yang ada dimana variabel tersebut terdiri dari 0, 1, 2, dan 4 menit *degassing*. Dari grafik juga terlihat semakin lama waktu *degassing* yang diberikan terhadap aluminium cair, maka nilai fluiditas dari cairan juga meningkat, artinya proses pengurangan gas akan berlangsung lebih sempurna dengan semakin lamanya waktu *degassing*. Nilai fluiditas paling tinggi didapatkan pada temperatur 700 °C yaitu sebesar 34 cm.

Feedability dari aluminium cair dapat dijadikan salah satu parameter mengapa terjadi penurunan nilai fluiditas pada aluminium dengan kadar hidrogen yang lebih tinggi. Paduan komersial ADC12 adalah termasuk ke dalam aluminium eutektik yang berarti aluminium cair akan memasuki cetakan dengan mekanisme *range* pembekuan pendek, dimana *feedability* yang dimiliki logam ini adalah jenis *liquid feeding* karena logam cair akan terus melaju seiring dengan pertumbuhan butir (butir *columnar*) pada dinding cetakan. Namun dengan

keberadaan dari paduan-paduan yang terkandung pada paduan komersial ADC12 ini akan menyebabkan kecenderungan untuk logam ini membeku dengan mekanisme *equiaxed grain*.^[77]

Pada saat aluminium cair membeku di daerah dindingnya, pembekuan diawali dengan pembentukan inti dan akan tumbuh membentuk dendrit. Daerah yang paling terakhir membeku adalah daerah di antara dendrit-dendrit tersebut, yang dinamakan daerah interdendritik. Pada daerah interdendritik ini akan terbentuk daerah antarmuka antara padat dan cair. Dengan adanya kandungan hidrogen di dalam aluminium cair, yang akan terkumpul pada daerah interdendritik tersebut dan karena kelarutan hidrogen pada fasa padat mengalami penurunan, maka kandungan hidrogen pada daerah interdendritik yang merupakan daerah terakhir membeku akan menyebabkan peningkatan konsentrasi hidrogen secara signifikan sehingga akan mudah membentuk gas hidrogen yang selanjutnya menyebabkan pori pada daerah tersebut^[78].

Daerah interdendritik juga merupakan daerah yang paling rentan terjadinya *shrinkage*. Hal ini disebabkan karena pada daerah ini akan membeku paling terakhir, sehingga akan menimbulkan volume kontraksi akibat sulitnya logam *feeding* untuk masuk ke dalam daerah tersebut. Untuk mencegah terjadi terjadinya *shrinkage*, logam cair akan mengalir pada daerah tersebut sebagai logam *feeding* (pengisi). *Shrinkage* ini akan membantu hidrogen yang terkumpul tadi agar terbentuk poros yang stabil. Oleh karena kandungan hidrogen akan semakin besar ketika proses *degassing* tidak dilakukan secara efisien atau bahkan tidak dilakukan, maka resiko terjadinya *shrinkage* juga akan semakin tinggi pada logam cair. Akibat adanya aliran pengisian ke daerah interdendritik inilah yang menyebabkan aliran logam cair sedikit terhenti pada saat mengisi cetakan, yang pada akhirnya hal ini akan menghambat aliran aluminium cair tersebut dan menyebabkan fluiditas mengalami penurunan.

Hal ini sesuai dengan hasil yang didapatkan oleh Jeongmin Kim^[79] di mana kandungan gas yang tinggi akan merangsang terjadinya porositas. Porositas ini dapat menghambat aliran logam *feeding* untuk mengisi daerah interdendritik, dimana di daerah ini rentan terhadap kontraksi volume yang menyebabkan

Universitas Indonesia

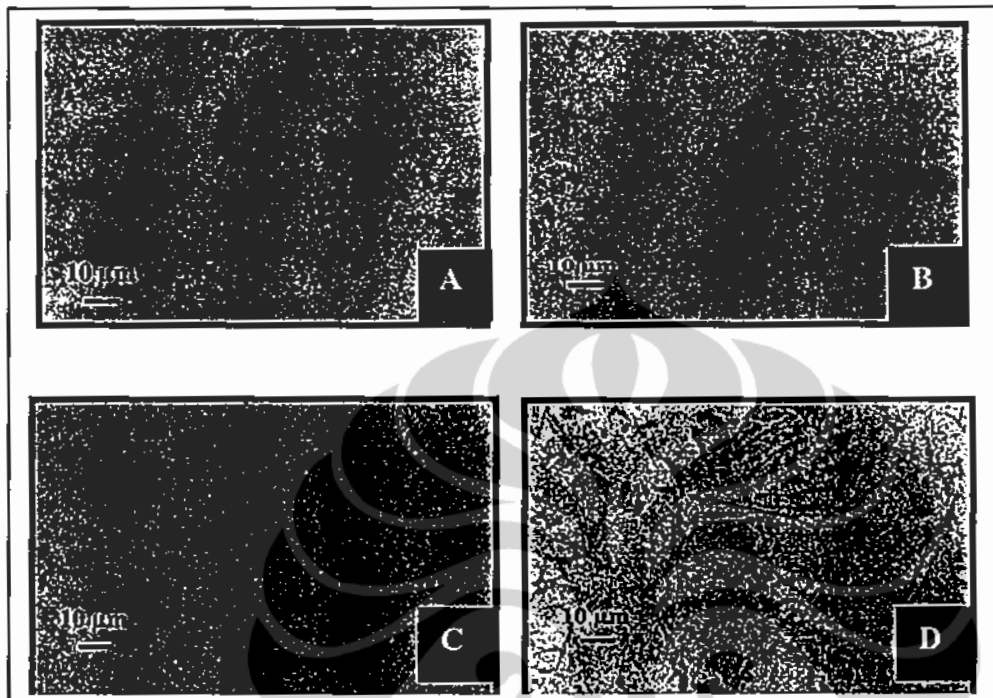
shrinkage. Oleh karena penghambatan itu maka aliran logam pada cetakan akan terhambat pula. Pada penelitian lain, M.Di Sabatino^[28] mengatakan bahwa keberadaan hidrogen di dalam aluminium tuang tidak memberikan efek yang signifikan. Namun keberadaan hidrogen tersebut akan sangat berpengaruh terhadap terbentuknya porositas. Semakin banyak hidrogen yang terlarut, semakin banyak porositas yang terbentuk.

Penelitian yang dilakukan oleh S.Shivkumar dkk^[80] menjelaskan bahwa dengan bertambahnya kadar hidrogen di dalam suatu logam cair maka volume kontraksi pada daerah dendritik akan mengalami peningkatan juga, yang berarti pada daerah ini akan meningkatkan resiko terjadinya *shrinkage*. Hal ini menyebabkan dibutuhkan suatu logam *feeding* yang lebih banyak untuk mengkompensasi terjadinya *shrinkage* tersebut. Peningkatan jumlah logam *feeding* inilah yang akan menyebabkan logam volume fraksi fasa cair pada logam berkurang dan pembekuan akan lebih cepat terjadi. Yang berarti bila dihubungkan dengan fluiditas, maka logam akan lebih cepat berhenti.

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh J. Kajornchaiyakul, dkk.^[81] Mendapatkan bahwa nilai fluiditas dengan metode spiral akan semakin menurun dengan semakin banyaknya kadar oksigen terlarut dan jumlah porositas pada temperatur penuangan 680°C. Namun ketika dilakukan pada temperatur 780°C pengaruh dari hidrogen ini tidak terlalu tampak terhadap fluiditas.

Argon merupakan gas inert yang tidak bisa bereaksi dengan gas lain. Karena itu, mekanisme yang sebenarnya terjadi, gas-gas hidrogen tersebut terjebak aliran gas argon akibat adanya perbedaan tekanan. Semakin lama waktu *degassing*, akan memberikan kesempatan lebih banyak dalam proses pengurangan gas hidrogen. Teknik pemberian dan ukuran pipa aliran gas sangat penting dalam proses *degassing*.

Pengamatan struktur mikro dengan variasi waktu *degassing* dan pada temperatur yang sama yaitu pada temperatur 700°C seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11 di bawah ini :



Gambar 4.11 Struktur Mikro dengan variabel waktu degassing pada temperatur 700°C
 : a. tanpa *degassing*; b. 1 menit *degassing* ; c. 2 menit *degassing* ;
 d. 4 menit *degassing*

Struktur mikro pada Gambar 4.11 menunjukkan bahwa semakin lama waktu *degassing* yang dilakukan, tampak porositas yang terjadi semakin sedikit. Ini bisa disebabkan karena semakin lama waktu *degassing* maka hidrogen yang terangkat akan semakin banyak, dan pada akhirnya porositas yang terbentuk akan semakin berkurang. Ini sesuai dengan literatur dimana dengan semakin meningkatnya kandungan hidrogen yang terlarut maka akan semakin besar pula resiko terbentuknya porositas. Pada gambar-gambar tersebut juga terlihat bahwa sebagian besar terlihat adanya struktur silikon (yang berwarna gelap dan berbentuk jarum) dan aluminium (berwarna terang). Silikon yang berbentuk tajam ini menyebabkan terdapat konsentrasi tegangan pada kedua ujungnya, hal ini akan mengakibatkan sifat mekanisnya tidak terlalu baik.

Dari serangkaian pengujian validasi terhadap alat uji fluiditas metode vakum yang telah dilakukan dapat dikatakan bahwa alat uji fluiditas metode

vakum ini teruji untuk digunakan sebagai alat uji fluiditas logam, baik untuk skala penelitian ataupun digunakan pada industri, karena data hasil pengujian memperlihatkan kecenderungan yang sama dari literatur yang ada. Dalam rangka meneliti pengaruh unsur Fe dan Sr terhadap pembentukan intermetalik Al-Fe-Si dan nilai fluiditas, maka pada penelitian ini adalah dibuat *master alloy* paduan aluminium silikon.

4.1.3 Pembuatan *Master Alloy* Al-7% Si dan Al-11% Si

Pada pengujian validasi alat uji fluiditas metode vakum, material yang digunakan adalah paduan komersial ADC12 yang mana selain mengandung Al dan Si, juga mengandung beberapa unsur lainnya seperti Fe (besi). Unsur Fe ini akan berikatan dengan Al-Si membentuk senyawa intermetalik yang akan menurunkan nilai fluiditas dari paduan. Untuk melihat sejauh mana pengaruh Fe pada paduan aluminium silikon, maka dilakukan rekayasa penambahan Fe pada paduan yang hanya mengandung aluminium dan silikon yang disebut dengan *master alloy*. Untuk itu dilakukan proses pengecoran atau pembuatan *master alloy* (paduan Al-7% Si dan Al-11% Si). Gambar 4.12. menunjukkan ingot hasil pengecoran *master alloy* paduan Al-7% Si dan Al-11% Si.

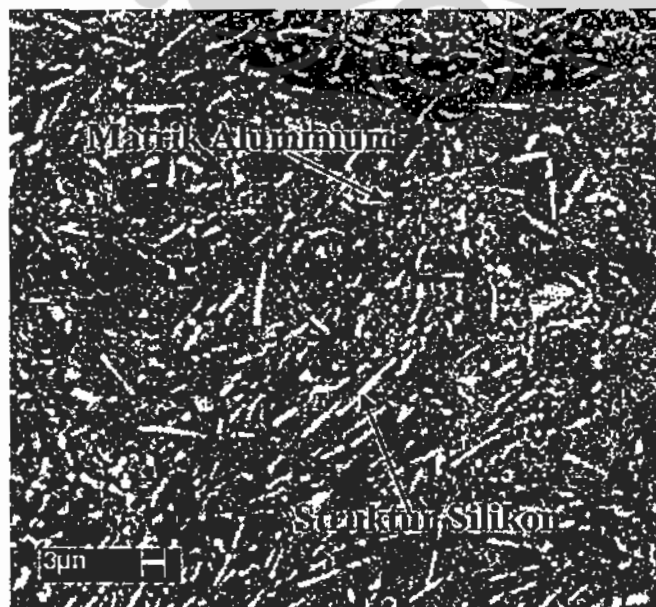


Gambar 4.12 Batangan *master alloy* aluminium silikon (Al-7% Si dan Al-11% Si)

Pada saat pembuatan *master alloy* ini dilakukan pengujian komposisi kimia menggunakan alat *spektrometer* dan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dengan hasil yang dapat dilihat seperti pada Tabel 4.9 dan Gambar 4.13. Dari hasil pengujian komposisi kimia *master alloy* Al-7% Si, didapat kandungan silikon rata-rata 7,03% dan mengandung sejumlah kecil Fe (0,13%) dan unsur lainnya. Dari kandungan silikon yang didapat, yaitu sebesar 7,03%, hasil pengecoran sudah sesuai dengan target yang diinginkan pada perhitungan *material balance* yaitu *master alloy* yang mengandung $\pm 7\%$ Si yang disebut Paduan Aluminium Silikon Hipoeutektik (Al-7% Si).

Tabel 4.9 Komposisi kimia *Master Alloy* hipoeutektik Al-7%Si

	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ti	Sn	Pb	Ca	P
1.	92,777	7,0059	0,1309	0,0501	0,0011	0,0015	0,0100	0,0087	0,0129	0,0012	0,0003
2.	92,828	6,9611	0,1297	0,0501	0,0011	0,0015	0,0094	0,0077	0,0103	0,0012	0
3.	92,656	7,1232	0,1336	0,0501	0,0011	0,0015	0,0099	0,0095	0,0136	0,0012	0,0002
Ave	92,754	7,0301	0,1314	0,0501	0,0011	0,0015	0,0098	0,0086	0,0123	0,0012	0,0002



Gambar 4.13 Foto struktur mikro *master alloy* hipoeutektik (Al-7% Si)

Universitas Indonesia

Dari foto struktur mikro pada Gambar 4.13 terlihat struktur mikro *master alloy* hipoeutektik (Al-7% Si) terdiri dari matrik aluminium yang berwarna gelap dan struktur silikon yang berwarna terang berbentuk jarum. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik. Secara kuantitatif ukuran dan jumlah fasa yang ada tidak dihitung.

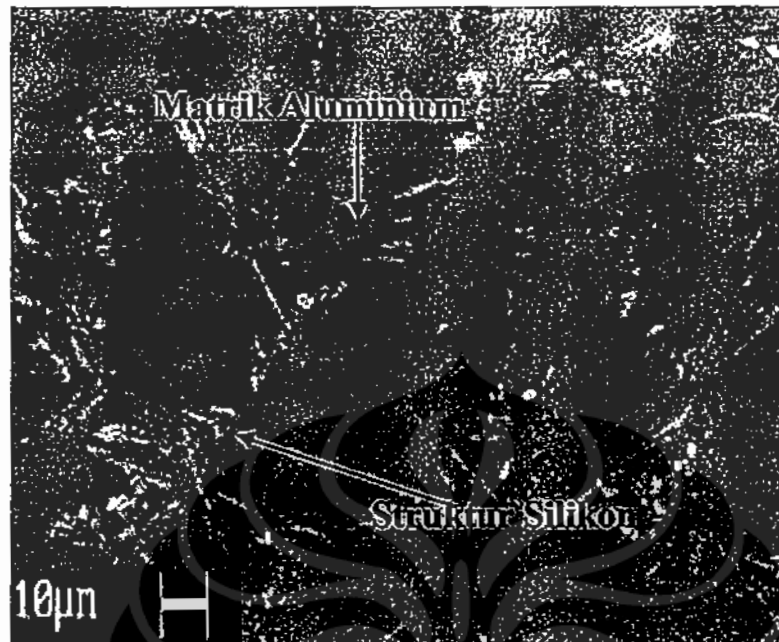
Hasil pengujian komposisi kimia untuk *master alloy* eutektik dapat kita lihat pada Tabel 4.10. Dari hasil pengujian komposisi kimia *master alloy* Al-11%Si, didapat kandungan silikon rata-rata 11,18% dan mengandung sejumlah kecil Fe (0,17%) dan unsur lainnya.

Dari kandungan silikon yang didapat hasil pengecoran sesuai dengan target yang diinginkan yaitu *master alloy* yang mengandung $\pm 11\%$ Si yang disebut Paduan Aluminium Silikon Eutektik (Al-11% Si).

Tabel 4.10 Komposisi *Master Alloy* eutektik Al-11% Si

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
N=1	88,553	11,164	0,1682	0,0500	0,0000	0,0070	0,0015	0,0040
N=2	88,416	11,300	0,1691	0,0500	0,0000	0,0058	0,0015	0,0057
N=3	88,652	11,085	0,1639	0,0501	0,0000	0,0014	0,0015	0,0000
Rata-Rata	88,540	11,183	0,1671	0,0500	0,0000	0,0047	0,0015	0,0032
	Ti	Ni	Sn	Pb	Na	Ca	Sr	P
N=1	0,0169	0,0000	0,0158	0,0177	0,0002	0,0013	0,0001	0,0000
N=2	0,0169	0,0000	0,0153	0,0180	0,0002	0,0013	0,0001	0,0000
N=3	0,0165	0,0000	0,0127	0,0150	0,0001	0,0012	0,0001	0,0000
Rata-Rata	0,0168	0,0000	0,0146	0,0169	0,0002	0,0013	0,0001	0,0000

Pada Gambar 4.14 dapat terlihat hasil foto struktur mikro dari *master alloy* paduan eutektik. Dapat dilihat bahwa fasa terdiri dari struktur silikon yang berwarna terang berbentuk jarum dan matriks aluminium silikon yang berwarna gelap.



Gambar 4.14 Foto struktur mikro *master alloy* eutektik (Al-11% Si)

Berdasarkan hasil pembuatan *master alloy* dan hasil pengujian (komposisi kimia dan foto struktur mikro) dapat disimpulkan bahwa material *master alloy* yang dihasilkan sudah sesuai dengan perencanaan dan dapat digunakan sebagai material untuk penelitian selanjutnya, dimana *master alloy* ini akan direkayasa dengan menambahkan Fe. Selanjutnya *master alloy* aluminium silikon (paduan hipoeutektik dan paduan eutektik) yang telah mengandung Fe dengan kadar tertentu, dilakukan penambahan *modifier* Sr dan melihat pengaruh penambahan tersebut terhadap struktur mikro paduan secara kuantitatif dan kualitatif, serta nilai fluiditasnya dengan menggunakan alat uji fluiditas metode vakum yang sudah divalidasi sebelumnya. Untuk pengujian struktur mikro dilakukan dengan menggunakan alat SEM/EDX dan TEM

4.2 Komposisi Kimia, Pengukuran Nilai Fluiditas, dan Karakterisasi Struktur Mikro Paduan Aluminium Silikon Hipoeutektik (Al-7% Si) dan Paduan Eutektik (Al-11% Si)

4.2.1 Paduan Aluminium Silikon Hipoeutektik (Al-7% Si)

4.2.1.1 Pengujian Komposisi Kimia Pada Paduan Al-7% Si

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan alat *Metal Analysis Spectrometer* untuk mengetahui komposisi dari paduan setelah ditambahkan Fe. *Master alloy* ditambahkan Fe sesuai dengan komposisi kimia target yang didapatkan dari hasil perhitungan *material balance*. Pada proses peleburan, *master alloy* di tambahkan Fe sesuai dengan target, kemudian diambil sampel untuk uji komposisi. Fe ditambahkan berupa hasil gerusan yang dibungkus *aluminium foil* sehingga diharapkan penambahan tersebut berlangsung sempurna dan sesuai dengan yang diinginkan. Contoh hasil pengujian komposisi kimia pada Tabel 4.11, adalah hasil uji komposisi kimia dari *master alloy* hipoeutektik (Al-7% Si) yang ditambahkan Fe sebesar 1,4%.

Tabel 4.11 Komposisi Kimia Paduan Aluminium Hipoeutektik (Al-7% Si) + 1,4% Fe

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Cu	Mn
N=1	0,2427	7,7742	0,00215	0	1,4117	0,2427	0,00395
N=2	0,0029	8,0926	0,00215	0	1,3400	0,0029	0,00175
Average	0,1228	7,9334	0,00215	0	1,3758	0,1228	0,00285
	Ti	Pb	Sn	Cr	Ca	Al	P
N=1	0,00589	0,00042	0,00662	0,00182	0,00028	90,516	0
N=2	0,00469	0,00042	0,00662	0,00085	0,00023	90,514	0
Average	0,00529	0,00042	0,00662	0,00134	0,00025	90,515	0

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa nilai rata-rata Fe hasil pengujian komposisi kimia yaitu sebesar 1,375% dan Si sebesar 7,933%, artinya memenuhi target komposisi kimia yang diinginkan yaitu penambahan 1,4% Fe. Pada paduan ini kemudian dilakukan pengujian fluiditas dan pengujian untuk melihat struktur mikro (SEM/EDX)

Kemudian pada paduan aluminium silikon hipoeutektik (Al-7% Si) yang mengandung 1,4% Fe ditambahkan Sr sebagai *modifier* sebesar 0,015% dan dilakukan pengujian komposisi kimia, seperti terlihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Komposisi Kimia Paduan Al-7% Si + 1,4% Fe + 0,015% Sr

	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Cr
1.	91,643	7,0059	1,412	0,000<	0,0011	0,0015
2.	91,502	6,9611	1,407	0,000<	0,0011	0,0015
3.	91,538	7,0032	1,411	0,000<	0,0011	0,0015
Ave	90,515	6,99007	1,41	0,000<	0,0011	0,0015
	Ti	Sn	Pb	Ca	P	Sr
1.	0,01	0,0087	0,00042	0,0012	0,0003	0,016
2.	0,0094	0,0077	0,00042	0,0012	0	0,017
3.	0,0099	0,0095	0,00042	0,0012	0,0002	0,014
Ave	0,00977	0,00863	0,00042	0,0012	0,00017	0,01567

Dari hasil pengujian komposisi kimia didapat nilai rata-rata Si, Fe dan Sr adalah sebesar 6,99%, 1,41% dan 0,015%, artinya kadar Fe dan Sr yang didapatkan sesuai dengan target komposisi kimia *material balance*, yaitu 1,4% Fe dan 0,015% Sr. Tabel uji komposisi ditampilkan pada lampiran E

4.2.1.2. Pengujian Fluiditas pada Paduan Aluminium Hipoeutektik (Al-7% Si)

Pengujian fluiditas dilakukan setelah komposisi kimia yang diinginkan telah sesuai dengan target komposisi yang diinginkan dalam proses penelitian ini.

Pengujian fluiditas menggunakan alat uji fluiditas metode vakum yang telah divalidasi sebelumnya.

Dari serangkaian pengujian yang dilakukan pada paduan aluminium hipoeutektik (tanpa dan dengan penambahan *modifier* Sr) ditampilkan pada Tabel 4.13 dan Tabel 4.14. Pada Tabel 4.13 adalah data hasil pengujian fluiditas pada paduan Al-7%Si tanpa ditambahkan *modifier* Sr.

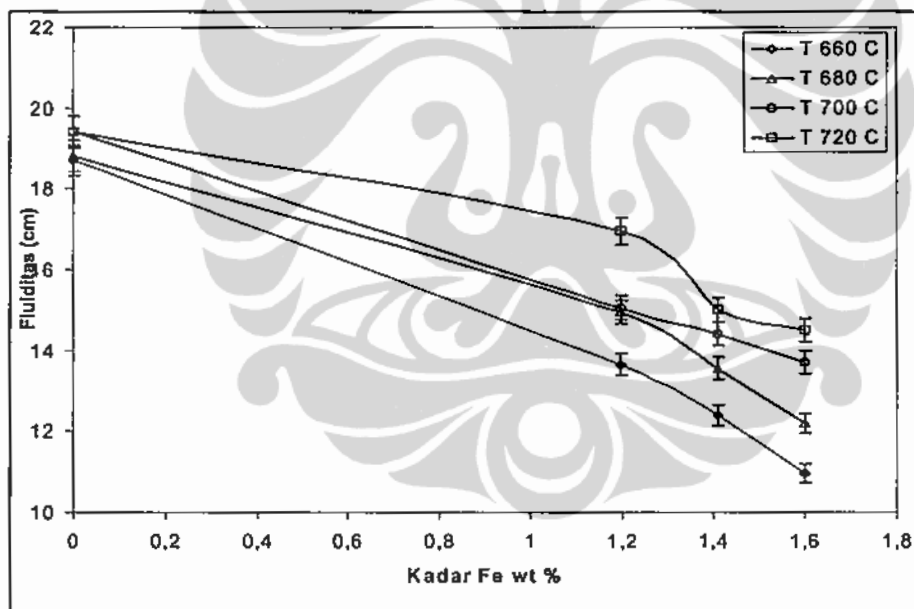
Tabel 4.13 Hasil Pengujian Fluiditas Paduan Al-7% Si tanpa Fe dan *modifier* Sr

Sampel uji	Temperatur (°C)	Temperatur rata – rata (°C)	Panjang kawat (cm)	Panjang kosong (cm)	Nilai Fluidita (cm)	Fluiditas rata-rata (cm)
1	722	720	80,5	60	20,5	19,4
2	720		80,2	61,8	18,4	
3	701	700	80,2	57,4	22,8	19,4
4	700		80,2	64,2	16	
5	638	680	80,2	55,5	24,7	18,8
6	680		80,5	67,5	13	
7	663	660	80,3	59,7	20,6	18,7
8	661		80,3	63,5	16,8	

Dari hasil pengujian fluiditas yang dilakukan, terlihat semakin tinggi temperatur (derajat *superheat*) menghasilkan nilai fluiditas yang semakin baik, karena temperatur memiliki hubungan yang linear terhadap nilai fluiditas. Nilai fluiditas paling rendah dan paling tinggi didapat pada temperatur 660°C dan 720°C yaitu sebesar 18,7 cm dan 19,45 cm, artinya terjadi kenaikan nilai fluiditas sebesar 7,5%. Temperatur (derajat *superheat*) tersebut menentukan efek fundamental proses solidifikasi dalam mengendalikan durasi aliran, yaitu berupa kuantitas panas yang dilepas sebelum proses solidifikasi.

Tabel 4.14 Hasil pengujian fluiditas pada paduan aluminium silikon hipoeutektik yang ditambahkan Fe dengan kadar 0; 1,2; 1,4%, dan 1,6 %

Paduan Aluminium Silikon Hipoeutektik (Al-7 %Si)							
0 % Fe		1,2 % Fe		1.4 % Fe		1,6 % Fe	
Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)
660	18,7	660	13,65	660	12,40	660	10,95
680	18,8	680	14,95	680	13,55	680	12,25
700	19,4	700	15,05	700	14,4	700	13,7
720	19,4	720	16,95	720	15	720	14,5



Gambar 4.15 Hubungan antara kadar Fe dengan nilai fluiditas pada paduan hipoeutektik dengan variasi temperatur

Pada Tabel 4.14 dan Gambar 4.15, diperlihatkan data dan grafik hasil pengujian nilai fluiditas paduan aluminium silikon hipoeutektik (Al-7% Si) yang ditambahkan Fe dengan kadar 1,2%; 1,4% dan 1,6%. Dari tabel dan gambar tersebut, terlihat seiring dengan peningkatan temperatur tuang, akan didapat nilai

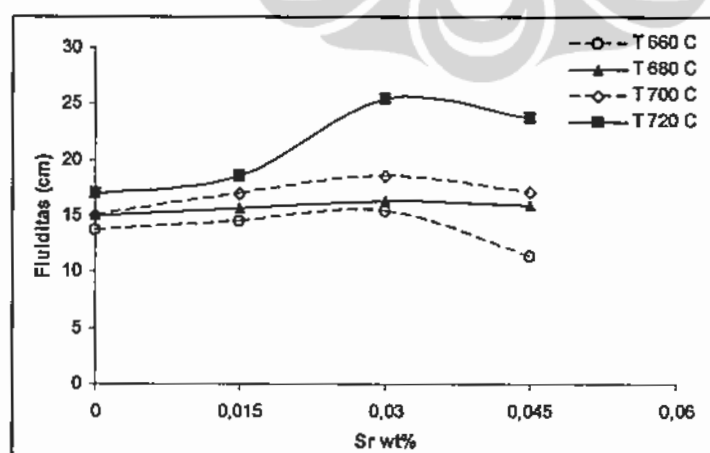
fluiditas yang makin tinggi pula, sedangkan semakin tinggi kandungan Fe yang ditambahkan pada paduan maka nilai fluiditasnya semakin turun. Penurunan nilai fluiditas menunjukkan nilai yang cukup berarti. Penambahan Fe sebesar 1,2% pada temperatur 660 °C menurunkan nilai fluiditas menjadi 13,65 cm. Dengan kadar Fe yang semakin besar yaitu 1,4 dan 1,6% maka nilai fluiditas akan semakin turun menjadi 12,4 dan 10,95 cm . Demikian juga pada kondisi temperatur 680, 700 , dan 720⁰C memperlihatkan hasil dengan kecendrungan yang sama.

Pada paduan dengan temperatur tuang yang lebih tinggi akan lebih lama berada dalam fasa cair jika dibandingkan dengan paduan yang mempunyai temperatur tuang lebih rendah sehingga fluiditas akan meningkat. Semakin tinggi temperatur akan menyebabkan ikatan atom akan semakin melemah (merenggang) sehingga gaya interaksi antar atom akan menurun, hal tersebut akan menyebabkan kemampuan alir dari material akan meningkat. Kandungan Fe yang semakin tinggi pada paduan menyebabkan semakin meningkatkan kuantitas fasa intermetalik pada paduan. Hal tersebut akan menyebabkan penurunan kemampuan alir dari cairan paduan . Dengan semakin meningkatnya kadar Fe pada paduan aluminium silikon hipoeutektik maka nilai fluiditas akan semakin rendah. Untuk memperbaiki sifat mampu alir dan meningkatkan nilai fluiditas paduan aluminium dapat dilakukan dengan memodifikasi intermetalik dengan menambahkan *modifier* Sr.

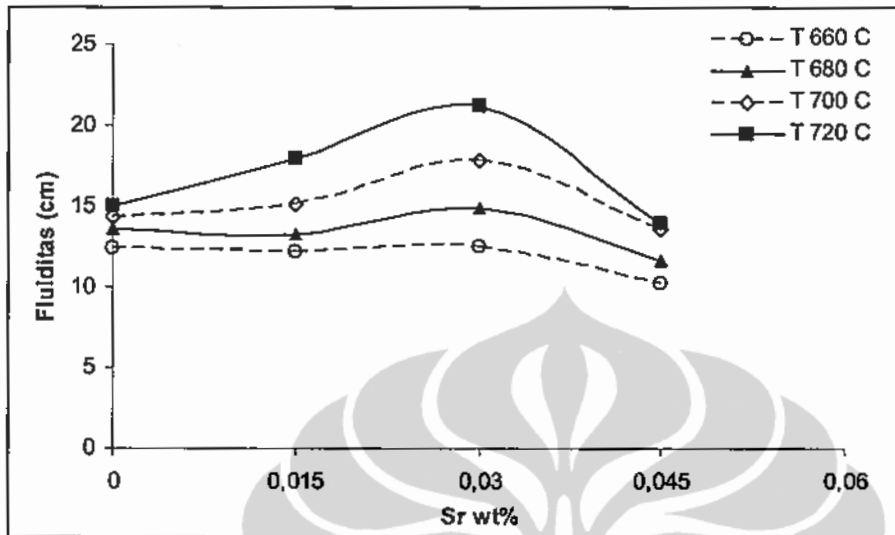
Pada paduan aluminium silikon hipoeutektik yang sebelumnya telah dilakukan rekayasa penambahan Fe, kemudian dilakukan penambahan *modifier* Sr dengan kadar 0,015; 0,03 dan 0,045% dengan variabel temperatur tuang pengujian 660, 680, 700, dan 720⁰C diperoleh nilai fluiditas paduan seperti pada Tabel 4.15 dan grafik pada Gambar 4.16, 4.17, dan 4.18 berikut ini :

Tabel 4.15 Hasil pengujian fluiditas pada paduan aluminium silikon hipoeutektik yang ditambahkan Fe dan Sr

Paduan Aluminium Silikon Hipoeutektik (Al-7% Si)					
1,2%Fe + 0,015%Sr		1,4%Fe + 0,015%Sr		1,6%Fe + 0,015%Sr	
Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)
660	14,5	660	12,15	660	11,55
680	15,65	680	13,3	680	13,65
700	16,95	700	15,1	700	14,7
720	18,5	720	17,9	720	15,45
1,2%Fe + 0,03%Sr		1,4%Fe + 0,03%Sr		1,6%Fe + 0,03%Sr	
Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)
660	15,4	660	12,55	660	12,35
680	16,25	680	14,9	680	14,6
700	18,55	700	17,85	700	15,75
720	25,5	720	21,15	720	17,25
1,2%Fe + 0,045%Sr		1,4%Fe + 0,045%Sr		1,6%Fe + 0,045%Sr	
Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)	Temp (°C)	Fluidity (cm)
660	11,4	660	10,25	660	10,15
680	15,9	680	11,65	680	11
700	17,05	700	13,6	700	12,5
720	23,75	720 </td <td>13,95</td> <td>720</td> <td>13,75</td>	13,95	720	13,75

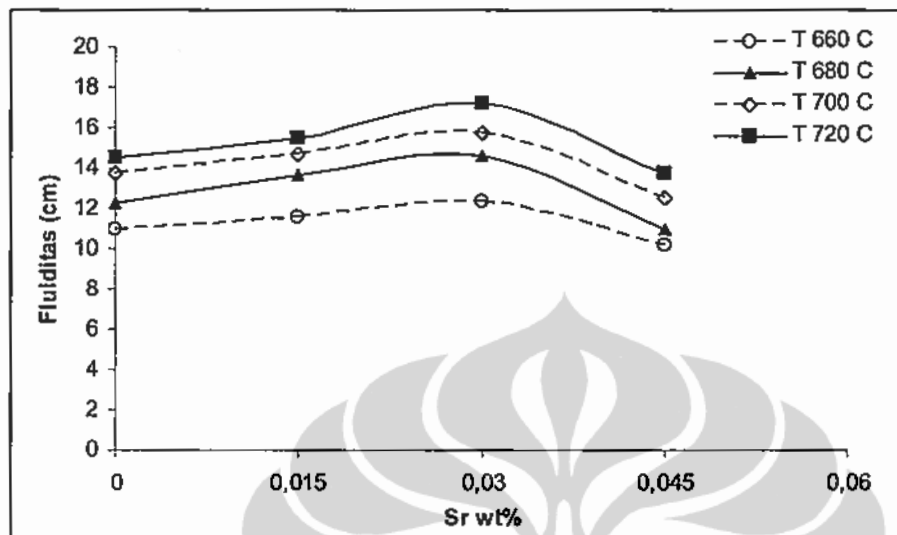


Gambar 4.16 Hubungan antara temperatur tuang terhadap nilai fluiditas pada tiap variasi penambahan *modifier* stronsium pada 1,2% Fe



Gambar 4.17 Hubungan antara temperatur tuang terhadap nilai fluiditas pada tiap variasi penambahan *modifier* stronsium pada 1,4% Fe

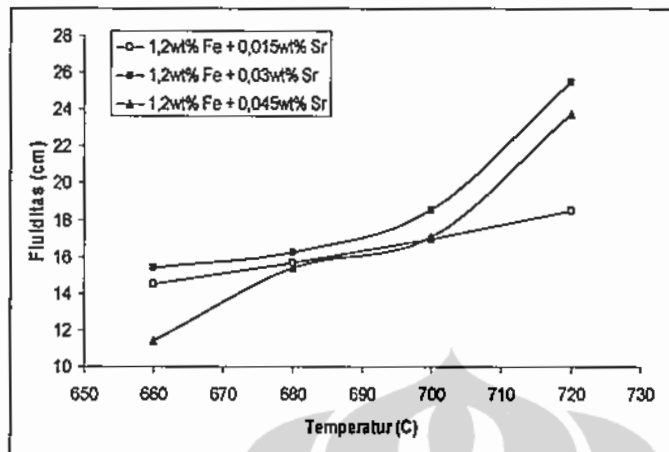
Pada paduan hipoeutektik yang diberi pengotor 1,2% Fe, didapat nilai fluiditas yang semakin bertambah seiring dengan penambahan Sr. Hal ini disebabkan oleh penurunan temperatur *liquidus* seiring dengan penambahan Sr. Pada paduan hipoeutektik yang diberi pengotor 1,4% Fe, diperoleh nilai fluiditas yang menurun pada penambahan 0,015% Sr, dimana paduan belum termodifikasi seluruhnya (*partially modified*). Nilai fluiditas akan meningkat pada penambahan 0,03% Sr, dan akan menurun kembali pada penambahan 0,045% Sr. Hal tersebut menunjukkan penambahan 0,03% Sr pada paduan, sudah cukup untuk memodifikasi silikon primer menjadi lebih bulat dan mengubah morfologi fasa intermetalik yang sebelumnya berbentuk jarum-jarum panjang menjadi lebih pendek sehingga meningkatkan fluiditas dari paduan. Nilai fluiditas minimum didapat pada penambahan *modifier* Sr sebesar 0,045%, dalam hal ini kemungkinan besar paduan telah mengalami *overmodified* (modifikasi berlebih), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.18



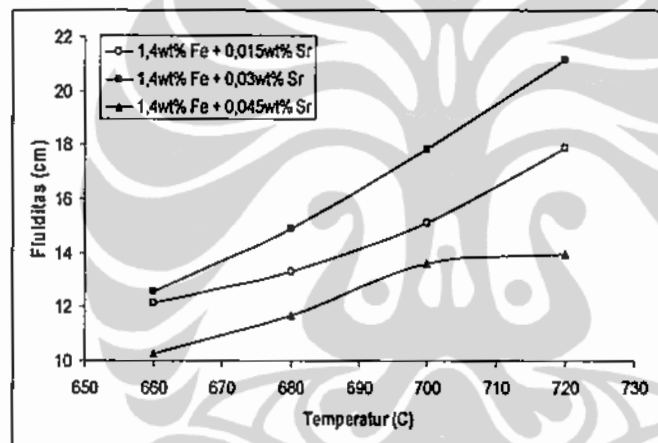
Gambar 4.18 Hubungan antara temperatur tuang terhadap nilai fluiditas pada tiap variasi penambahan *modifier* stronsium pada 1,6wt % Fe

Penelitian yang dilakukan oleh S.Gowri dan F.H. Samuel^[13] menunjukkan bahwa peningkatan kadar Fe dapat menurunkan nilai fluiditas aluminium cair, tanpa mengakibatkan perubahan tegangan permukaan yang signifikan akibat meningkatnya jumlah fasa-fasa Fe yang tidak larut (*insoluble*). Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Warmuzek dkk^[16] diperoleh bahwa peningkatan kandungan Fe serta unsur-unsur lainnya seperti Mn dan Cr dapat menyebabkan naiknya temperatur *liquidus* pada paduan Al-Si. Kenaikan temperatur *liquidus* akan mengakibatkan viskositas meningkat, dan hal tersebut akan mengakibatkan penurunan nilai fluiditas pada paduan.

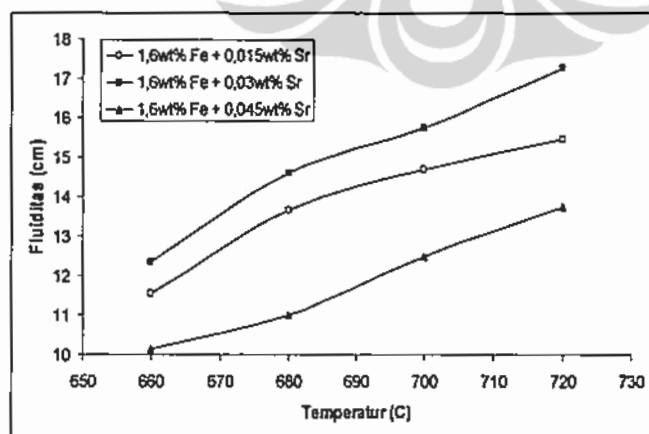
Penambahan stronsium diharapkan mampu meningkatkan fluiditas, karena dapat menurunkan temperatur *liquidus*. Penurunan temperatur *liquidus*, mengakibatkan perbedaan temperatur *superheat* yang terjadi makin besar, sehingga paduan akan lebih lama berada dalam fasa cair atau dengan kata lain fluiditas dari paduan akan meningkat. Pada Gambar 4.19 menunjukkan hubungan temperatur tuang dengan nilai fluiditas pada komposisi 1,4% Fe dan Sr yang bervariasi 0,015%- 0,045%. Pada gambar grafik tersebut terlihat bahwa pada penambahan Sr sebesar 0,03% memiliki nilai fluiditas yang paling tinggi.



(a)



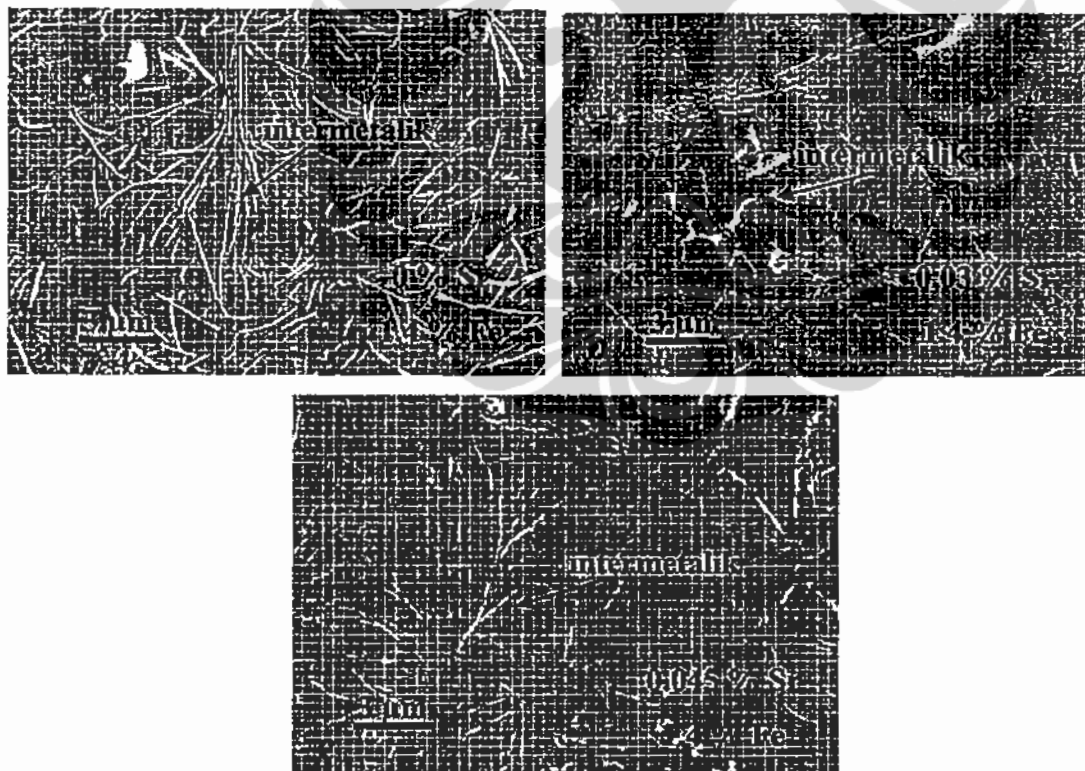
(b)



(c)

Gambar 4.19 Hubungan temperatur tuang dengan nilai fluiditas pada paduan hipoeutektik yang ditambahkan (a)1,2%Fe, (b)1,4%Fe, dan (c)1,6% Fe dengan Sr yang bervariasi antara 0,015; 0,03 dan 0,045%.

Penambahan *modifier* Sr selain merubah struktur mikro silikon juga berpengaruh terhadap jumlah dan morfologi fasa intermetalik pada paduan. Dari hasil pengamatan struktur mikro menggunakan SEM seperti pada Gambar 4.20, terlihat bahwa dengan penambahan 0,03% Sr, fasa intermetalik yang ada berkurang dan mengalami perubahan ukuran. Jarum-jarum intermetalik yang panjang seperti pada Gambar 4.20(a), berkurang menjadi lebih pendek seperti ditunjukkan pada gambar 4.20(b). Hal tersebut sesuai dengan literatur bahwa penambahan Sr mampu mengubah morfologi bentuk jarum panjang intermetalik menjadi lebih pendek. Elemen stronsium mampu memotong panjang jarum, dan sekaligus menghaluskan struktur jarum silikon menjadi lebih bulat. Perubahan morfologi intermetalik dan struktur jarum silikon diharapkan akan meningkatkan sifat mampu cor dan nilai fluiditasnya.



Gambar 4.20 Perhitungan fasa intermetalik dimana foto SEM yang telah di-kotak-kotak (a) Al-7% Si + 1,4% Fe, (b) Al-7% Si + 1,4% Fe + 0,03% Sr, dan (c) Al-7% Si + 1,4% Fe + 0,045% Sr.

Untuk mengetahui bagaimana perbandingan intermetalik yang terbentuk pada struktur mikro paduan Al-7% Si yang ditambahkan Fe dan Sr bervariasi seperti terlihat pada gambar di atas, perlu dilakukan penghitungan fraksi area fasa intermetalik yang terdapat pada matrik. Untuk itu teknik penghitungan sederhana, yaitu dengan membuat segmen untuk masing-masing gambar. Teknik perhitungan ini tentu tidak akan mendapatkan hasil yang akurat dan untuk itu pada penelitian selanjutnya akan digunakan *software* khusus. Dengan menggunakan *software* ini diharapkan akan mendapatkan data yang lebih akurat.

Dengan menghitung perkiraan berapa fasa intermetalik yang terbentuk, maka diperoleh hasil sebagai berikut:

$$a. \frac{100}{43 \times 52} \times 100\% = 4,472\%$$

$$b. \frac{40}{43 \times 52} \times 100\% = 1,789\%$$

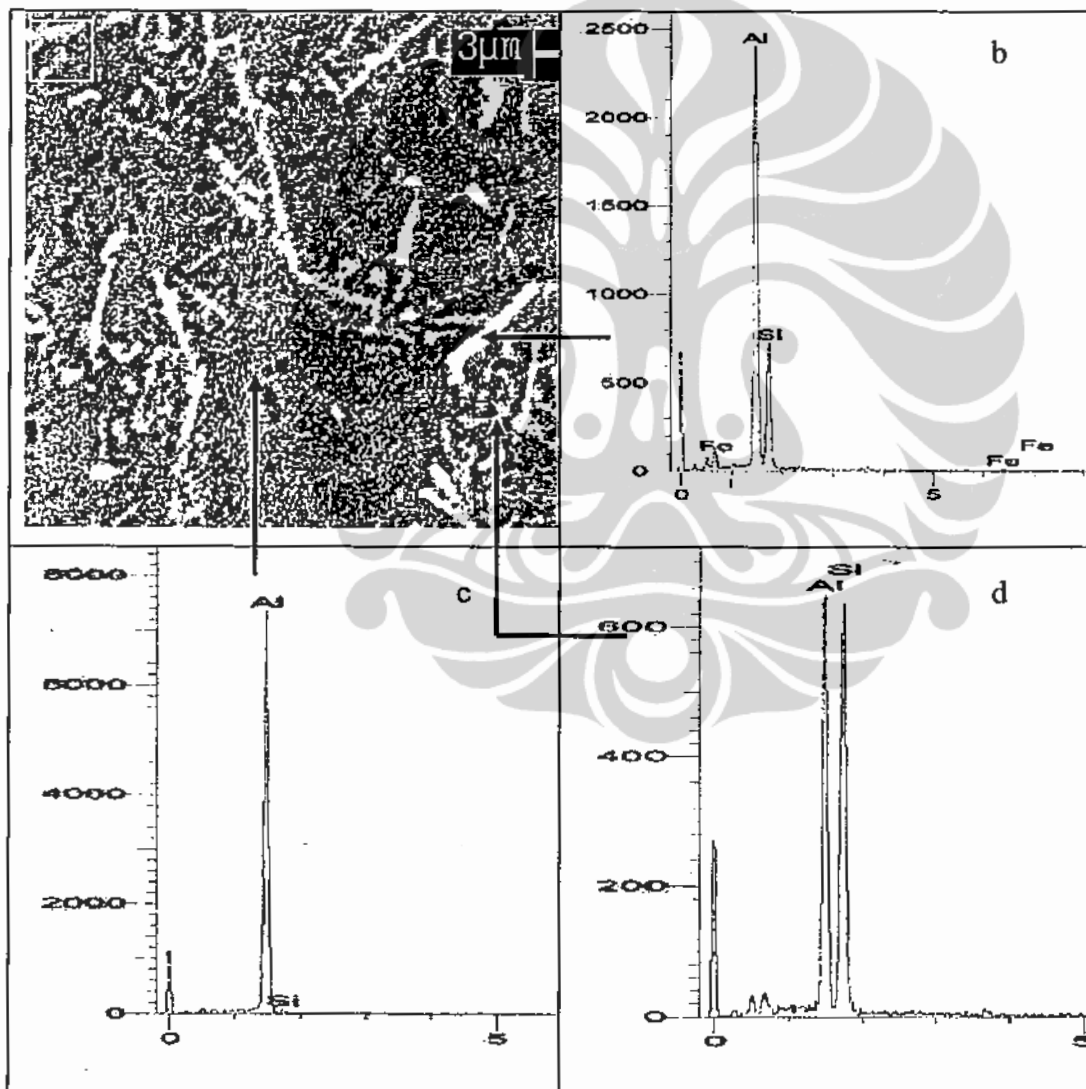
$$c. \frac{50}{43 \times 52} \times 100\% = 2,236\%$$

Dari penghitungan tersebut, dengan penambahan 0,03% Sr didapatkan fraksi intermetalik sebesar 1,789% jauh lebih rendah dari paduan tanpa Sr dengan fraksi intermetalik sebesar 4,472%, hal ini menunjukkan penambahan 0,03% Sr sudah cukup untuk memodifikasi fasa intermetalik pada paduan aluminium-silikon dengan 1,4% Fe. Penambahan stronsium sebagai *modifier* pada paduan aluminium-silikon yang kaya akan besi, diharapkan akan dapat mengubah ukuran dan bentuk fasa intermetalik yang terjadi pada paduan sehingga akan memperbaiki sifat mampu cor dan nilai fluiditas .

Karakterisasi fase yang terbentuk pada paduan Al-7% Si yang ditambahkan Fe dan Sr secara kuantitatif (tebal, panjang, dan fraksi luas intermetalik) dan kualitatif (morfologi) didapatkan dari data hasil pengujian dan pengamatan SEM/EDX, XRD, dan TEM

4.2.1.3. Karakterisasi Paduan Al-7% Si dengan SEM/EDX, dan XRD

Pengujian struktur mikro menggunakan alat SEM (*Scanning Electron Microscope*), baik menggunakan *secondary electron* maupun *backscattered* dilakukan untuk mengamati fasa-fasa yang terbentuk, selanjutnya pengujian diikuti dengan analisis menggunakan EDX (*electron dispersive X-ray spectroscopy*), untuk memprediksi jenis fasa yang terbentuk pada struktur mikro.



Gambar 4.21 (a) Hasil SEM Paduan Al-7% Si-1,2% Fe dengan etsa HF 0,5%. (b) hasil EDX pada Intermetalik. (c) hasil EDX pada matriks aluminium (d) hasil EDX pada struktur silikon.

Dari hasil pengujian SEM secara *backscattered* diperoleh gambar hitam putih/gelap terang, yang dipengaruhi oleh komposisi unsur penyusunnya. Unsur logam penyusun dengan nomor atom lebih tinggi akan menghasilkan warna yang lebih terang/putih dari pada unsur logam penyusun dengan nomor atom yang lebih rendah. Misalnya unsur Fe yang mempunyai nomor atom 26 akan menghasilkan gambar lebih terang/putih dari pada unsur silikon yang mempunyai nomor atom 14. Pada pengujian EDX, dilakukan penembakan pada titik atau *spot* yang diinginkan, dalam hal ini adalah pada intermetalik, eutektik silikon, dan matrik logam aluminium. Dari pengujian tersebut diperoleh indikasi adanya unsur-unsur kimia yang ada pada spesimen. Hasil pengujian SEM/EDX paduan aluminium silikon hipoeutektik ditampilkan pada Lampiran F dan G.

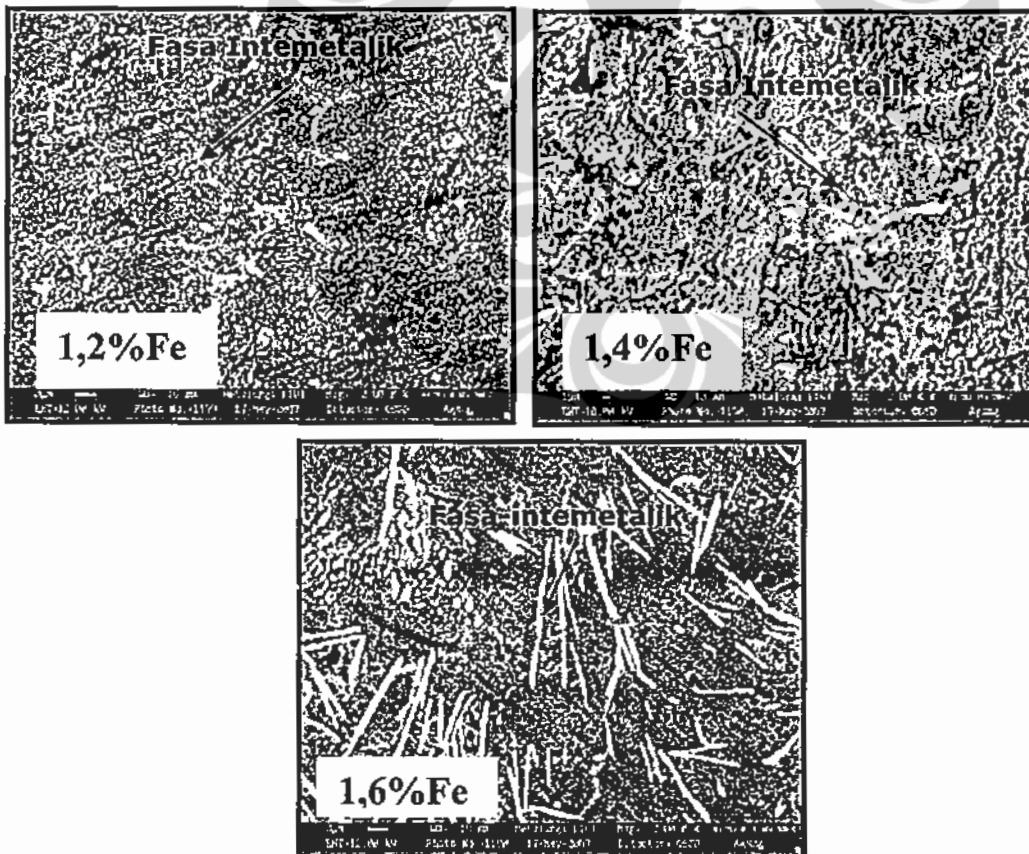
Gambar 4.21 memperlihatkan foto struktur mikro dari *master alloy* Al-7%Si dengan kandungan Fe sebesar 1,2%. Dari gambar foto struktur mikro tersebut diprediksi adanya fasa intermetalik yang berbentuk jarum dan berwarna terang (Gambar 4.21/b), struktur silikon yang berwarna abu-abu (Gambar 4.21/d) dan matrik aluminium yang berwarna gelap (Gambar 4.21/c). Secara kualitatif dan kuantitatif fasa intermetalik yang terbentuk dipengaruhi komposisi kimia paduan, yang dalam hal ini jumlah Fe yang ditambahkan ke dalam paduan. Semakin besar kadar Fe yang ditambahkan pada paduan aluminium silikon maka akan berpengaruh kepada morfologi serta dimensi dan jumlah fasa intermetalik yang terbentuk. Fasa intermetalik Al-Fe-Si memiliki berat jenis sekitar $3,58 \text{ gr/cm}^3$ untuk fasa $\alpha\text{-AlFeSi}$ dan $3,35 \text{ gr/cm}^3$ untuk fasa $\beta\text{-AlFeSi}$. Berat jenis fasa intermetalik tersebut lebih besar daripada berat jenis aluminium ($\sim 2,7 \text{ gm/cm}^3$) sehingga semakin besar jumlah intermetalik yang terbentuk akan menyebabkan berat jenis paduan akan meningkat secara keseluruhan. Dengan meningkatnya berat jenis paduan maka viskositas paduan akan semakin tinggi sehingga fluiditas paduan akan semakin menurun. Hasil ini semakin memperjelas bahwa dengan semakin meningkatnya kadar besi maka nilai fluiditas juga akan menurun.

Pada paduan Aluminium Silikon, fasa intermetalik yang paling sering terbentuk selama proses pembekuan adalah fasa $\alpha\text{-AlFeSi}$ dan $\beta\text{-AlFeSi}$. Pembentukan salah satu atau kedua senyawa fasa intermetalik tersebut sangat

Universitas Indonesia

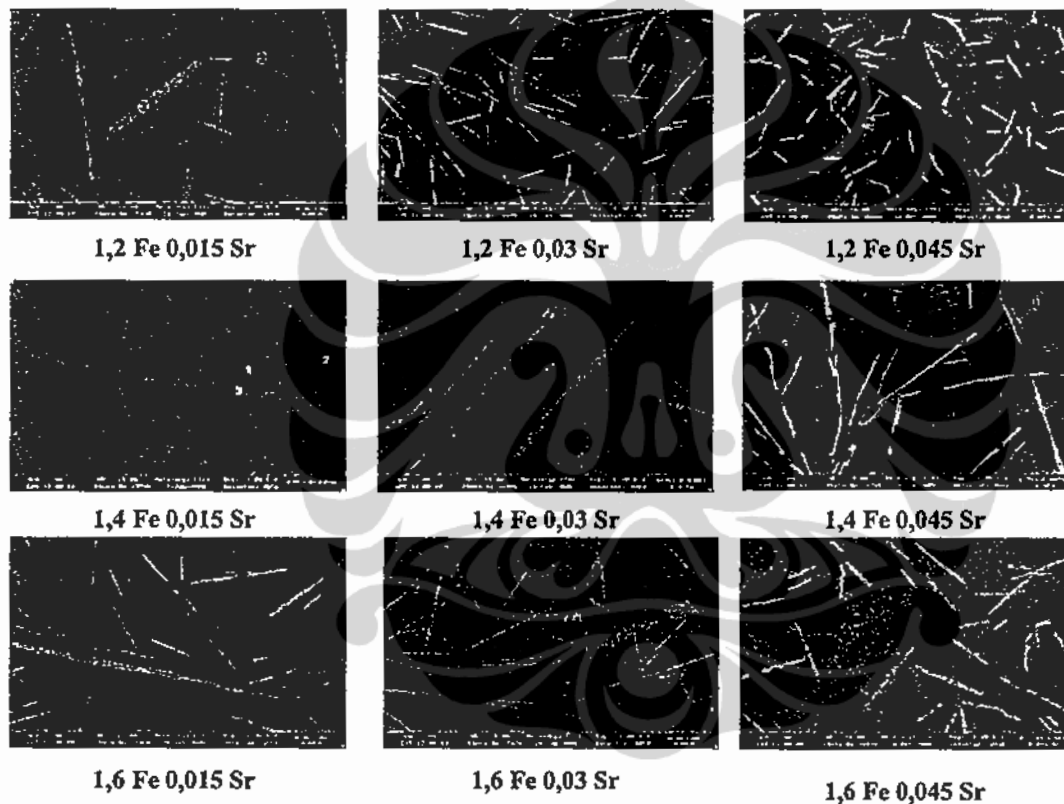
bergantung kepada komposisi paduan dan kecepatan pendinginan. Fasa β -AlFeSi morfologinya berbentuk jarum – jarum dan mempunyai efek negatif yang lebih besar terhadap sifat mekanis maupun sifat mampu cor (*castability*) apabila dibandingkan dengan fasa α -AlFeSi, karena fasa α -AlFeSi morfologinya berbentuk *chinese script* dan lebih kompak. Dengan meningkatnya kadar Fe maka ukuran partikel maupun fraksi luas fasa intermetalik dapat meningkat.

Gambar 4.22 memperlihatkan bahwa dengan penambahan 1,2% Fe, fasa intermetalik yang terbentuk relatif sedikit dan berukuran kecil. Ukuran dan jumlah fraksi intermetalik semakin besar pada penambahan 1,4% Fe. Pada penambahan 1,6% Fe fasa intermetalik berbentuk jarum-jarum yang kasar yang menyebabkan semakin berkurangnya sifat mampu cor paduan. Secara lengkap hasil foto SEM paduan hipoeutektik yang ditambahkan Fe ditampilkan pada Lampiran F



Gambar 4.22. Foto SEM struktur mikro paduan aluminium silikon hipoeutektik dengan penambahan kadar Fe sebesar 1,2%; 1,4%, dan 1,6%

Gambar 4.23 memperlihatkan foto struktur mikro paduan aluminium silikon hipoeutektik yang ditambahkan Fe dan Sr. Dengan penambahan *modifier* Sr diharapkan akan memodifikasi fasa intermetalik menjadi lebih pendek dan struktur silikon paduan menjadi lebih bulat, yang dapat memperbaiki sifat mampu alir atau nilai fluiditas paduan. Pengujian XRD dilakukan untuk memperjelas hipotesa awal tentang pengaruh penambahan Fe dan Sr



Gambar 4.23 Perbandingan Foto SEM sesuai panah (a) penambahan kadar Sr (b) penambahan kadar Fe, dengan etsa 0,5% HF perbesaran 1000X^[82]

4.2.1.4. Analisa Kualitatif dan Kuantitatif Struktur Mikro Paduan Al-7% Si.

Pengujian kualitatif dan kuantitatif struktur mikro paduan digunakan *software PICSARA* yang dapat menghitung fraksi luas area intermetalik, dan *software Powder-X* dan *X-Powder* untuk menghitung fasa-fasa hasil pengujian XRD. Sedangkan morfologi (ukuran tebal dan panjang) intermetalik dapat dihitung menggunakan fasilitas yang ada pada alat pengujian SEM. *Software*

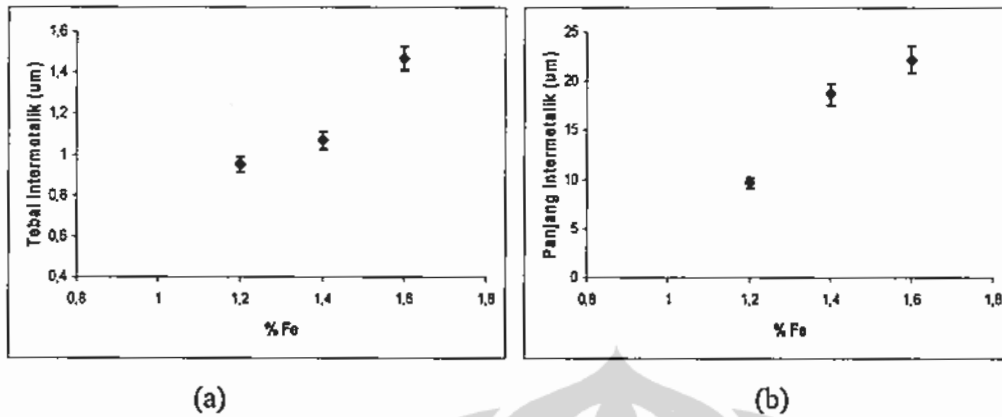
Universitas Indonesia

PICSARA menggantikan metode perhitungan fraksi intermetalik metode kotak sehingga diharapkan perhitungan lebih akurat. Pengaruh penambahan Fe terhadap morfologi (ukuran tebal dan panjang) fasa intermetalik pada paduan Al-7%Si dapat dilihat pada Tabel 4.16, Gambar 4.24 dan 4.25 . Foto pengamatan dan perhitungan ukuran intermetalik dapat dilihat pada Lampiran K.

Tabel 4.16 Hubungan antara persentase kadar Fe dengan tebal dan panjang intermetalik yang terbentuk pada Al-7% Si yang ditambahkan 1,2; 1,4; dan 1,6% Fe

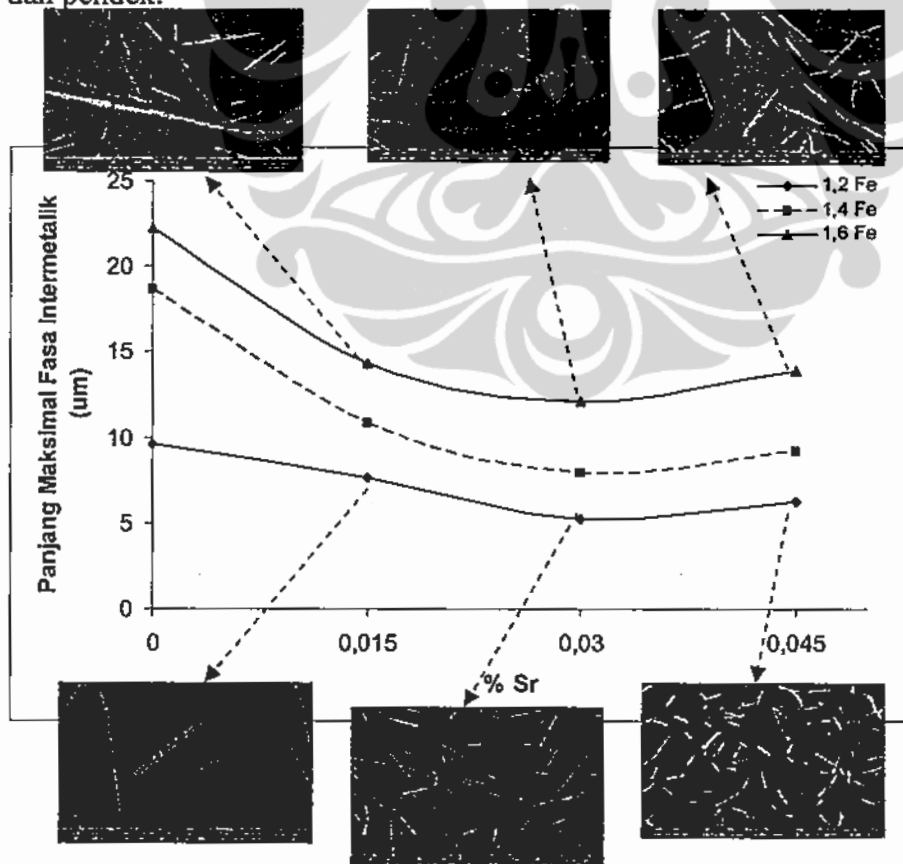
% Fe	Tebal Intermetalik (μm)	Panjang Intermetalik (μm)
1,2	0,9	9,7
1,4	1,1	18,7
1,6	1,5	22,2

Dari tabel di atas menunjukkan semakin tinggi kadar Fe yang ditambahkan mulai dari 1,2; 1,4 dan 1,6% pada paduan Al-7%Si, maka tebal dan panjang intermetalik yang terbentuk akan semakin bertambah. Pada penambahan 1,2% Fe tebal dan panjang intermetalik sebesar 0,9 μm dan 9,7 μm . Tebal dan panjang intermetalik berubah menjadi 1,1 μm dan 18,7 μm pada penambahan 1,4% Fe . Dan jika ditambahkan 1,6% Fe, ukuran tebal dan panjang intermetalik berubah menjadi 1,5 μm dan 22,2 μm . Perubahan morfologi intermetalik ini berpengaruh terhadap nilai fluiditas paduan. Fasa intermetalik yang berbentuk jarum (β -AlFeSi) dengan tebal dan panjang yang semakin besar akan menghambat mampu alir dari aluminium cair untuk mengisi cetakan. Hal ini, sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Villeneuve^[41] dimana fasa intermetalik β -AlFeSi yang berbentuk jarum dan kadang bercabang akan mengurangi kemampuan logam cair mengisi rongga cetakan. Pada penelitian Marshall^[42] menunjukkan penambahan Fe akan meningkatkan ukuran intermetalik. Kandungan Fe dalam paduan selain mempengaruhi ukuran dan presentase fasa intermetalik yang terbentuk, dapat meningkatkan porositas sehingga bisa menurunkan keuletan paduan^[20]



Gambar 4.24 (a) Hubungan antara kadar Fe dan tebal intermetalik yang terbentuk pada Al-7% Si. (b) Hubungan antara kadar Fe dan panjang intermetalik yang terbentuk pada Al-7% Si.

Untuk mengurangi pengaruh intermetalik terhadap mampu alir paduan dapat dilakukan penambahan *modifier* Sr. Hal tersebut diharapkan dapat merubah morfologi intermetalik yang awalnya berbentuk jarum-jarum kasar menjadi lebih halus dan pendek.



Gambar 4.25 Pengaruh penambahan Sr terhadap panjang fasa intermetalik yang terbentuk.

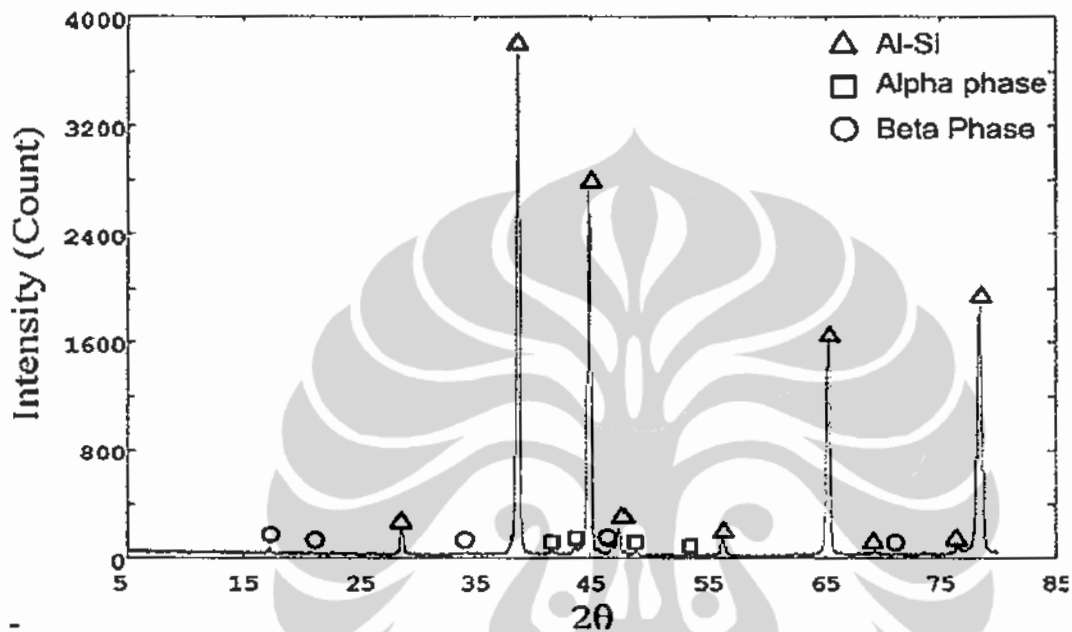
Pada Gambar 4.25 menunjukkan keterkaitan antara penambahan Sr terhadap dimensi intermetalik yang terbentuk pada paduan Al-7% Si. Dari gambar di atas terlihat pengaruh penambahan Sr pada paduan aluminium yang mempunyai konsentrasi Fe sebesar 1,2% akan mengakibatkan berkurangnya panjang intermetalik yang terbentuk baik dari 9,7 μm menjadi 7,6 μm dengan penambahan 0,015% Sr, dan dengan penambahan 0,03% dan 0,045% panjang intermetalik berubah menjadi 5,3 μm dan 6,3 μm . Pada paduan dengan konsentrasi 1,4% Fe terjadi penurunan panjang intermetalik seiring penambahan Sr. Dengan penambahan sebesar 0,015% panjang intermetalik berkurang dari 18,7 μm menjadi 10,8 μm . Penambahan 0,03% Sr panjang intermetalik menjadi 7,9 μm dan naik kembali pada konsentrasi 0,045% Sr menjadi 9,2 μm . Penambahan 0,015; 0,03; dan 0,045% Sr pada paduan dengan 1,6% Fe nilai panjang intermetalik mengalami perubahan secara berurutan 14,3; 12,1; dan 13,9 μm . Dari hasil pengujian pada penambahan 0,03% Sr merupakan konsentrasi yang optimal untuk memodifikasi fasa intermetalik yang sebelumnya berbentuk jarum – jarum panjang menjadi lebih pendek. Pada konsentrasi 0,045% Sr paduan tersebut telah mengalami overmodifikasi

Secara kuantitatif, jumlah fasa intermetalik yang terbentuk dapat diprediksi atau dihitung dari data pengujian XRD yang ditunjukkan pada Gambar 4.26. Hasil perhitungan fasa intermetalik yang terbentuk ditampilkan seperti pada Tabel 4.17. Dari Tabel tersebut, diperoleh persentase fasa β -intermetalik sebesar 2,6% lebih tinggi dari persentase fasa α -intermetalik yang hanya 1,3%. Data hasil pengujian XRD ditampilkan secara lengkap pada Lampiran J.

Cara perhitungan diatas, digunakan untuk menganalisa pengaruh penambahan Fe sebesar 1,2; 1,4; dan 1,6% dengan kadar Sr tetap sebesar 0,015% terhadap pembentukan fasa intermetalik pada paduan Al-7% Si, seperti terlihat pada Tabel 4.18 dan Gambar 4.27. Grafik pada gambar tersebut menunjukkan terjadi penurunan konsentrasi fasa intermetalik α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ seiring dengan penambahan konsentrasi Fe, tetapi pada fasa β - Al_5FeSi memperlihatkan kecenderungan yang berbeda dimana terjadi penurunan konsentrasi fasa β -intermetalik (Al_5FeSi) dari komposisi 1,2% Fe + 0,015% Sr ke komposisi 1,4

Universitas Indonesia

%Fe + 0,015% Sr dan kemudian naik kembali pada komposisi 1,6% Fe + 0,015% Sr. Sedangkan konsentrasi α -intermetalik ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$) cenderung menurun dengan semakin tingginya Fe.



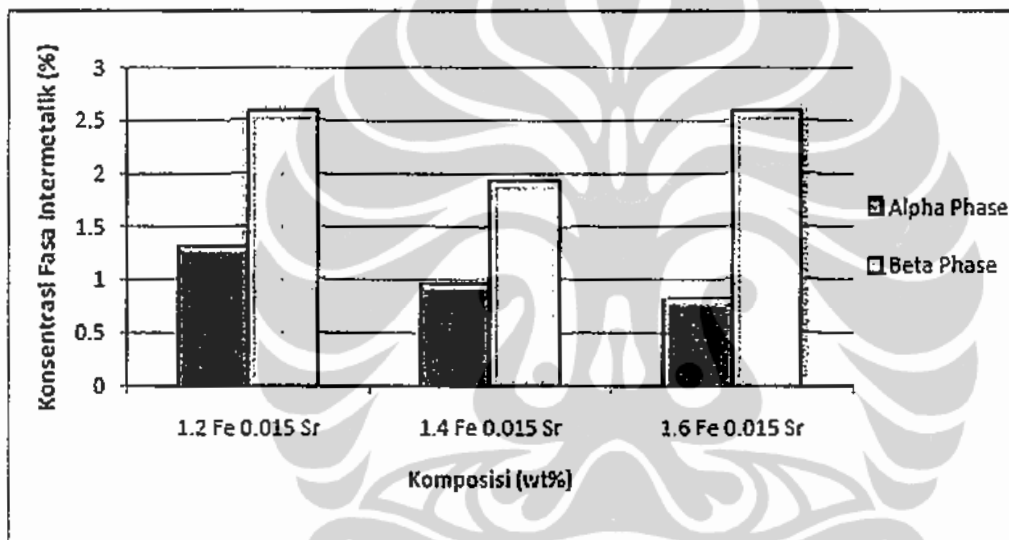
Gambar 4.26 Hasil Pengujian XRD paduan Al-7% Si + 1,2% Fe + 0,015% Sr

Tabel 4.17 Data luas area dibawah peak sampel Al-7% Si + 1,2% Fe + 0,015% Sr

Fasa	Alpha	Beta	Al-Si
Luas peak	219,2	625,7	1909,8
	385,7	563,9	29376
	319,8	388,7	18789
	187	427,9	3311,8
		189,4	2292,7
			12967
			523,7
			724
Jumlah	1111,7	3195,6	81713,6
Persentase	1,3	2,6	96,1

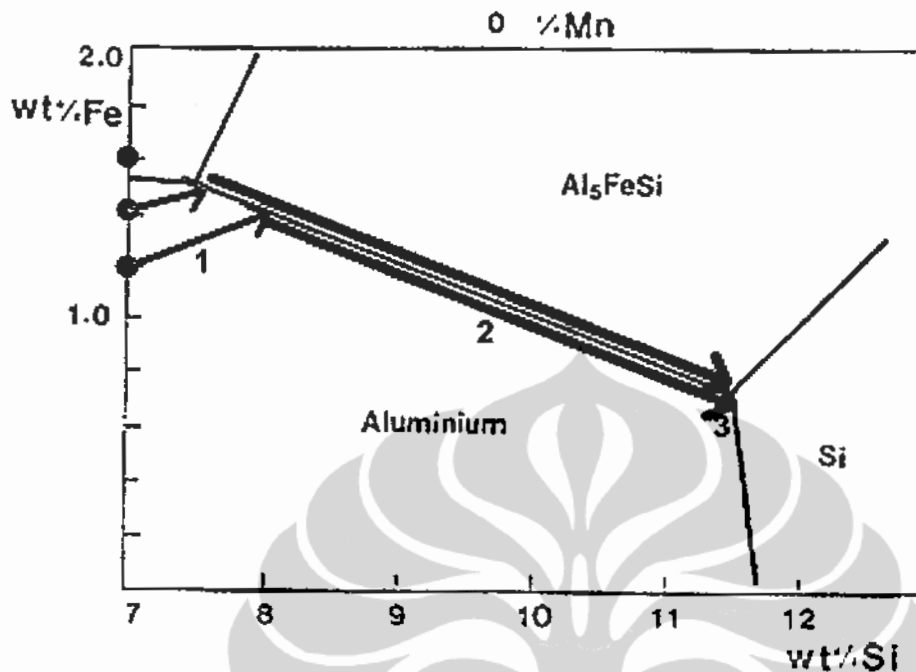
Tabel 4.18 Pengaruh penambahan Fe terhadap kuantitas fasa α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ dan β - Al_5FeSi pada Al-7% Si dengan konsentrasi 0,015% Sr.

Komposisi Sampel (% berat)	Fasa α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ (%)	Fasa β - Al_5FeSi (%)
1,2 Fe 0,015 Sr	1,3	2,6
1,4 Fe 0,015 Sr	0,9	1,9
1,6 Fe 0,015 Sr	0,8	2,6



Gambar 4.27 Pengaruh penambahan Fe terhadap kuantitas fasa α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ dan β - Al_5FeSi pada Al-7% Si dengan konsentrasi 0,015% Sr.

Melihat kecenderungan data fasa α -intermetalik ($\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$), dapat disimpulkan bahwa peningkatan kadar Fe akan mengakibatkan rentang temperatur pembentukan fasa β -intermetalik semakin besar, sehingga menghasilkan fasa β -intermetalik yang lebih banyak. Peningkatan konsentrasi fasa β -intermetalik tersebut menyebabkan kemampuan *modifier* untuk mengubah fasa β -intermetalik menjadi α -intermetalik akan berkurang sehingga menyebabkan fasa α -intermetalik yang terbentuk semakin sedikit. Fenomena tersebut dapat dijelaskan dengan menggunakan *plot* komposisi dari diagram terner Al-Fe-Si, dan atlas garis *Scheil* untuk menentukan garis segregasi (pembentukan dendrit aluminium) seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Proses pembentukan fasa intermetalik yang berdasar pada diagram terner Al-Fe-Si dan diagram Scheil.^[13]

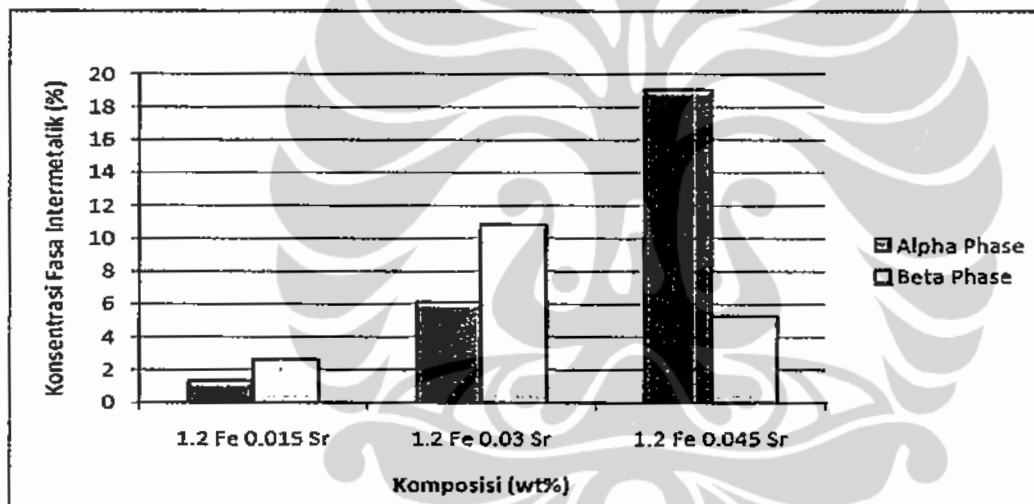
Dari diagram pada Gambar 4.28 terlihat pada komposisi 1,2% Fe, proses pembekuan diawali dengan pembentukan α -Al primer (dendrit aluminium) seperti yang terlihat pada reaksi 1 (panah berwarna coklat). Selama proses pembekuan, dendrit aluminium akan tumbuh mengakibatkan sisa aluminium cair menjadi kaya besi dan silikon. Hal ini akan berlanjut hingga reaksi 2 (panah hijau) dimulai. Pada reaksi 2 terjadi pertumbuhan fasa β - Al_5FeSi yang berlanjut sampai lembah eutektik tercapai (reaksi 3). Hal yang sama berlaku pada konsentrasi 1,4% Fe, tetapi perbedaannya pada konsentrasi 1,4% Fe reaksi pembentukan fasa β - Al_5FeSi terjadi pada temperatur yang lebih tinggi sehingga menyebabkan rentang temperatur menjadi lebih panjang dan fasa β - Al_5FeSi yang terbentuk akan lebih besar dan lebih banyak.^[13]

Pada komposisi 1,6% Fe dan temperatur diatas $615^{\circ}C$ akan terbentuk fasa α - Al_3Fe_2Si . Selama proses pembekuan, fasa intermetalik α - Al_3Fe_2Si akan menyerap silikon yang berada disekitarnya sehingga menjadi fasa intermetalik β - Al_5FeSi .

Pengaruh penambahan *modifier* Sr terhadap pembentukan fasa intermetalik dapat dilihat pada Tabel 4.19 dan Gambar 4.29.

Tabel 4.19 Pengaruh penambahan Sr terhadap kuantitas fasa α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ dan β - Al_5FeSi pada Al-7 % Si dengan konsentrasi 1,2 % Fe.

Komposisi Sampel (% berat)	Fasa α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ (%)	Fasa β - Al_5FeSi (%)
1,2 Fe 0,015 Sr	0,9	2,1
1,2 Fe 0,030 Sr	6,0	10,9
1,2 Fe 0,045 Sr	19,1	5,2

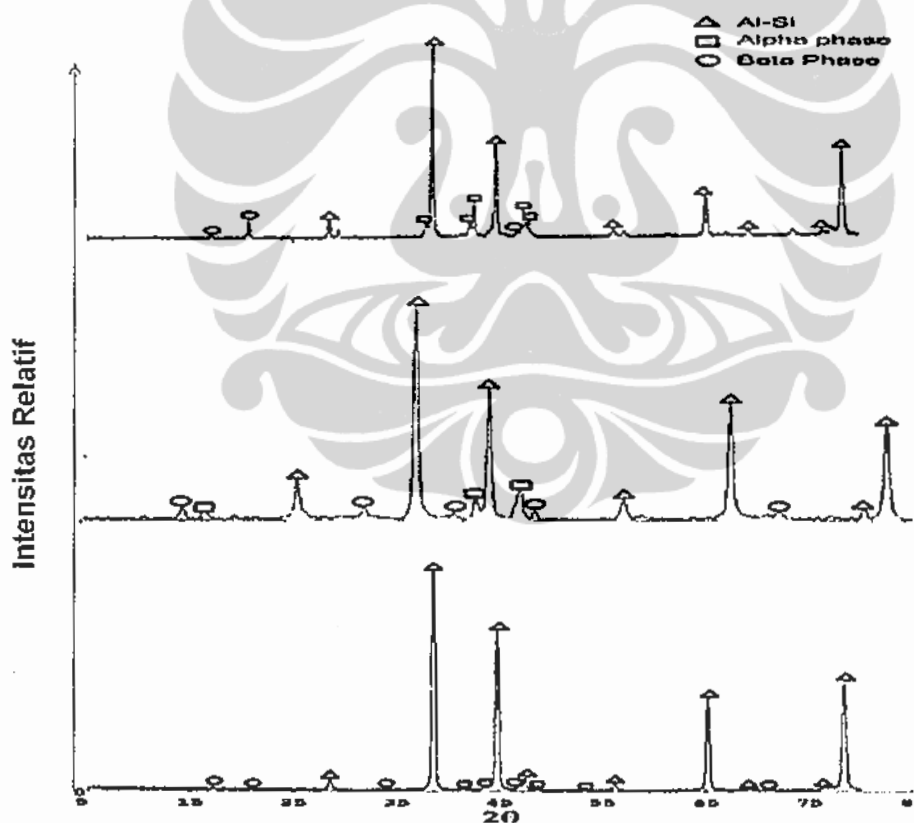


Gambar 4.29 Pengaruh penambahan Sr terhadap kuantitas fasa α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ dan β - Al_5FeSi pada Al-7% Si dengan konsentrasi 1,2% Fe.

Dari grafik pada Gambar 4.29 terdapat korelasi antara konsentrasi Sr dan fasa intermetalik α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ yang terbentuk, tetapi fasa β - Al_5FeSi tidak memperlihatkan adanya kecenderungan korelasi antara fasa β - Al_5FeSi dengan penambahan Sr. Hal tersebut ditunjukkan dengan bentuk grafiknya yang naik turun. Dari gambar di atas terlihat bahwa peningkatan kadar Sr mengakibatkan konsentrasi fasa α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ yang terbentuk semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan literatur bahwa Sr dapat mengubah fasa β - Al_5FeSi menjadi fasa α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$. Perubahan fasa intermetalik β - Al_5FeSi menjadi fasa α - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ akan

memperbaiki sifat mekanis dan mampu alir dari paduan aluminium, karena fasa intermetalik $\alpha\text{-Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ berbentuk *chinese script*. Fasa intermetalik $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ yang mempunyai bentuk tajam menghasilkan ikatan yang sangat lemah dengan matrik aluminium dan dapat mengganggu aliran aluminium cair, sehingga dapat mengakibatkan terjadi porositas pada coran.

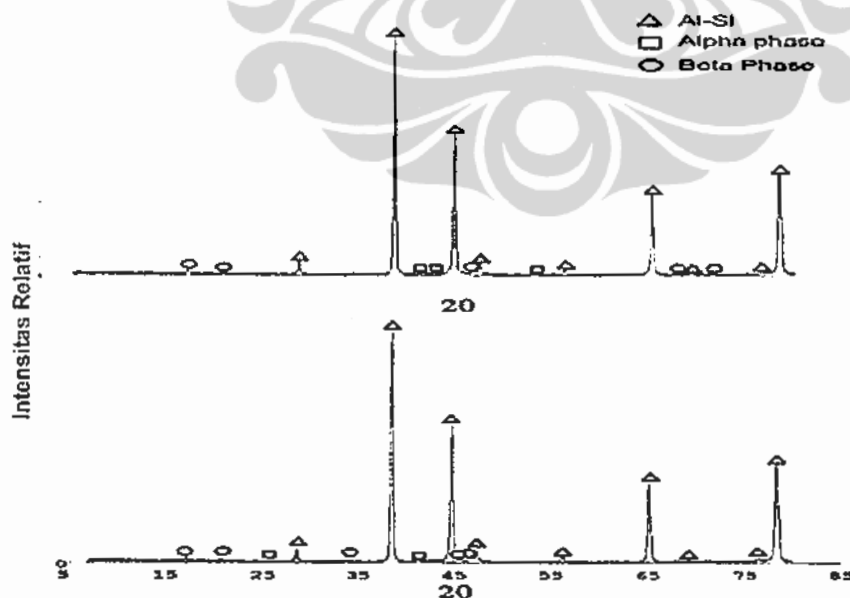
Secara komprehensif data pengujian XRD paduan aluminium silikon dengan Fe tetap dan Sr yang bervariasi ditampilkan pada Gambar 4.30 dan Tabel 4.20. Grafik pengujian XRD paduan yang ditambahkan Sr sebesar 0,015% dan Fe dengan kadar 1,4% dan 1,6% dapat dilihat seperti pada Gambar 4.31 dan Tabel 4.21.



Gambar 4.30 Analisis XRD Paduan hipoeutektik Aluminium Silikon + 1,2% Fe + 0,01; 0,03 dan 0,045% Sr.

Tabel 4.20 Perhitungan data luas area di bawah peak Paduan hipoeutektik Aluminium Silikon + 1,2% Fe +0,01; 0,03, dan 0,045% Sr

0,015%Sr				0,03 %Sr				0,045%Sr			
Fasa	Alpha	Beta	Al-Si	Fasa	Alpha	Beta	Al-Si	Fasa	Alpha	Beta	Al-Si
Luas peak	219,2	625,7	1909,8	Luas peak	193	266,3	715,7	Luas peak	3971,4	1484,7	5090,3
	385,7	563,9	29376		471,5	268,1	3891,2		4003,7	4035,7	41939,5
	319,8	388,7	18789		186	136,3	2396		8134,6	2239,8	22113,2
	187	427,9	3311,8			592,4	433,7		7555,6		3198,2
		189,4	2292,7			246,1	2116,5		4498,4		11958,4
			12967				267,7				4487,4
			523,7				1814,6				2681,0
			724								20626,4
			11819,6								
Jumlah	1111,7	3195,6	81713,6	Jumlah	850,5	1509,2	11635,4	Jumlah	28163,7	7760,2	112094,4
Persentase	0,9	2,1	97,0	Persentase	6,0	10,9	83,1	Persentase	19,1	5,2	75,7

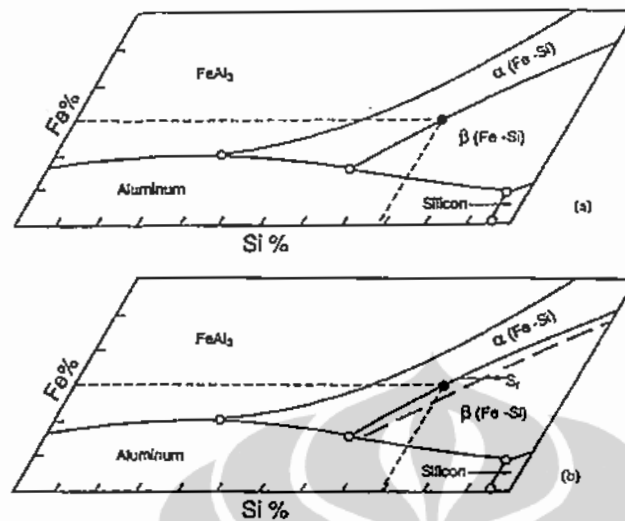


Gambar 4.31 Grafik Analisis XRD paduan hipoeutektik Aluminium Silikon + 1,4%, 1,6% Fe + 0,015% Sr

Tabel 4.21 Perhitungan data luas area dibawah *peak* Analisis XRD paduan hipoeutektik Aluminium Silikon + 1,4%; 1,6% Fe + 0,015% Sr.

Fasa	Alpha	Beta	Al-Si	Fasa	Alpha	Beta	Al-Si
Luas peak	228,0	817,3	4001,0	Luas peak	319,9	1436,0	3471,1
	606,1	373,0	70533,0		223,5	373,9	46917,1
	761,9	619,8	30832,2		534,8	1047,9	35443,2
		1410,1	3405,7			356,5	2625,4
			2084,4			244,2	577,4
			24967,3				16950,1
			361,1				419,3
			606,5				857,9
			24697,5				20880,7
Jumlah	1596,0	3220,2	161488,7	Jumlah	1078,2	3458,5	129152,2
Persentase	0,9	1,9	97,2	Persentase	0,8	2,5	96,7

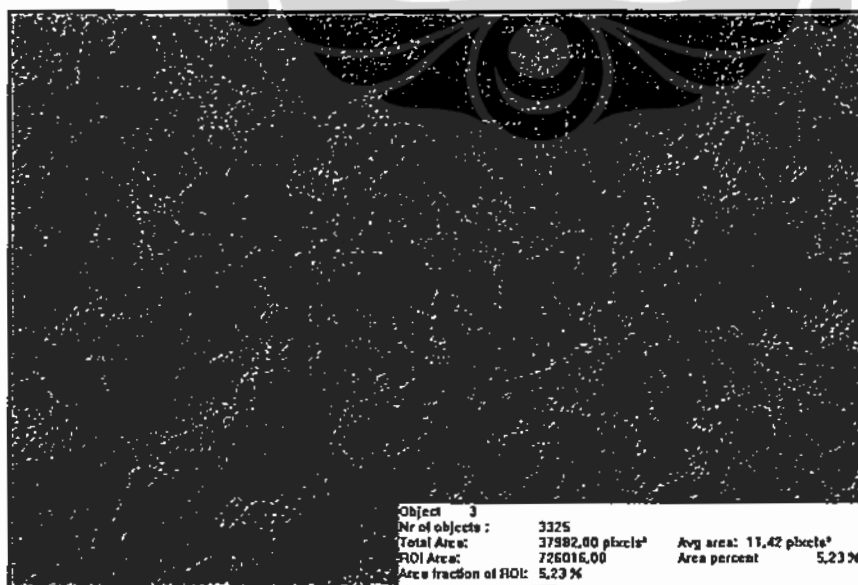
Fenomena perubahan fasa α -Al₈Fe₂Si akibat pengaruh kadar stronsium dijelaskan dengan menggunakan *aluminum-rich corner* diagram fasa Al-Fe-Si (Gambar 4.32). Gambar tersebut memperlihatkan bahwa efek dari Sr dapat melebarkan daerah fasa α -intermetalik. Pada paduan tanpa modifikasi dan terletak di bawah kondisi *equilibrium*, konsentrasi Fe dan Si merupakan nilai kritis (pada gambar diperlihatkan dengan titik hitam) untuk membentuk fasa β -intermetalik. Peningkatan konsentrasi stronsium akan dapat menggeser batas α -intermetalik dan β -intermetalik pada daerah yang mempunyai konsentrasi silikon yang lebih tinggi, sehingga titik hitam berubah posisinya pada daerah α -intermetalik dan akan menjadikan daerah α -intermetalik menjadi lebih luas.



Gambar 4.32 Aluminum-rich corner pada diagram fasa Al-Fe-Si yang memperlihatkan pengaruh penambahan Sr.^[60]

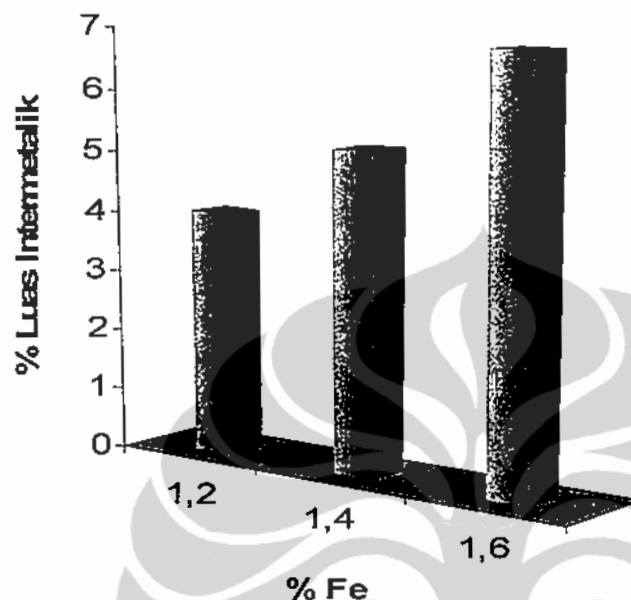
4.2.1.5. Perhitungan Fraksi Luas Area pada Paduan Al-7% Si

Hasil foto yang telah dianalisa jumlah fraksi luas fasa intermetalik pada paduan Al-7% Si disajikan dalam Gambar 4.33, sedangkan hasil perhitungan fraksi luas intermetalik pada paduan Al-7% Si ditampilkan dengan grafik pada Gambar 4.34.



Gambar 4.33 Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7% Si dengan penambahan 1,6%Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.

Universitas Indonesia



Gambar 4.34 Hubungan antara persentase kadar Fe dan persentase luas intermetalik yang terbentuk pada Al-7%Si (Al-Si Hipoeutektik).

Dari grafik pada Gambar 4.34 menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar Fe yang ditambahkan mengakibatkan jumlah fasa intermetalik yang terbentuk semakin banyak. Pada paduan Al-7% Si dengan penambahan 1,2% Fe memiliki jumlah fraksi luas intermetalik sebanyak 3,67%, sedangkan pada penambahan Fe 1,4% dan 1,6% berturut-turut memiliki hasil perhitungan fraksi luas fasa intermetalik sebesar 4,03% dan 5,23%. Semakin banyak intermetalik yang terbentuk pada paduan akan menurunkan nilai fluiditas .

4.2.2. Paduan Aluminium Silikon Eutektik (Al-11% Si)

4.2.2.1. Pengujian komposisi kimia paduan Al-11% Si

Pengujian komposisi kimia pada paduan ini dilakukan dengan menggunakan alat *Metal Analysis Spectrometer*, dimana hasil pengujian pada

Universitas Indonesia

paduan Al-11% Si yang ditambahkan Fe sebesar 0,6% ditunjukkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Tabel Pengujian Akhir Komposisi paduan Eutektik dengan penambahan 0,6%Fe

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni
N=1	<0,0000	12,995	<0,00216	0,02752	0,69378	0,01123	0,01021
N=2	<0,0000	13,716	<0,00216	0,02390	0,58748	0,01090	0,01853
Average	0,0000	13,355	0,00216	0,02571	0,64063	0,01106	0,01037
	Ti	Pb	Sn	Cr	Ca	P	Al
N=1	0,01139	<0,00042	<0,00662	0,00201	0,00033	0,00713	86,224
N=2	0,01222	<0,00042	<0,00662	0,00206	0,00169	0,00560	85,612
Average	0,01100	0,00042	0,00662	0,00204	0,00101	0,00636	85,918

Dari tabel hasil pengujian komposisi kimia pada paduan eutektik aluminium silikon dengan penambahan 0,6% Fe tersebut diperoleh nilai rata-rata kandungan Fe sebesar 0,64%, dan Si sebesar 13,355%. Dalam hal ini, hasil pengujian sudah sesuai dengan target komposisi kimia hasil perhitungan *material balance*. Pada paduan Al-11% Si yang mengandung Fe yang ditambahkan *modifier* Sr, hasil pengujian komposisinya ditunjukkan Pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Komposisi kimia Paduan Al-11% Si + 0,8% Fe + 0,045% Sr

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	
N=1	0,0001	13,370	0,0021	0,0011	0,778	
N=2	0,0001	13,742	0,0021	0,0001	0,825	
Average	0,0001	13,556	0,0021	0,006	0,8015	
	Ti	Pb	Sn	Cr	Ca	Al
N=1	0,0001	0,0004	0,0001	0,0011	0,0003	85,655
N=2	0,0001	0,0002	0,0001	0,0015	0,0001	85,040
Average	0,0001	0,0003	0,0001	0,0013	0,0002	85,347

Dari tabel di atas didapat nilai rata-rata kandungan Fe sebesar 0,8015% dan Sr sebesar 0,044%, hal tersebut sesuai dengan target komposisi kimia hasil perhitungan *material balance*.

4.2.2.2. Pengujian Fluiditas Pada Paduan Eutektik (Al-11% Si)

Pengujian fluiditas dilakukan dengan alat uji fluiditas metode vakum dan pada setiap kondisi diambil data sebanyak 2 (dua) kali, untuk mendapatkan hasil pengujian yang lebih baik. Data hasil pengujian fluiditas *master alloy* (paduan Al-11%Si) tanpa penambahan Fe dan Sr ditunjukkan seperti dalam Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Hasil pengujian fluiditas paduan Al-11% Si tanpa Fe dan *modifier*

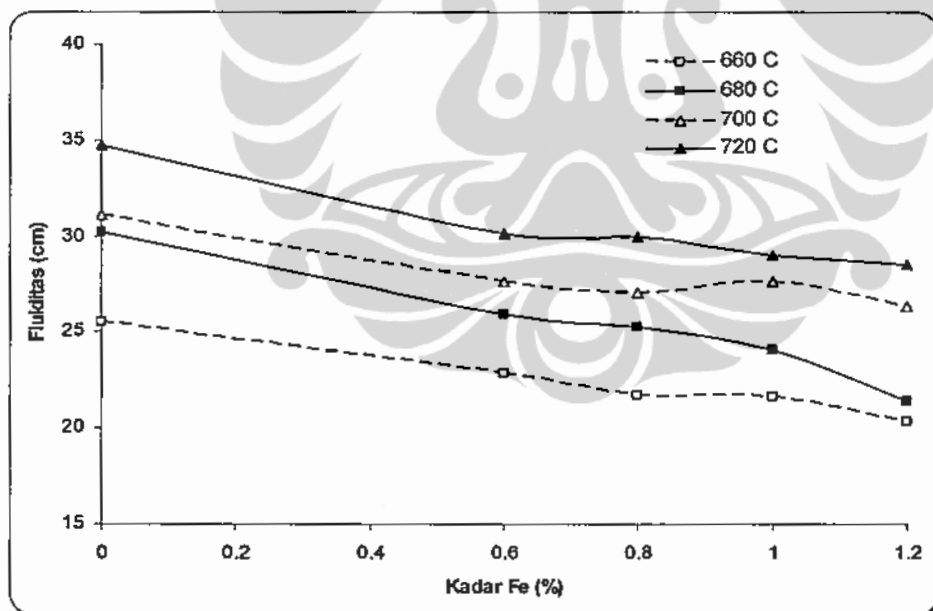
Sampel uji	Temperatur (°C)	Temperatur rata – rata (°C)	Panjang kawat (cm)	Panjang kosong (cm)	Nilai Fluidita (cm)	Fluiditas rata-rata (cm)
1	723	721,5	80,4	45,6	34,8	34,75
2	720		80,7	46	34,7	
3	703	701,5	80,4	47,8	32,6	31,1
4	700		80,4	50,8	29,6	
5	683	681,5	80,4	47,5	32,9	30,2
6	680		80,3	52,8	27,5	
7	663	661,5	80,3	52	28,3	25,55
8	660		80,3	57,5	22,8	

Dari hasil pengujian fluiditas yang telah dilakukan pada paduan Al-11% yang belum ditambahkan Fe dan Sr dapat terlihat bahwa, semakin tinggi temperatur menghasilkan nilai fluiditas yang semakin baik. Temperatur sangat menentukan efek fundamental proses solidifikasi dalam mengendalikan durasi aliran, yaitu berupa kuantitas panas yang dilepas sebelum proses solidifikasi. Nilai fluiditas paling tinggi (34,74 cm) diperoleh pada temperatur 721⁰C dan fluiditas paling rendah (25,55 cm) didapatkan pada temperatur 661,5⁰C.

Pengaruh penambahan Fe terhadap nilai fluiditas pada paduan Al-11%Si sebesar 0,6; 0,8; 1 dan 1,2%, hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.25 dan Gambar 4.36.

Tabel 4.25 Hasil pengujian fluiditas paduan eutektik aluminium silikon yang ditambahkan Fe

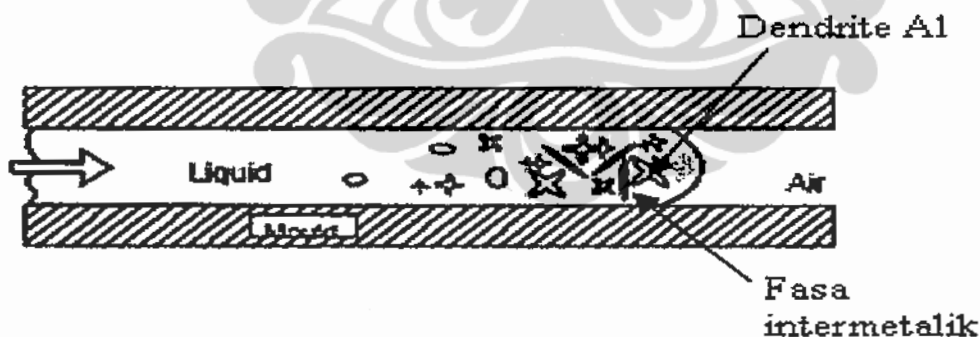
Paduan Al-11% Si									
0%Fe		0,6%Fe		0,8%Fe		1%Fe		1,2%Fe	
Temp (°C)	Fluiditas (cm)	Temp (°C)	Fluiditas (cm)	Temp (°C)	Fluiditas (cm)	Temp (°C)	Fluiditas (cm)	Temp (°C)	Fluiditas (cm)
661,5	25,55	659,5	22,87	661,5	21,75	662	21,65	660,67	20,37
681,5	30,2	680,67	25,9	679	25,26	681	24,05	681,5	21,4
701,5	31,1	701,5	27,6	701,5	27,05	701,5	27,6	701,5	26,35
721,5	34,75	721,5	30,1	722	29,95	721,5	29	720	28,5



Gambar 4.35 Hubungan antara kadar Fe dengan nilai fluiditas pada paduan Al-11% Si

Dari Tabel 4.25 dan Gambar 4.35 menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar Fe yang ditambahkan pada paduan, akan mengakibatkan penurunan nilai fluiditas pada setiap kondisi temperatur. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa besi merupakan unsur yang memiliki kelarutan sangat rendah pada padatan

aluminium (~0,05%, pada kesetimbangan). Penambahan kadar besi yang lebih dari 0,05% akan mengakibatkan banyak besi yang tidak larut dalam matriks dan akan tersisa dalam aluminium cair sampai terjadinya akhir pembekuan yang kemudian akan mengendap sebagai fasa kedua intermetalik. Fasa intermetalik ini akan menurunkan nilai fluiditas dari paduan, hal tersebut dikarenakan fasa intermetalik mempunyai berat jenis yang lebih besar, sehingga akan meningkatkan viskositas dari logam cair. Fasa intermetalik merupakan fasa padat yang berdensitas tinggi sehingga mengakibatkan logam cair cenderung membentuk fasa padat. Hal ini dapat dijelaskan melalui skema penghambatan aliran paduan aluminium cair oleh fasa intermetalik seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.36. Dari gambar ini terlihat bahwa fasa intermetalik yang terbentuk di antara lengan-lengan dendrit akan menghalangi saluran interdendritik, sehingga dapat membebani aliran logam cair untuk masuk ke dalam cetakan. Fasa intermetalik yang terbentuk semakin besar, akan mengakibatkan proses *feeding* (pengisian aluminium cair ke dalam cetakan) semakin terganggu, sehingga nilai fluiditas paduan Al-Si akan semakin menurun.



Gambar 4.36 Skema penghambatan aliran paduan aluminium cair oleh fasa intermetalik^[50]

Penurunan nilai fluiditas akibat peningkatan kadar Fe bukan hanya disebabkan oleh peningkatan nilai viskositas pada logam cair, tetapi hal tersebut disebabkan oleh peningkatan jumlah fasa intermetalik dan perubahan morfologi dari intermetalik tersebut. Morfologi dari fasa intermetalik akan berpengaruh terhadap nilai fluiditas yang terkait dengan penurunan nilai viskositasnya.

Universitas Indonesia

Keberadaan fasa pelat/jarum yang kasar dinilai lebih berpengaruh terhadap pengurangan nilai fluiditasnya, hal tersebut dikarenakan keberadaan dari fasa β -intermetalik yang berbentuk pelat atau jarum mengganggu *feeding* logam cair.

Untuk mengurangi sifat intermetalik yang kurang menguntungkan ini maka ditambahkan sejumlah *modifier* Sr ke dalam paduan sehingga dapat meningkatkan nilai fluiditas yang lebih baik. Hasil pengujian fluiditas paduan Al-11%Si yang ditambahkan Fe dan kemudian dilakukan penambahan Sr sebesar 0,015%; 0,03%, dan 0,045% diberikan dalam Tabel 4.26.

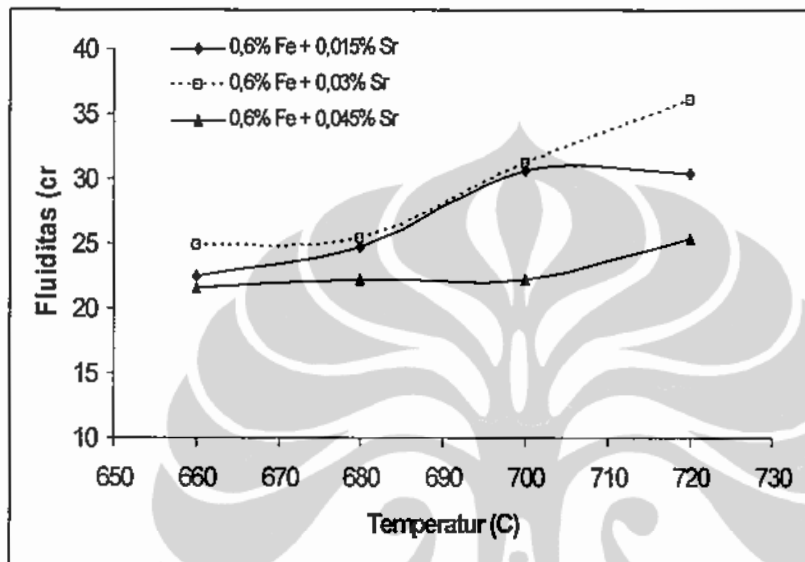
Tabel 4.26 Hasil Pengujian fluiditas pada paduan eutektik yang ditambahkan Fe dan Sr

Paduan Eutektik (Al-11% Si)					
0,6% Fe + 0,015% Sr		0,8% Fe + 0,015% Sr		1% Fe + 0,015% Sr	
Temp ($^{\circ}$ C)	Fluidity (cm)	Temp ($^{\circ}$ C)	Fluidity (cm)	Temp ($^{\circ}$ C)	Fluidity (cm)
660	22,45	660	23,80	660	22,65
680	24,75	680	24,25	680	23,50
700	30,60	700	25,20	700	24,10
720	30,40	720	30,40	720	31,30
0,6% Fe + 0,03% Sr		0,8% Fe + 0,03% Sr		1% Fe + 0,03% Sr	
Temp ($^{\circ}$ C)	Fluidity (cm)	Temp ($^{\circ}$ C)	Fluidity (cm)	Temp ($^{\circ}$ C)	Fluidity (cm)
660	24,85	660	20,50	660	22,15
680	25,45	680	22,65	680	23,85
700	31,25	700	26,00	700	24,40
720	36,00	720	30,20	720	33,05
0,6% Fe + 0,045% Sr		0,8% Fe + 0,045% Sr		1% Fe + 0,045% Sr	
Temp ($^{\circ}$ C)	Fluidity (cm)	Temp ($^{\circ}$ C)	Fluidity (cm)	Temp ($^{\circ}$ C)	Fluidity (cm)
660	21,60	660	22,05	660	20,20
680	22,20	680	23,10	680	22,00
700	22,30	700	23,30	700	26,20
720	25,45	720	25,50	720	27,95

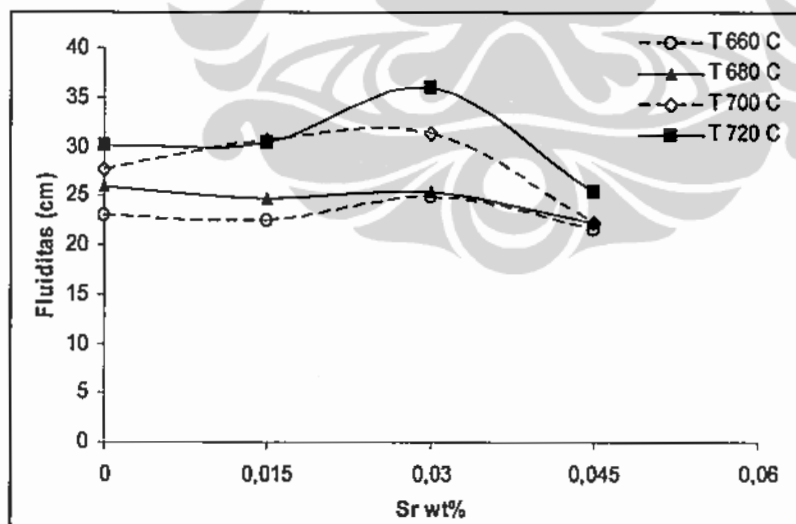
Hasil data pengujian fluiditas di atas menunjukkan bahwa pada semua komposisi kimia, semakin tinggi temperatur maka nilai fluiditas yang didapatkan juga semakin besar. Pada komposisi Fe yang dibuat tetap dan dengan

memfariasikan kandungan Sr menunjukkan hasil fluiditas mengalami perubahan. Pada paduan yang mengandung 1,6% Fe dan 0,015% Sr dengan temperatur 720°C diperoleh nilai fluiditas 30,4 cm. Peningkatan konsentrasi Sr sebesar 0,03% akan mengakibatkan peningkatan nilai fluiditas menjadi 36 cm. Pada penambahan konsentrasi Sr sebesar 0,045%, nilai fluiditasnya kembali turun menjadi 25,45 cm. Pengaruh morfologi penambahan Sr pada paduan akan menyebabkan terjadinya perubahan struktur silikon dan morfologi dari bentuk yang panjang menjadi bentuk granular. Disamping itu penambahan Sr juga akan menghambat terbentuknya β -intermetalik yang mempunyai sifat merugikan. Pada penambahan *modifier* Sr sebesar 0,015% terjadi peningkatan nilai fluiditas yang tidak terlalu signifikan. Peningkatan nilai fluiditas pada kondisi ini belum mencapai titik yang optimum. Hal ini dikarenakan pembentukan struktur baru mengalami *partially modification* atau modifikasi yang belum sempurna karena penggunaan kadar stronsium yang masih terlalu rendah. Penambahan *modifier* stronsium sampai nilai maksimum 0,03%, *range* pembekuan akan menjadi lebih pendek sehingga diperoleh peningkatan fluiditasnya dan struktur dari fasa eutektik silikon menjadi ideal (bulat dan terdistribusi) atau *fully modified*. Kondisi ini membuktikan bahwa nilai fluiditas optimum diperoleh pada pengujian fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium sebesar 0,03%. Pada penambahan *modifier* stronsium sebesar 0,045% terjadi pengkasaran partikel silikon dan perubahan bentuk dari silikon bulat yang halus ke bentuk jarum yang saling berhubungan, hal ini dikarenakan reaksi perubahan struktur eutektik tidak berlangsung dengan baik akibat jumlah kandungan stronsium yang terlalu tinggi (*overmodified*). Hal tersebut akan mengakibatkan struktur eutektik yang dihasilkan menjadi tidak ideal lagi (tidak bulat), sehingga mengakibatkan nilai fluiditas paduan menjadi rendah. Gambar 4.37, Gambar 4.38, dan Gambar 4.39 memperlihatkan grafik yang menunjukkan hubungan antara fluiditas dan temperatur dengan kadar Fe yang konstan dan Sr yang bervariasi. Dari ketiga grafik tersebut menunjukkan bahwa pada temperatur 720°C dengan komposisi Fe yang tetap dan pada konsentrasi penambahan 0,03% Sr diperoleh nilai fluiditas yang paling baik. Hal ini juga didukung oleh data yang diperlihatkan dalam Tabel 4.27

Universitas Indonesia

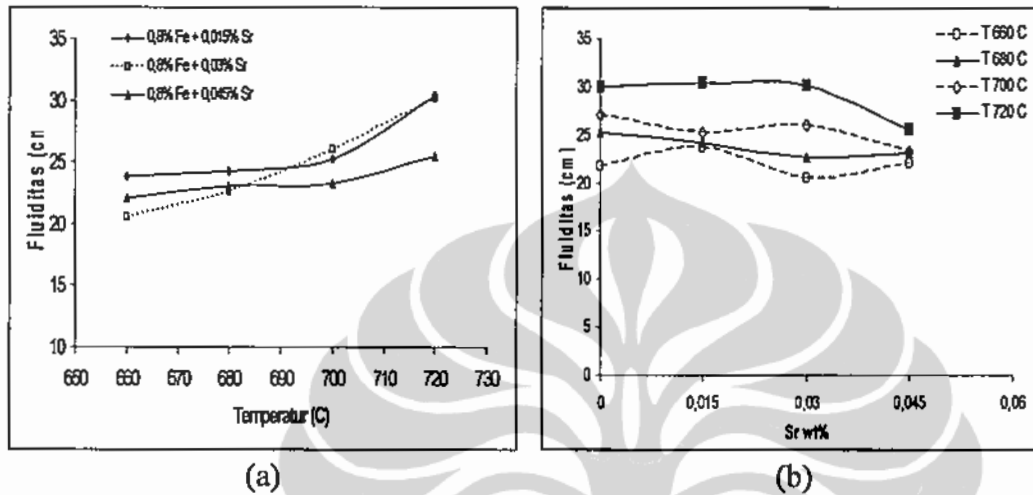


(a)

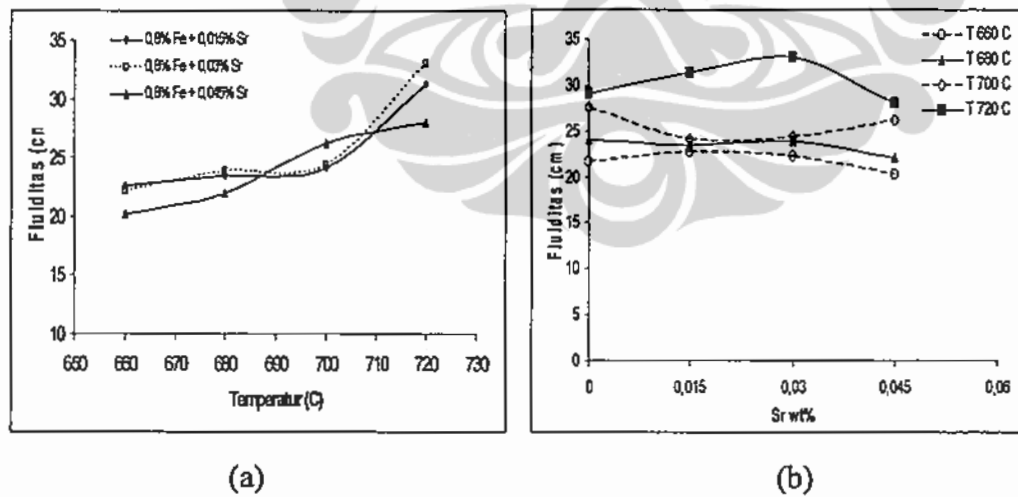


(b)

Gambar 4.37. (a) Hubungan nilai fluiditas dengan temperatur pada penambahan 0,6%Fe dan Sr yang bervariasi, (b) Hubungan kadar Sr dengan fluiditas pada setiap temperatur



Gambar 4.38. (a) Hubungan nilai fluiditas dengan temperatur pada penambahan 0,8%Fe dengan kadar Sr yang bervariasi (b) Hubungan antara penambahan Sr yang bervariasi dengan fluiditas pada temperatur yang berbeda [89]



Gambar 4.39. (a) Hubungan nilai fluiditas dengan temperatur pada penambahan 1%Fe dengan kadar Sr yang bervariasi (b) hubungan antara penambahan Sr yang bervariasi dengan fluiditas pada temperatur yang

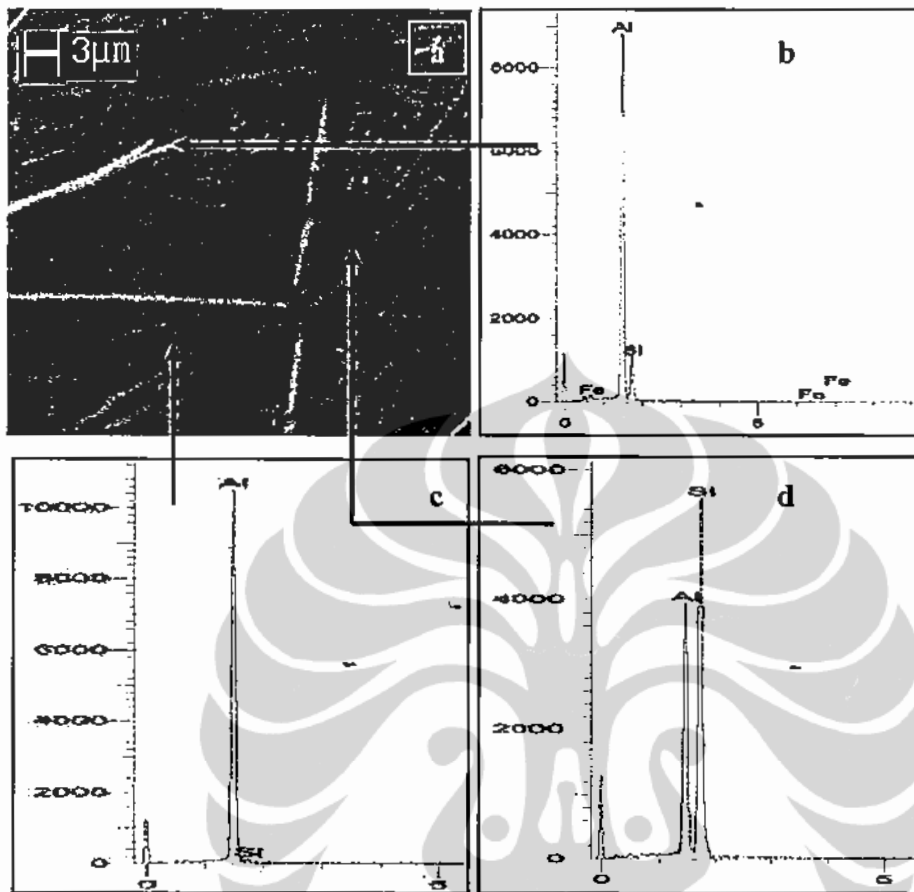
Tabel 4.27 Peningkatan Fluiditas Pada Tiap-tiap Penambahan Kosentrasi Fe dan Sr pada temperatur tertentu.

Temp (°C)	Penambahan Fe dan Sr (% berat)	Nilai Fluiditas (cm)	Peningkatan Fluiditas (%)
660	0,6 % Fe + 0,015 % Sr	22,45	9,7 %
	0,6 % Fe + 0,030 % Sr	24,85	
	0,6 % Fe + 0,045 % Sr	21,6	- 13,0 % (penurunan)
	0,8 % Fe + 0,015 % Sr	23,8	- 13,9 % (Penurunan)
	0,8 % Fe + 0,030 % Sr	20,5	
	0,8 % Fe + 0,045 % Sr	22,05	10,0 %
720	0,6 % Fe + 0,015 % Sr	30,4	18,42 %
	0,6 % Fe + 0,030 % Sr	36,0	
	0,6 % Fe + 0,045 % Sr	25,45	- 34,5 % (penurunan)
	0,8 % Fe + 0,015 % Sr	30,4	0,65 %
	0,8 % Fe + 0,030 % Sr	30,2	
	0,8 % Fe + 0,045 % Sr	25,5	- 15,5 % (penurunan)

Dari hasil perhitungan pada tabel di atas memperlihatkan bahwa dengan penambahan Sr dari 0,015% menjadi 0,03% akan menaikkan nilai fluiditas. Tetapi dengan penambahan yang lebih besar Sr akan menurunkan kembali nilai fluiditas. Penambahan *modifier* Sr sebesar 0,03% menghasilkan nilai fluiditas yang paling tinggi.

4.2.2.3. Analisa Struktur Mikro Pada Paduan Al-11% Si Menggunakan SEM/EDX, dan XRD

Pengujian dan analisa struktur mikro dengan menggunakan peralatan SEM (*Scanning Electron Microscope*) bertujuan untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang terbentuk. Identifikasi fasa-fasa yang terbentuk pada foto struktur mikro digunakan pengujian EDX, dengan cara melakukan penembakan pada masing-masing titik/*spot* (matrik aluminium, struktur silikon dan intermetalik). Hasil penembakan ditunjukkan seperti yang tampak pada Gambar 4.40



Gambar 4.40 (a) Hasil SEM Paduan Al-11% Si-1,2%Fe dengan etsa HF 0,5%. hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks Al (d) eutektik silikon.

Dari Gambar 4.40 dan Tabel 4.28 dari hasil pengujian SEM/EDX dapat dilihat bahwa fasa-fasa yang terkandung di dalam paduan aluminium silikon eutektik (Al-11% Si) merupakan kandungan-kandungan elemen yang memungkinkan untuk terbentuknya fasa-fasa intermetalik.

Tabel 4.28 Komposisi fasa-fasa yang terbentuk pada paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 1,2wt % Fe

No	Komposisi (% berat)			Morfologi
	Al	Si	Fe	
1	72,02	27,98	-	Abu-abu, pipih, panjang ~ 6 μ m
2	98,62	1,38	-	Agak hitam
3	74,86	16,26	8,88	Putih, panjang 12 μ m, bercabang
4	64,66	18,89	16,46	Putih, panjang ~ 52 μ m, bercabang dan besar

Foto struktur mikro hasil pengujian SEM/EDX secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran H dan I.

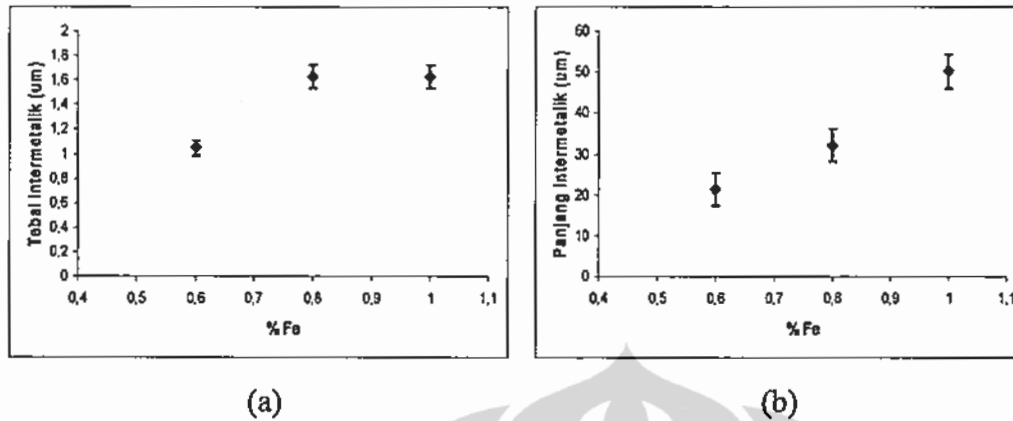
4.2.2.4. Analisis Kuantitatif dan Kualitatif Struktur Mikro Paduan Al-11% Si

Analisis kuantitatif paduan Al-11%Si menjelaskan ukuran (panjang dan tebal) intermetalik dengan menggunakan fasilitas yang terdapat pada peralatan SEM dan juga dengan menghitung fraksi luas intermetalik hasil pengujian XRD. Pengaruh penambahan Fe terhadap morfologi fasa intermetalik pada paduan Al-11%Si dapat dilihat pada Tabel 4.29 dan Gambar 4.41. Dari Tabel 4.29 terlihat bahwa semakin besar kadar Fe yang di tambahkan maka tebal dan panjang intermetalik juga semakin besar

Tabel 4.29 Hubungan antara persentase kadar Fe dengan tebal dan panjang intermetalik yang terbentuk pada Al-11% Si yang ditambahkan Fe sebesar 0,6; 0,8; dan 1%

% Fe	Tebal Intermetalik (μm)	Panjang Intermetalik (μm)
0,6	1,05	21,4
0,8	1,63	32,2
1,0	1,63	50,3

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut dan grafik pada Gambar 4.41 dapat dilihat bahwa pada komposisi aluminium eutektik (Al-11% Si) dengan penambahan Fe 0,6%; tebal intermetalik yang terbentuk mencapai 1,05 μm dan panjangnya mencapai 21,4 μm . Pada penambahan Fe 0,8%; dimensi fasa intermetalik bertambah besar yaitu dengan tebal 1,63 μm serta panjang 32,2 μm . Pada penambahan Fe 1,0%, tebal intermetalik tidak mengalami perubahan (1,63 μm) tetapi ukuran panjang mengalami peningkatan yang cukup signifikan (50,2 μm).

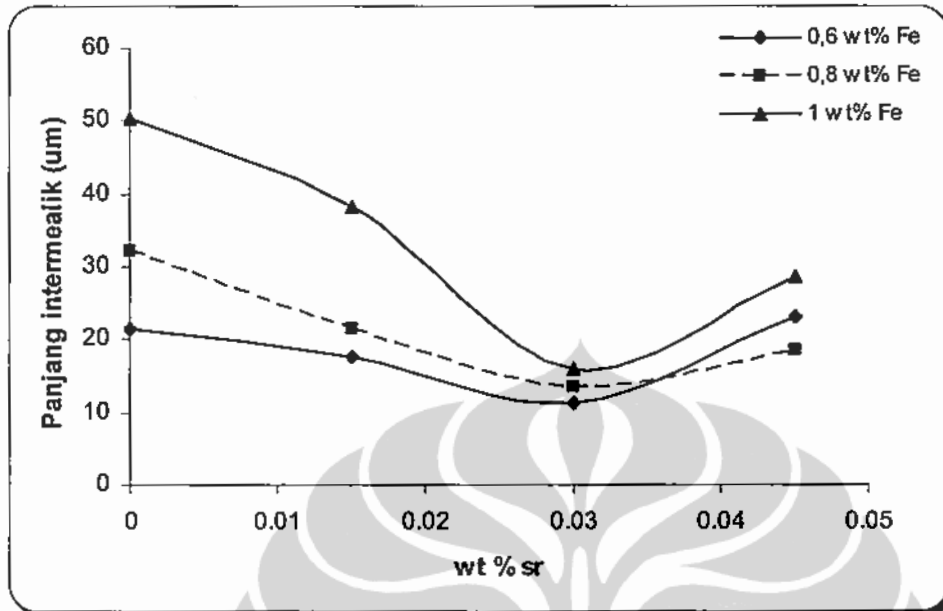


Gambar 4.41 Hubungan antara persentase kadar Fe dengan tebal dan panjang intermetalik yang terbentuk pada AlSi eutektik.

Dari hasil diatas secara umum dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan kadar Fe yang semakin banyak maka fasa intermetalik yang terbentuk akan mempunyai panjang dan tebal yang semakin tinggi. Kecepatan pendinginan juga sangat menentukan ukuran dan jenis fasa intermetalik yang terbentuk. Semakin besar dimensi fasa intermetalik Al_3FeSi maka sifat fluiditas akan semakin turun, sedangkan jika paduan dilakukan penambahan Sr, maka *modifier* Sr akan mempengaruhi fasa intermetalik yang terbentuk seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.30 dan Gambar 4.42.

Tabel 4.30 Hasil pengukuran panjang maksimal fasa intermetalik dengan variabel Fe dan Sr pada Al-11% Si

Fe	Sr							
	0 %		0,015 %		0,030 %		0,045 %	
	Data (μm)	Rata-rata (μm)	Data (μm)	Rata-rata (μm)	Data (μm)	Rata-rata (μm)	Data (μm)	Rata-rata (μm)
0,6 %	24	21,4	16	17,5	9,67	11,3	25	23,0
	18,75		19		13		21	
0,8 %	30,75	32,2	21	21,5	15	13,5	19,5	18,4
	33,75		22		12		17,25	
1 %	54,75	50,3	37,5	38,2	15	16,0	23	28,5
	45,75		39		17		34	



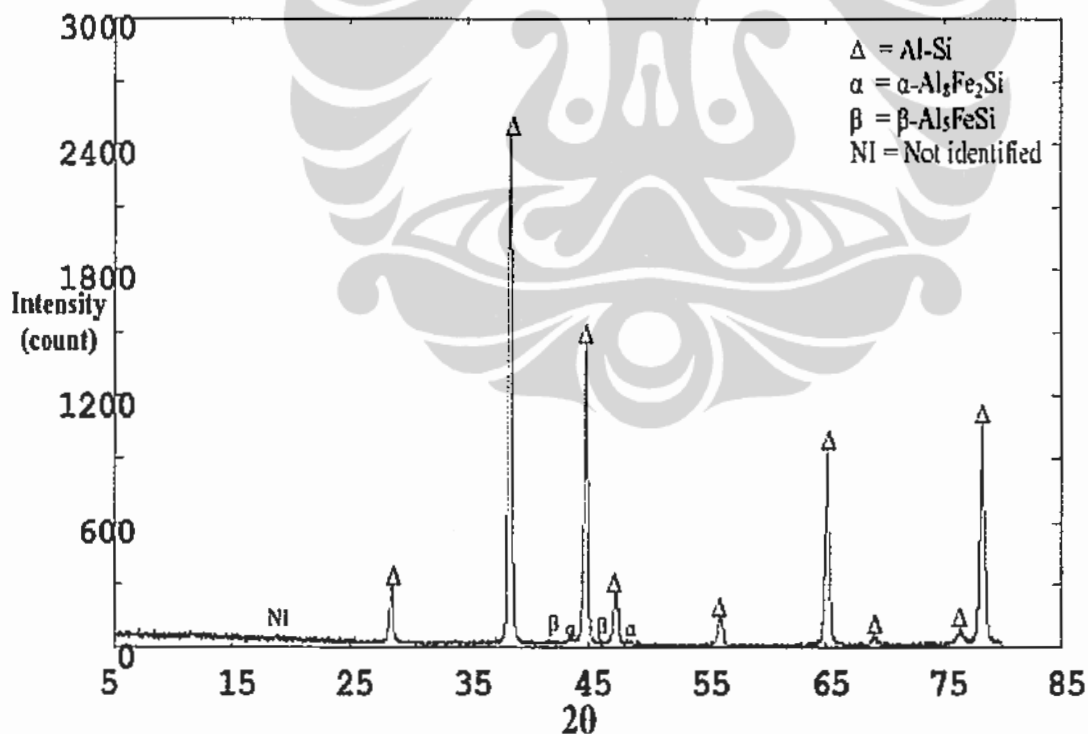
Gambar 4.42 Grafik pengukuran panjang maksimal fasa intermetalik dengan variabel Fe dan Sr pada Al-11% Si.

Data hasil pengukuran panjang intermetalik yang terbentuk pada Tabel 4.30 dan Gambar 4.42 memperlihatkan bahwa paduan yang ditambahkan unsur Fe yang konstan, mengalami kecenderungan yang sama jika ditambahkan *modifier* Sr, dimana ukuran panjang intermetalik mengalami pemendekan saat ditambahkan *modifier* Sr. Pada penambahan 0,015% Sr, paduan mengalami *partially modification*, kemudian pada penambahan 0,03% Sr paduan mengalami *fully modification*, sedangkan dengan penambahan 0,045% Sr paduan mengalami *overmodification*. Pada paduan Al-11% Si yang ditambahkan kadar Fe sebanyak 0,6%, tanpa penambahan unsur *modifier* Sr panjang intermetaliknya 21,4 μm . Panjang intermetalik mengalami pemendekan saat ditambahkan *modifier* Sr sejumlah 0,015% menjadi 17,5 μm , dan semakin pendek lagi dengan diberikan 0,030% *modifier* Sr menjadi 11,3 μm . Pada saat penambahan *modifier* Sr sebesar 0,045%, akan terjadi peningkatan panjang intermetalik menjadi 23,0 μm .

Pada paduan Al-11%Si dengan penambahan kadar Fe sebesar 0,8%, tanpa penambahan unsur *modifier* Sr, panjang intermetaliknya 32,2 μm . Panjang intermetalik berkurang saat ditambahkan *modifier* Sr sejumlah 0,015% menjadi 21,5 μm , dan bertambah pendek lagi pada penambahan 0,03% *modifier* Sr

menjadi 13,5 μm . Pada penambahan *modifier* Sr sebesar 0,045%, panjang intermetalik bertambah menjadi 18,4 μm . Pada paduan Al-11%Si yang ditambahkan kadar Fe sebesar 1,0% tanpa dilakukan modifikasi, panjang intermetaliknya 50,3 μm . Panjang intermetalik menjadi 38,2 μm pada penambahan *modifier* Sr sejumlah 0,015%, sedangkan pada penambahan 0,03% *modifier* Sr terjadi penurunan panjang menjadi 16,0 μm . Akan tetapi saat ditambahkan *modifier* Sr sebanyak 0,045%, panjang intermetalik memanjang menjadi 28,5 μm .

Hasil XRD dari paduan Al-11 %Si dengan penambahan unsur Fe 0,6 % dan *modifier* Sr 0,015% diperlihatkan dalam Gambar 4.43 dan Tabel 4.31. Secara lengkap hasil pengujian XRD paduan Al-11% Si ditampilkan pada Lampiran J.



Gambar 4.43. Data hasil Pengujian XRD pada paduan Al-11% Si dengan penambahan 0,6% Fe dan 0,015% Sr

Tabel 4.31 Data hasil pengolahan data menggunakan *Powder-X* pada paduan Al-11 %Si + 0,6% Fe + 0,015% Sr

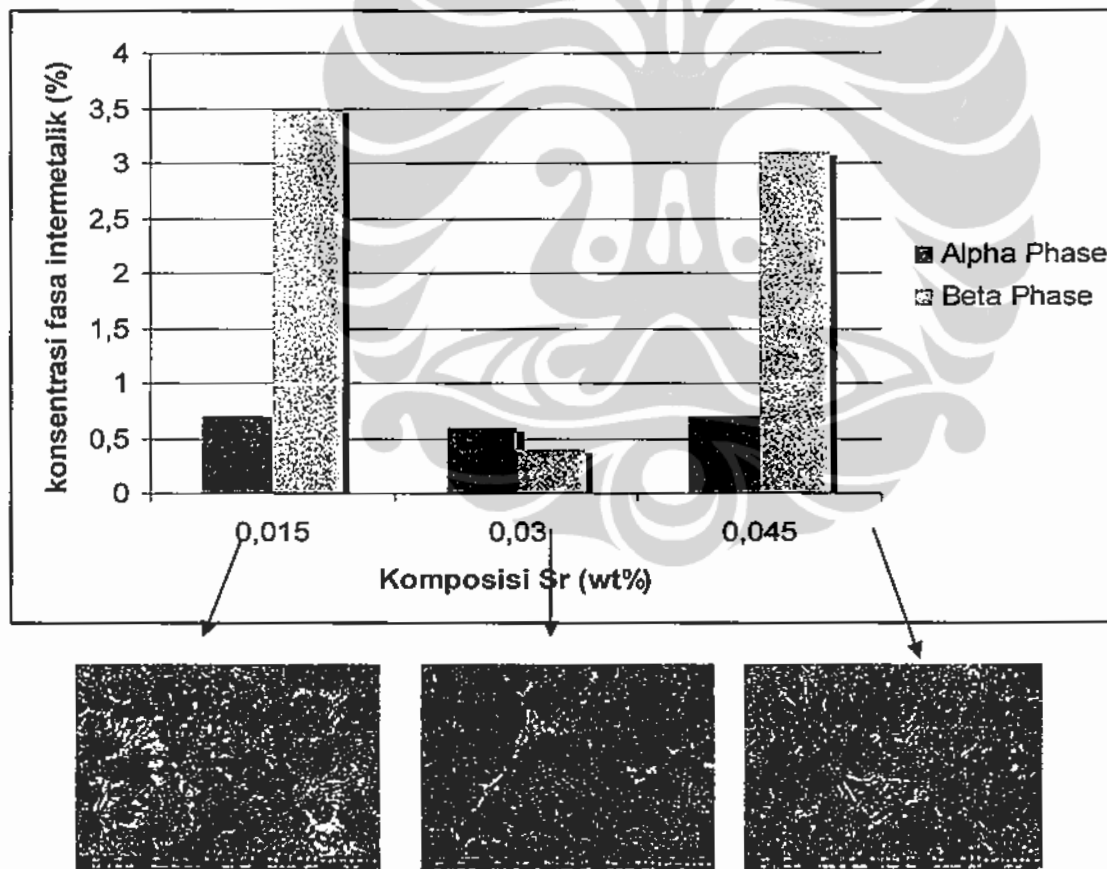
Fasa	Alpha	Beta	Al-Si
Luas peak	460,7	303,8	4882,2
	302	3466,5	46112,7
			15842,6
			5319,9
			3479
			10156,4
			669,2
			1618,6
			11865
			2416,8
Jumlah	762,7	3770,3	102362,4
Persentase	0,7	3,5	95,8

Dari hasil analisa luas spektrum XRD pada paduan Al-11% Si + 0,6% Fe + 0,015% Sr, dapat diketahui bahwa fasa intermetalik yang terbentuk dalam paduan tersebut adalah fasa α -AlFeSi sebanyak 0,7% dan fasa β -AlFeSi sebanyak 3,5%. Pada paduan variabel yang lain juga dilakukan analisa konsentrasi fasa intermetalik α -AlFeSi dan β -AlFeSi dengan cara yang sama. Hasil pengolahan data pengujian XRD untuk mengidentifikasi fasa intermetalik yang terbentuk karena pengaruh penambahan *modifier* Sr direkapitulasikan pada Tabel 4.32, sedangkan identifikasi nilai konsentrasi fasa intermetalik terhadap variable penambahan Sr pada paduan Al-11 %Si + 0,6% Fe serta gambar hasil pengamatan struktur mikronya diberikan dalam Gambar 4.44. Dari Tabel 4.32 dan Gambar 4.44 menunjukkan bahwa konsentrasi fasa intermetalik α -Al₈Fe₂Si cenderung stabil terhadap penambahan kadar Sr. Pada saat penambahan konsentasi Sr sebesar 0,015 %, konsentrasi fasa intermetalik α -Al₈Fe₂Si sebesar 0,7%. Pada saat

penambahan Sr sebesar 0,030%, konsentrasi fasa intermetalik α - $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ sedikit menurun menjadi 0,6%, sedangkan pada saat konsentrasi ditingkatkan menjadi 0,045%, menyebabkan peningkatan fasa intermetalik α - $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ menjadi 0,7%.

Tabel 4.32 Identifikasi nilai konsentrasi fasa intermetalik terhadap variable penambahan Sr pada paduan Al-11% Si + 0,6% Fe

Fasa intermetalik	Sr		
	0,015 %	0,030%	0,045%
α - $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$	0,7	0,6	0,7
β - Al_5FeSi	3,5	0,4	3,1



Gambar 4.44. Identifikasi nilai konsentrasi fasa intermetalik terhadap *variable* penambahan Sr pada paduan Al-11% Si + 0,6% Fe serta gambar hasil pengamatan struktur mikronya.

Berbeda halnya dengan fasa intermetalik α -Al₈Fe₂Si, fasa intermetalik β -Al₅FeSi cenderung mudah berubah konsentrasinya seiring penambahan *modifier* Sr. Pada penambahan 0,015% Sr ke dalam paduan, konsentrasi fasa intermetalik β -Al₅FeSi sekitar 3,5%. Ketika ditambahkan *modifier* Sr sebanyak 0,03%, konsentrasi fasa intermetalik β -Al₅FeSi menurun secara cepat menjadi 0,4%, bahkan nilai konsentrasinya dibawah nilai konsentrasi fasa α -Al₈Fe₂Si. Pada penambahan *modifier* Sr mencapai 0,045%, konsentrasi fasa β -Al₅FeSi meningkat tajam menjadi 3,1%.

Perubahan nilai konsentrasi fasa intermetalik α -Al₈Fe₂Si dan β -Al₅FeSi terhadap penambahan *modifier* Sr memiliki kecenderungan yang sama yaitu mengalami penurunan nilai konsentrasi saat ditambahkan *modifier* Sr sebanyak 0,03%, dan mengalami peningkatan nilai konsentrasi saat penambahan 0,045% Sr, walaupun perubahan nilai konsentrasi fasa intermetalik α -Al₈Fe₂Si tidak terlalu signifikan dibandingkan β -Al₅FeSi.

Dibandingkan dengan data hasil pengamatan struktur mikro menggunakan SEM terlihat bahwa fasa intermetalik dengan morfologi jarum-jarum yang merupakan ciri-ciri dari fasa β -Al₅FeSi mengalami pengurangan jumlah saat penambahan Sr sebanyak 0,030%, dan akan bertambah ketika ditambahkan Sr sebanyak 0,045%. Mengacu pada hasil penelitian sebelumnya, penelitian ini memiliki kecenderungan yang sama, dimana pada kondisi *fully modified* yaitu saat penambahan *modifier* Sr sebanyak 0,03% maka intermetalik β -Al₅FeSi mengalami fragmentasi dan pengurangan jumlah. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Mulazimoglu^[33] yang menyatakan bahwa Sr yang ditambahkan ke dalam paduan dapat teradsorpsi pada permukaan fasa α -Al₈Fe₂Si dan bertindak sebagai penghalang larutnya silikon kedalam fasa α -Al₈Fe₂Si untuk membentuk fasa β -Al₅FeSi. Oleh karena itu, fasa α -Al₈Fe₂Si tetap stabil dan fasa β -Al₅FeSi menjadi terhambat pembentukannya.

Pada saat *modifier* Sr ditambahkan sebesar 0,045% ke dalam paduan, kondisi ini dapat dikatakan sebagai overmodifikasi, karena nilai konsentrasi fasa β -Al₅FeSi meningkat tajam dan nilai konsentrasinya hampir sama saat penambahan *modifier* Sr sebanyak 0,015%. Menurut Samuel^[14] hal ini

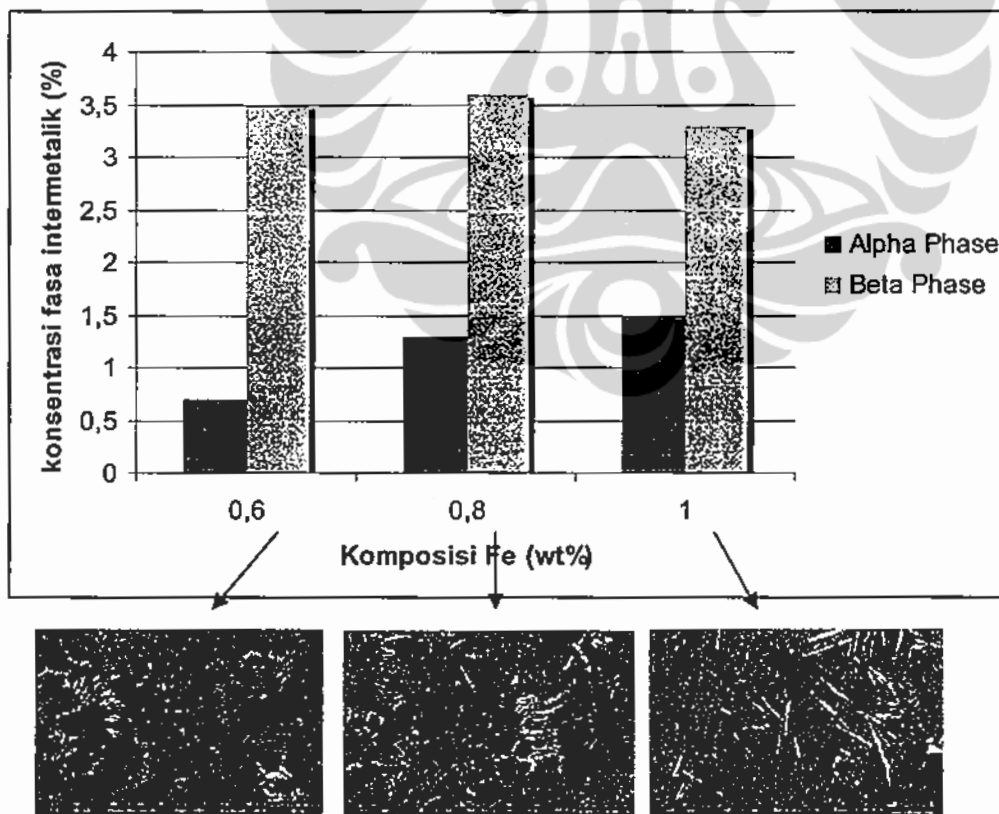
Universitas Indonesia

dikarenakan penambahan unsur stronsium yang berlebih sehingga Sr membentuk suatu fasa intermetalik baru Al-Si-Sr, yang mengakibatkan fungsi Sr sebagai *modifier* hilang.

Penambahan Fe dan Sr pada paduan Al-11 %Si dengan *modifier* yang konstan (0,015% Sr) namun dengan variabel unsur Fe yang berbeda (0,6; 0,8; dan 1% Fe), hasil XRD-nya ditampilkan pada Tabel 4.33 dan Gambar 4.45.

Tabel 4.33 Identifikasi nilai konsentrasi fasa intermetalik pada paduan Al-11% Si ditambah 0,015% Sr

Fasa intermetalik	Fe		
	0,6%	0,8%	1,0%
α -Al ₃ Fe ₂ Si	0,7	1,3	1,5
β -Al ₅ FeSi	3,5	3,6	3,3



Gambar 4.45 Identifikasi kosentrasi fasa intermetalik terhadap variable penambahan Fe pada paduan Al-11% Si + 0,015% Sr serta hasil gambar hasil pengamatan struktur mikronya.

Pada paduan yang ditambahkan 0,015%Sr, konsentrasi fasa intermetalik $\alpha\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kadar Fe yang ditambahkan ke paduan. Dengan penambahan 0,6%Fe ke dalam paduan, nilai konsentrasi fasa $\alpha\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ sebesar 0,7%. Ketika unsur Fe ditambahkan menjadi 0,8%, nilai konsentrasi fasa $\alpha\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ bertambah menjadi 1,3%. Dan ketika 1,0% Fe ditambahkan pada paduan, konsentrasi fasa $\alpha\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ semakin tinggi nilainya menjadi 1,5%.

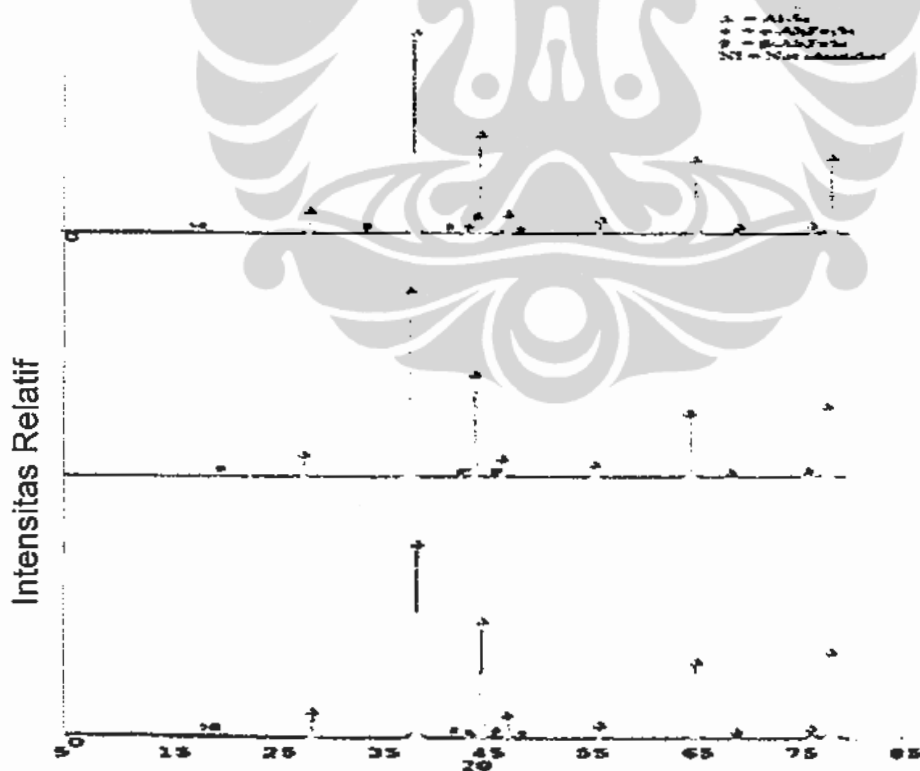
Pada paduan yang sama, konsentrasi fasa intermetalik $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ yang terbentuk akan mengalami peningkatan dengan penambahan 0,6% Fe sampai 0,8% Fe, namun nilai konsentrasinya turun saat dilarutkan 1,0% Fe. Penambahan 0,6% Fe ke dalam paduan, nilai konsentrasi fasa intermetalik $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ adalah sebesar 3,5%. Ketika unsur Fe ditambahkan menjadi 0,8%, nilai konsentrasi fasa $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ semakin meningkat menjadi 3,6%. Akan tetapi saat unsur Fe ditambahkan ke dalam paduan sejumlah 1,0%, nilai konsentrasi fasa $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ menurun menjadi 3,3%.

Penurunan nilai konsentrasi ini kemungkinan disebabkan oleh adanya puncak-puncak yang terlalu saling berdekatan satu sama lain sehingga sulit untuk memisahkan dan mengidentifikasi puncak-puncak tersebut. Secara umum hasil penelitian ini memiliki hasil yang sama bila dirujuk pada hasil penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dimana semakin meningkatnya kadar Fe, fasa intermetalik yang terbentuk juga akan semakin tinggi, khususnya fasa intermetalik $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$. Namun pada hasil penelitian ini, tidak hanya fasa intermetalik $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ saja yang meningkat jumlah konsentrasinya, namun jumlah dan konsentrasi fasa $\alpha\text{-Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ juga mengalami peningkatan seiring dengan penambahan unsur Fe ke dalam paduan. Hal ini dikarenakan Fe memiliki tingkat kelarutan yang sangat rendah pada aluminium *solid solution*, yaitu sekitar ~0,05%. Karena itu, pada saat pembekuan, Fe yang tidak terlarut akan membentuk *second phase intermetallic*. Dengan demikian, semakin banyak unsur Fe yang ditambahkan, maka jumlah Fe yang tidak terlarut dan akan membentuk fasa intermetalik juga akan semakin meningkat jumlahnya. Gambar 4.45 juga

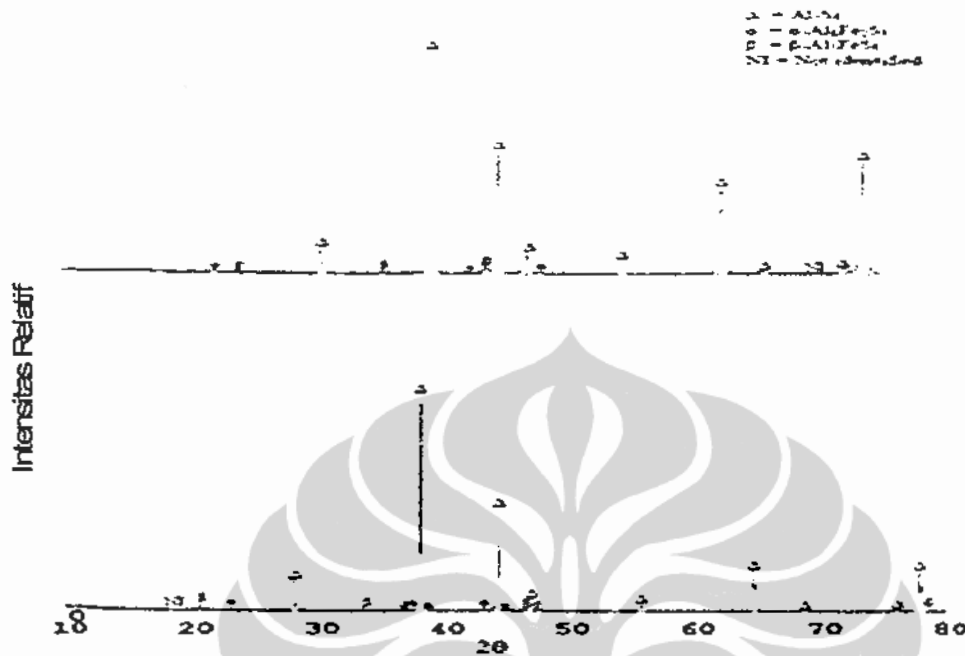
Universitas Indonesia

memperlihatkan bahwa nilai konsentrasi fasa intermetalik β -Al₅FeSi selalu lebih tinggi dari pada nilai konsentrasi fasa intermetalik α -Al₃Fe₂Si. Hal ini dapat diindikasikan bahwa dengan penambahan *modifier* Sr yang masih rendah (dalam penelitian ini 0,015%Sr), fasa intermetalik yang lebih dominan terbentuk adalah fasa intermetalik β -Al₅FeSi. Hal ini juga dapat dibuktikan pada hasil gambar pengamatan struktur mikro dimana fasa intermetalik yang dominan terbentuk memiliki morfologi seperti jarum-jarum yang merupakan ciri-ciri penampakan fasa intermetalik β -Al₅FeSi.

Selanjutnya, data hasil pengujian XRD secara komprehensif dapat dilihat pada Gambar 4.46 dan Gambar 4.47 serta Tabel 4.34 dan Tabel 4.35 yang merupakan hasil perhitungan luas area dibawah peak pada paduan eutektik aluminium silikon yang ditambahkan 0,6% dan 0,8%Fe dengan Sr yang bervariasi, antara 0,015%; 0,03% dan 0,045%



Gambar 4.46 Analisis XRD Paduan eutektik Aluminium Silikon + 0,6%Fe + (0,015%; 0,03% dan 0,045% Sr)



Gambar 4.47 Analisis XRD Paduan eutektik Aluminium Silikon + 0,8% dan 1%Fe +0,015%, 0,03% dan 0,015% Sr.

Tabel 4.34 Perhitungan luas area dibawah peak Paduan eutektik Aluminium Silikon + 0,6%Fe + (0,015wt%; 0,03% dan 0,045%Sr)

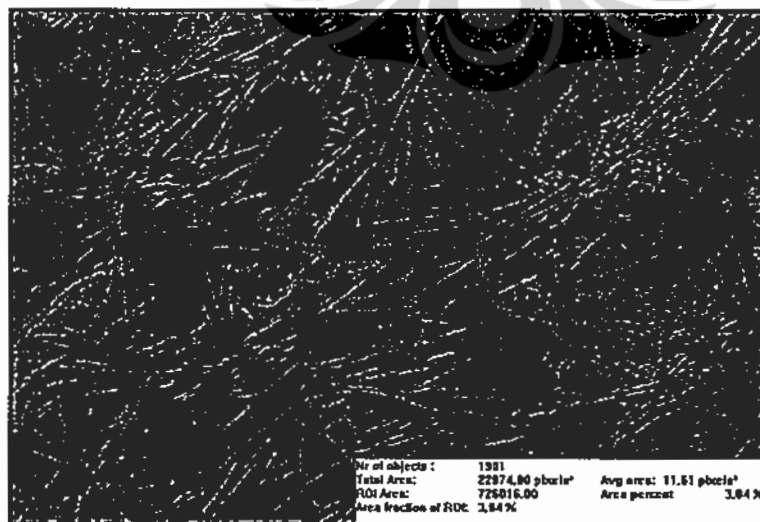
Fasa	Alpha	Beta	Al-Si	Fasa	Alpha	Beta	Al-Si	Fasa	Alpha	Beta	Al-Si	
Luas peak	460,7	303,8	4882,2	Luas peak	576	250	4392	Luas peak	288	208	3696	
	302	3466,5	46112,7		264	330	38375,3		245	184	26531,8	
			15842,6				26191,1				1764	8280,2
			5319,9				6528					5849,9
			3479				3250					3850
			10156,4				14439,8					1596
			669,2				3724,9					10920
			1618,6				620					4248,1
			11865				1026					308
			2416,8				21215,6					750
					6090							
Jumlah	762,7	3770,3	102362,4	Jumlah	840	580	125852,7	Jumlah	533	2156	66030	
Persentase	0,7	3,5	95,8	Persentase	0,6	0,4	99,0	Persentase	0,7	3,1	96,2	

Tabel 4.35 Perhitungan luas area dibawah peak Paduan eutektik Aluminium Silikon+ 0,8% dan 1%Fe +0,015wt%, 0,03% dan 0,015%Sr

Fasa	Alpha	Beta	Al-Si	Fasa	Alpha	Beta	Al-Si
Luas peak	112	384	2310	Luas peak	1013,8	316,9	4515,2
	152	272	15796,1		39780,9	757,5	24438,2
	110	88	4374,1		180,7	1793,9	4772,5
		84	728		678,2	184	3368,3
		95	264			192	19255,2
		138	2142			220	698,4
			128			372	2282
			125			264	19558,2
			1392				
Jumlah	374	1061	27259,2	Jumlah	41653,6	4100,3	78888
Persentase	1,3	3,6	95,1	Persentase	33,4	3,3	63,3

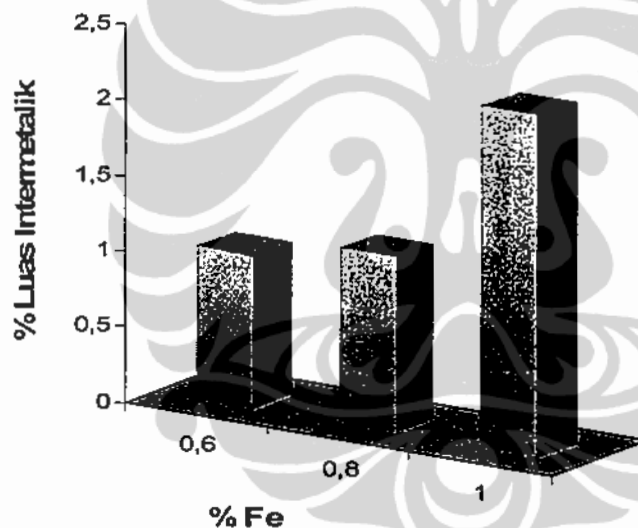
4.2.2.5. Perhitungan Fraksi Luas Area pada Paduan Al-11% Si

Perhitungan fraksi luas fasa intermetalik pada paduan Al-11%Si ditampilkan pada Gambar 4.48 di bawah ini, dan di tampilkan pada Lampiran L.



Gambar 4.48 Hasil perhitungan fasa intermetalik pada foto SEM pada Al-13,4% Si dengan penambahan 1,12% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.

Dengan cara perhitungan yang sama dengan yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, maka hasil perhitungan fraksi luas intermetalik pada paduan Al-11% Si ditampilkan dengan grafik pada Gambar 4.49. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin tinggi kadar Fe maka jumlah intermetalik yang terbentuk akan semakin banyak. Pada paduan Al-11% Si dengan penambahan 0,6% Fe memiliki jumlah fraksi luas intermetalik 1,01%. Sementara pada penambahan Fe 0,8% dan 1% berturut-turut mempunyai fraksi fasa intermetalik masing-masingnya sebesar 1,16% dan 2,26%; Dengan meningkatnya kadar Fe maka akan memperbanyak fraksi luas intermetalik dan selanjutnya berarti akan menurunkan fluiditas paduan aluminium.



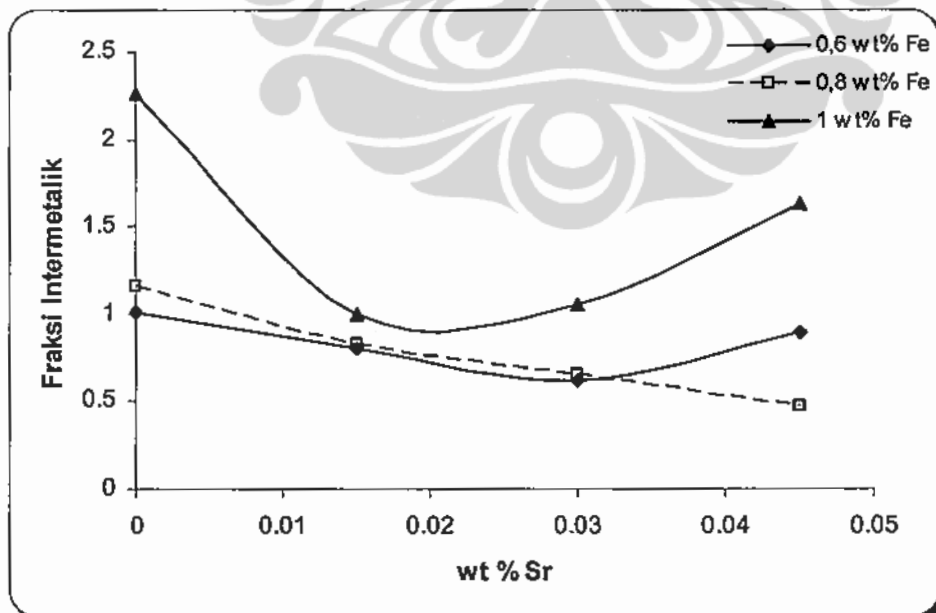
Gambar 4.49 Hubungan antara persentase kadar Fe dan persentase luas intermetalik yang terbentuk pada Al-11%Si.

Data hasil perhitungan fraksi intermetalik pada paduan Al-11% Si dengan variabel penambahan unsur Fe dan modifier Sr selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.36 dan Gambar 4.50. Dari tabel dan gambar tersebut dapat dinyatakan bahwa pada paduan yang ditambahkan unsur Fe sebesar 0,6% dan 1,0%, mengalami kecenderungan yang sama saat ditambahkan *modifier* Sr. Nilai fraksi luas area dari fasa intermetalik mengalami penurunan saat ditambahkan *modifier*

Sr sebanyak 0,015% dan 0,030%, namun mengalami peningkatan nilai fraksi saat ditambahkan modifier Sr sebanyak 0,045%. Berbeda halnya pada paduan yang ditambahkan unsur 0,8% Fe, mengalami penurunan nilai fraksi dari fasa intermetalik yang terbentuk seiring dengan penambahan modifier 0,015; 0,03; dan 0,045 % Sr

Tabel 4.36 Data hasil perhitungan fraksi fasa intermetalik dengan variabel Fe dan Sr pada Al-11% Si menggunakan PISCARA

Fe	Sr							
	0 %		0,015 %		0,030 %		0,045 %	
	Data (%)	Rata-rata (%)	Data (%)	Rata-rata (%)	Data (%)	Rata-rata (%)	Data (%)	Rata-rata (%)
0,6 %	1,01	1,01	0,7	0,8	0,68	0,62	1,04	0,9
	1,01		0,9		0,55		0,76	
0,8 %	1,16	1,16	0,92	0,83	0,83	0,65	0,35	0,47
	1,16		0,73		0,48		0,58	
1 %	2,5	2,26	1,41	1,39	1,25	1,05	1,82	1,63
	2,02		1,38		0,85		1,44	



Gambar 4.50 Grafik fraksi fasa intermetalik dengan variabel Fe dan Sr pada Al-11% Si

Pada paduan yang ditambahkan unsur Fe sebanyak 0,6% tanpa unsur *modifier* Sr, nilai fraksi intermetaliknya adalah 1,01%. Sedangkan ketika ditambahkan 0,015% Sr, nilai fraksi intermetalik mengalami pengurangan menjadi 0,8%. Pada penambahan *modifier* Sr menjadi 0,030% Sr, nilai fraksi intermetaliknya mengalami penurunan kembali yaitu menjadi 0,62%. Tetapi ketika ditambahkan *modifier* Sr mencapai 0,045%, nilai fraksi intermetalik naik namun masih dibawah nilai fraksi intermetalik pada paduan yang tidak dilakukan modifikasi yaitu 0,9%.

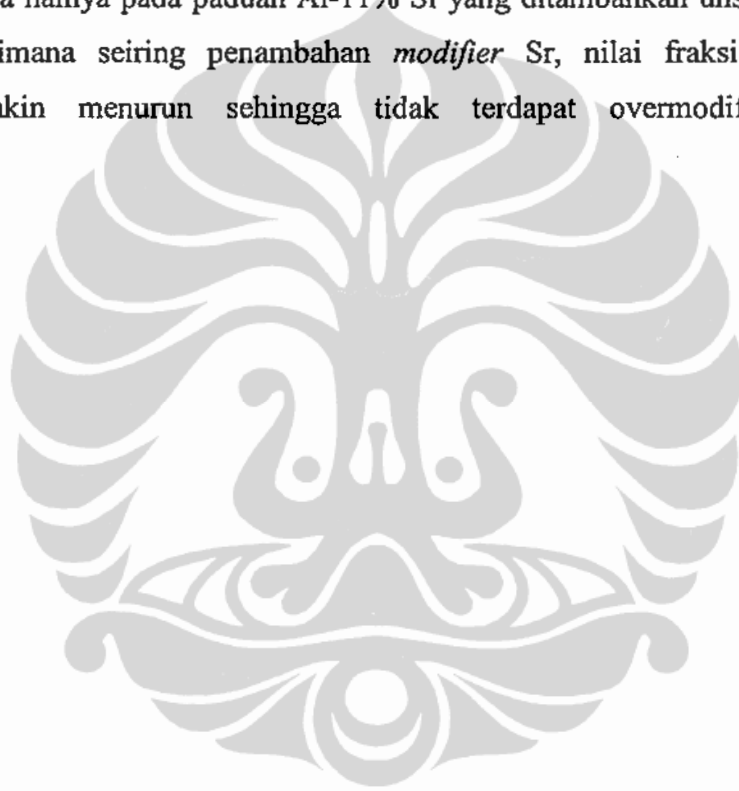
Pada paduan yang ditambahkan unsur Fe sebanyak 1,0%, dengan ketidakhadiran unsur *modifier* Sr didapat nilai fraksi intermetaliknya sebesar 2,26%. Penambahan 0,015% Sr pada paduan, nilai fraksi intermetalik mengalami pengurangan menjadi 1,39%. Kemudian saat kadar *modifier* Sr dinaikkan menjadi 0,030% Sr, nilai fraksi intermetaliknya mengalami penurunan kembali yaitu menjadi 1,05%. Tetapi ketika ditambahkan *modifier* Sr mencapai 0,045%, nilai fraksi intermetalik naik namun masih dibawah nilai fraksi intermetalik pada paduan yang tidak dilakukan modifikasi yaitu 1,63%.

Pada paduan yang ditambahkan unsur Fe sebanyak 0,8%, kecenderungan nilai fraksi intermetalik yang terbentuk terhadap penambahan *modifier* Sr berbeda dengan kecenderungan pada paduan yang ditambahkan unsur pengotor Fe 0,6 % an 1,0%. Pada paduan dengan 0,8% Fe, dengan semakin bertambahnya unsur *modifier* Sr maka nilai fraksi intermetalik yang terbentuk akan semakin menurun. Dengan ketidakhadiran unsur *modifier* Sr, nilai fraksi intermetaliknya pada paduan dengan 0,8% Fe adalah 1,16%. Sedangkan ketika ditambahkan 0,015 % Sr, nilai fraksi intermetalik mengalami pengurangan menjadi 0,83%. Kemudian saat kadar *modifier* Sr dinaikkan menjadi 0,030% Sr, nilai fraksi intermetaliknya mengalami penurunan kembali yaitu menjadi 0,65%. Dan ketika ditambahkan unsur *modifier* Sr sebanyak 0,045%, nilai fraksi intermetalik mengalami penurunan nilai kembali yaitu 0,47%.

Pada paduan Al-11% Si yang ditambahkan unsur Fe sebanyak 0,6% dan 1%, dengan penambahan 0,015% Sr paduan mengalami modifikasi sebagian (*partially modification*), dimana hal ini terlihat dari penurunan nilai fraksi area

Universitas Indonesia

fasa intermetalik paduan dibandingkan dengan tanpa modifikasi. Kemudian saat dimodifikasi 0,030% Sr mengalami modifikasi penuh (*full modification*), hal ini terlihat dari penurunan nilai fraksi area fasa intermetalik dari paduan yang dimodifikasi dengan 0,015% Sr. Pada penambahan 0,045% Sr mengalami modifikasi berlebih (*overmodification*), karena nilai fraksi area intermetalik meningkat setelah sebelumnya mengalami *full modification* ketika ditambahkan 0,030% Sr. Berbeda halnya pada paduan Al-11% Si yang ditambahkan unsur Fe sebanyak 0,8% dimana seiring penambahan *modifier* Sr, nilai fraksi area intermetalik semakin menurun sehingga tidak terdapat *overmodification*.



- Kesimpulan
penjelaskan
Ganti

BAB V

KESIMPULAN

Dari pengujian, studi literatur, dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan :

1. Telah dilakukan proses desain dan rekayasa pembuatan alat uji fluiditas serta serangkaian pengujian validasi menggunakan paduan ADC12 komersial. Pembuatan alat uji fluiditas metode vakum dilakukan untuk mendapatkan hasil pengujian fluiditas yang lebih akurat dibandingkan metode spiral dan metode lainnya. Dari pengujian validasi dengan menambahkan *modifier* Sr dan *grain refiner* Al₅TiB pada paduan ADC12 didapatkan hasil yang sesuai dengan literatur. Penambahan 0,03% Sr memberikan nilai fluiditas yang paling baik, sedangkan penambahan 0,15% Al₅TiB menghasilkan butir yang halus dan nilai fluiditas yang paling baik. Sementara itu, waktu proses *degassing* sangat menentukan nilai fluiditas, karena semakin lama waktu *degassing* yang diberikan akan meningkatkan nilai fluiditas paduan ADC12. Hal ini dapat dipahami karena proses *degassing* akan mengikat gas hidrogen yang ada dalam logam cair, dimana keberadaan gas ini akan menyebabkan cacat pada produk cor. Dari hasil pengujian dan validasi variasi jenis pipa dan tekanan didapatkan bahwa pipa tembaga dengan tekanan 8 inHg yang paling baik untuk digunakan karena akan memudahkan pengamatan dan pengukuran nilai fluiditas dibandingkan pipa lain. Untuk melihat pengaruh Fe dan Sr terhadap pembentukan fasa intermetalik secara kuantitatif dan kualitatif serta pengaruhnya terhadap nilai fluiditas, dilakukan pembuatan *master alloy* Al-7% Si dan Al-11% Si
2. Dari hasil pengujian fluiditas pada *master alloy* Al-7% Si yang ditambahkan Fe, didapatkan bahwa semakin tinggi kadar Fe yang ditambahkan maka nilai fluiditas semakin turun pada semua kondisi temperatur tuang. Sebagai contoh

pada penambahan 1,2% Fe temperatur 720°C nilai intermetalik dari 19,4 cm menjadi 16,95 cm atau turun sebesar 12,6%. Ketika ditambahkan 1,4 dan 1,6% Fe nilai fluiditas menjadi 15 dan 14,5 cm atau turun sebesar 11,5 dan 3,33%. Hal ini dapat dipahami karena Fe akan membentuk senyawa intermetalik Al-Fe-Si yang akan mengganggu proses mampu alir paduan aluminium. Selain dari itu juga dapat dipahami bahwa dengan semakin banyaknya fasa intermetalik yang terbentuk akan semakin meningkatkan viskositasnya. Pengujian fluiditas paduan Al-7 %Si yang ditambahkan 1,2 ; 1,4 dan 1,6%Fe serta 0,015- 0,045 % Sr memberikan hasil bahwa dengan semakin tingginya temperatur tuang maka nilai fluiditas akan semakin tinggi pada semua komposisi. Penambahan 0,015% Sr pada paduan Al-7%Si dengan 1,4% Fe temperatur tuang 720°C menyebabkan nilai fluiditas naik sebesar 16,2%. Penambahan 0,03% Sr nilai fluiditas naik sebesar 15,4%. Akan tetapi penambahan Sr sebesar 0,045% mengakibatkan turunnya nilai fluiditas sebesar 34%. Pada penambahan 0,03% Sr didapatkan nilai fluiditas yang paling baik pada setiap komposisi; dalam hal ini penambahan 0,03% Sr akan memodifikasi silikon primer menjadi lebih bulat dan mengubah morfologi fasa intermetalik menjadi lebih pendek. Dengan bertambahnya kadar besi maka konsentrasi fasa intermetalik β -Al₅FeSi akan semakin meningkat baik panjang dan lebar maupun fraksi luas intermetaliknya. Ini dapat dipahami karena dengan penambahan Fe maka kemampuan *modifier* Sr untuk mengubah fasa intermetalik akan berkurang (fasa α -Al₃Fe₂Si yang terbentuk lebih sedikit). Pada paduan Al-7% Si didapatkan fasa intermetalik yang paling panjang pada penambahan 1,6% Fe yaitu 22,2 μ m dan yang paling pendek pada penambahan 1,2 %Fe yaitu 9,7 μ m. Untuk fraksi luas intermetalik yang terbentuk, dengan penambahan Fe yang semakin tinggi, akan menghasilkan fraksi luas intermetalik yang semakin besar. Pada penambahan 1,2% Fe menghasilkan fraksi luas intermetalik 3,67%, sedangkan pada penambahan 1,4% Fe dan 1,6% Fe masing-masingnya menghasilkan fraksi luas 4,03% dan 5,23%

Universitas Indonesia

3. Dari hasil pengujian fluiditas pada paduan Al-11% Si yang ditambahkan Fe, juga didapatkan bahwa semakin tinggi kadar Fe yang ditambahkan maka nilai fluiditas semakin turun. Sedangkan pengujian fluiditas paduan Al-11% Si yang ditambahkan Fe dan Sr yang bervariasi juga memberikan hasil yang sama seperti pada paduan Al-7 % Si, dimana dengan semakin tinggi kadar Fe yang ditambahkan maka nilai fluiditas paduan akan turun. Dengan penambahan 0,6% Fe ke dalam paduan Al-11% Si pada kondisi temperatur tuang 720°C menurunkan nilai fluiditas sebesar 13,45%. Dengan penambahan 0,8 dan 1,0% Fe terjadi penurunan nilai fluiditas sebesar 0,5% dan 3,2%. Penambahan 0,015% Sr pada paduan Al-11% Si dengan 0,6% Fe meningkatkan nilai fluiditas sebesar 0,9%, sedangkan penambahan 0,03% Sr nilai fluiditas naik signifikan sebesar 15,5%. Nilai fluiditas yang paling baik diberikan oleh penambahan Sr sebesar 0,03 %. Ketika ditambahkan 0,045% Sr nilai fluiditas mengalami penurunan yang cukup besar yaitu 29,3%. Pada penambahan 1,0% Fe memberikan fasa intermetalik yang paling panjang yaitu 50,2 μm , sedangkan fasa intermetalik yang paling pendek diberikan oleh penambahan 0,6 % Fe yaitu 21,3 μm . Pada paduan Al-11% Si umumnya dengan penambahan Fe yang semakin tinggi, akan menghasilkan fraksi luas intermetalik yang semakin besar. Pada penambahan 1,0% Fe menghasilkan fraksi luas intermetalik 2,26%, sedangkan pada penambahan 0,6% Fe dan 0,8 Fe masing-masingnya menghasilkan fraksi luas 1,01% dan 1,16%.
4. Hasil pengujian fluiditas masing-masing, baik pada paduan Al-7% Si maupun pada paduan Al-11% Si memperlihatkan adanya kecenderungan bahwa dengan bertambahnya kadar Fe, akan semakin menurunkan nilai fluiditasnya; akan tetapi apabila ditambahkan dengan Sr, nilai fluiditasnya akan kembali naik. Perubahan nilai fluiditas ini didukung oleh bentuk dan morfologi struktur mikro dari hasil pengujian SEM yang memperlihatkan adanya matrik aluminium, struktur silikon, dan fasa intermetalik α dan β . Komposisi yang didapatkan melalui perkiraan hasil EDX diperkuat dengan data dari hasil pengujian XRD yang kemudian mengidentifikasi akan adanya fasa

Universitas Indonesia

intermetalik ini. Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa Sr berfungsi mengubah struktur mikro fasa intermetalik yang panjang menjadi lebih pendek dan bulat sehingga akan menaikkan nilai fluiditas dari kedua paduan ini. Pada penambahan 0,03% Sr didapatkan nilai fluiditas yang paling baik pada setiap komposisi; dalam hal ini penambahan 0,03% Sr akan memodifikasi silikon primer menjadi lebih bulat dan mengubah morfologi fasa intermetalik menjadi lebih pendek.



26
81 ~ 32% 7/2005

DAFTAR ACUAN

- [1] Laporan Akhir , Pemetaan Industri Komponen Otomotif Yang di proses Melalui Metal Casting di Jabotabek, Direktorat Industri Transportasi Darat dan Kedirgantaraan, Departement Perindustrian, 2008 ✓
- [2] Kolom Otomotif Harian Kompas, Rabu tanggal 17 Februari 2010 ✓
- [3] **Prof Dr.Ing Bambang Suharno**" Pemberdayaan Industri Pengecoran Logam di Indonesia" pada Pidato Pengukuhan Guru Besar Tetap Bidang Ilmu Teknik Pengecoran Logam FTUI ,1 April 2009 ✓
- [4] **Tran Duc Huy, Suyanchi Pongsukitwat, Ittipon Diewwanit, Umeda Takateru, 2005**,"*Fluidity Test of Aluminium Alloys Based on Vacuum Methode* " Proceeding of the 9th Asian Foundry Congress, Hanoi – Vietnam ✓
- [5] **Wattanachai Prukkanon, Chaowalit Limmaneevichitr,2005**,"*The Effect of Scandium on Fluidity of Aluminium Silikon Alloys Casting*", Proceeding of the 9th Asian Foundry Congress, Hanoi-Vietnam ✓
- [6] **Ninh Duy cuong, Cho In-Sung, Choi Jeong-Kil, Kim Myung-Han, 2005**, " *Experimental Evaluation of Fluidity of Die Cast Aluminium Alloy* "Proceeding of the 9th Asian Foundry Congress, Hanoi-Vietnam ✓
- [7] **F.M.Yarandi,P.KRohatgi,dan S.Ray, 2007**,"*Fluidity and Microstructure Formation During Flow of Al-SiC Particle Composites*" Journal of Material Engineering and Performance, Springer New York. ✓
- [8] **Niyama Eisuke, Anzai Koichi, Funakabo Tasuya, Hiratsuka Sadato, 1997**, " *Some Basic Reserch for Thin-Wall Casting Technology* ", Journal of Materials Processing Technology ✓
- [9] **S.Venkateswaran , RM Mallya, MR Seshadri, 2006**, " *Effect of Trace Element on the Fluidity of Eutectic Al-Si Alloy Using the Vacuum Suction Technique* ", Indian Institute of Science , Bangalore ✓
- [10] **McDonald Stuart D., Nogita K. and Dahle Arne K., 2006**, *Eutectic Grain Size and Strontium Concentration in Hypoeutectic Aluminium-Silicon Alloys*. Brisbane: Journal of Alloys and Compounds. ✓
- [11] **Samuel A.M., Samuel F.H., and Ravindran C.,2003**," *Effect of Alloying Element on The Segregation and Dissolution of CuAl₂ Phase in Al-Si-Cu 319 Alloys*" , Journal of Material Science, Canada. ✓
- [12] **Sanchez S., Velasco E, Zambarano P., and Carlos J.L., 2006**, " *Effect of Titanium and Strontium Addition on The Fluidity of A319 and A356 Aluminium Alloys* ", Journal Materials of Science, Switzerland ✓
- [13] **Gowri S., Samuel F.H., 1994**, " *Effect of Alloying Element on The Solidification Characteristic and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy*", Metal Tran 'A.vol 25, hal.437-448 ✓
- [14] **Mustafa M.A., Samuel F.H., Doty H.W., Valtierra S., 2001**, *Effect of Mg and Cu addition on Microstructural and Tensile Properties of Sr*

- Modified Al-Si Eutectic Alloy*", International journal of Cast Metal (UK) vol.14, hal.235-253
- [15] **Gowri, S., Samuael, F. H.**, "Effect of Alloying Element on the Solidification Characteristics and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy," Metall. Trans.A. vol.25, (1994), hal: 437-448.
- [16] **Warmuzek, M., Ratuszek, W., Sek-sas, G.**,2005, "Chemical Inhomogeneity of Intermetallic Phases Precipitates Formed During Solidification of Al-Si Alloys". Materials Charactrization, vol.54, hal: 31-40.
- [17] **John A. Taylor**, "The Effect of Iron in Al-Si Casting Alloys, 2000" (Brisbane: Cooperative Research Centre for Cast Metals Manufacturing (CAST), The University of Queensland, Brisbane, Australia
- [18] **Dinnis, M.C., Taylor, J.A., Dahle, Arne K.** , 2005, "As-cast Morphology of Iron-Intermetallics in Al-Si Foundry Alloys". Scripta Materialia, Vol. 53hal: 955 – 958.
- [19] **D.N. Miller , L Lu , AK Dahle**, 2006, " The Role of Oxides in the Formation of Primary Iron Intermetallics in Al-11,6Si-o,37Mg Alloy ", Metallurgical and Material Transactions
- [20] **X.P Niu, B.H. Hu, S.W. Hao**, 1998, "Effect of Iron on The Microstructure and Mechanical Properties of Al Die Casting Alloys". Journal of Material Science Letters 17, hal. 1727-1729.
- [21] **Y.S.Han, J.O.Choi,C.O.Choi and D.G.McCartney**, 2009,"Intermetallic Phase Formation in Directionally Solidified Al-Fe-Si", Metal and Material International, The Korean Institute of Metal and Material.
- [22] **W.Khalifa F.H., Samuel J. Gruzleski, H.W.Doty, S. Valtiera**, 2005, "Nucleation of Fe Intermetallic Phases in the Al-Si-Fe Alloys ", Metallurgical and Material Transactions.
- [23] **Young-Dong Kwon, Zin-Hyoung Lee**. 2003 "The Effect Of Grain Refining and Oxide Inclusion on The Fluidity of Al-4,5Cu-0,6Mn and A356 Alloys". Korea.
- [24] **Detomi, A.M dkk.**, 2001, *The Impact of TiCaI™ and TiBaI™ Grain Refiners on Casthouse Processing*. TMS: New Orleans
- [25] **Dahle, A.K dkk.** , 1996," Effect of Grain Refinement on The Fluidity of Two Commercial Al-Si Foundry Alloy". Metallurgy Materials Transaction A. Volume 27A
- [26] **Venkateswaran, S, R.M. Mallya dan M.R Seshadri**. "Effect of Trace Elements on the Fluidity of Eutectic Al-Si alloy Using The Vacuum Suction Technique" AFS. Transaction 86-128
- [27] **Tiryakioglu.M, D.R Askeland and C.W. Ramsay**,1994," Fluidity of 319 and A356: an experimental design approach." AFS Transaction vol 102, pp 17-25
- [28] **M. Di sabatino dan L. Arnberg** , 2005 "Effect Grain Refinement and dissolved hydrogen on the fluidity of A356 alloy"International journal of Cast Metals Research vol 18 No.3

- [29] **J.Kajornchaiyakul, R. Sirichaivejakul, N. Moonrin**, 2005, "Solidification Characteristics and Mechanical Properties of Hypoeutectic Aluminium-Silicon Alloy Containing Sulfur". *Alluminio e leghe la Metallurgia Italiana*. ✓
- [30] American Foundrymen's Society Inc. *Aluminium Casting Technology*. Des Plaines, Illinois, 1986.
- [31] **Mondolfo, L.F.** *Aluminium Alloys : Structure and Properties*, Butterworths, London-Boston, 1979.
- [32] **Hatch, Jhon E.** *Aluminium : Properties and Physical Metallurgy*. (Ohio: ASM Metal Park, 1995).
- [33] **M.H. Mulazimoglu, A. Zaluska, J.E. Gruzleski, F. Paray**, "Electron Microscope Study of Al-Fe-Si Intermetallics in 6201 Aluminum Alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27A pp.929-936
- [34] *ASM Metals Handbook*, ninth edition Volume 15, Casting (Ohio: ASM International, 1988)
- [35] **Farhadi Gholamali**. 1999, *Less Effets des Alements de Trace surlies les caeateriques de Type 6XXX pour Les Applications Automobiles*. Kanada
- [36] **Callister, William D, Jr.** 2003, *Materials Science and Engineering An Introduction*, 6th Edition. John Wiley & Sons, Inc. Singapura
- [37] **M.V. Kral, H.R. McIntyre, M.J. Smillie**. 2004, "Identification of intermetallic phases in a eutectic Al-Si casting alloy using electron backscatter diffraction pattern analysis". Department of Mechanical Engineering, University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch, New Zealand.
- [38] **Kuijper, NCW**, 2000. "Intermetallics Phase Transformation During Homogenization of 6xxx Al Alloys". Hal 9 10 12 13 19, Februari 2007 dari [www.home.wanado.nl/kuijpers/aluminium/literature review2000.pdf](http://www.home.wanado.nl/kuijpers/aluminium/literature%20review2000.pdf)
- [39] **Robert I Mackay**, "Quantification of Iron in Al-Si Foundry Alloys Via Thermal Analysis" (Montreal: Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University, 1996), hal. 2, 7, 10, 13-15.
- [40] **John A Taylor**, 2004, "The Effect of Iron in Al-Si Casting Alloys". Cooperative Research Centre for Cast Metals Manufacturing (CAST) University of Brisbane.
- [41] **C. Villeneuve, H.W. Duty and F.H. Samuel** 1999, "Effect of Trace Elements on AlFeSi Characteristics and Tensile Properties of Al-Si-Cu (319) Foundry Alloys", *Int. J. Cust Metals Res.*, vol. 12. in Press.
- [42] **G.J. Marshall, A.J. Flemming and R.A. Ricks**, "The Effect of Fe and Si on the Microstructure, and Properties of AA5182 Alloy Sheet", *Light Metals*, 1996, p. 257-267.
- [43] **A K Dahle; M Hillert; S Shankar; M M Makhlof**. 2006 "Nucleation Mechanism of Eutectic Phases in Aluminum-Silikon Hypoeutectic Alloys". *Metallurgical and Materials Transactions*; 37A, 4; ProQuest Science Journals pg. 1353 ✓

- [44] *Effects of intensive forced melt convection on the mechanical properties of Fe containing Al-Si based alloys* yang diakses pada tanggal 23 April 2007 dari website. UK ✓
- [45] **Carl Villeneuve**, "*Neutralisation et Dissolution des Intermétalliques de Fer Dans Les Alliages Al-Si*", Université Du Quebec À Chicoutimi, (Août 1998). Yang diakses pada tanggal 23 April 2007 dari website Collections Canada ✓
- [46] "*Development of Al-Si-Mg Alloys for Semi-Solid Processing and Silicon Spheroidization Treatment (SST) for Al-Si Cast Alloys*" yang diakses pada tanggal 23 April 2007 dari website Ethbib ✓
- [47] **L Lu and A K Dahle**, 2005, "*Iron-Rich Intermetallic Phases and Their Role in Casting Defect Formation in Hypoeutectic Al-Si Alloys*", *Metallurgical and Materials Transactions*; 36A, 3A; ProQuest Science Journals hal: 819. ✓
- [48] **M.M. Haque**, 2005 '*Effect Of Strontium On The Structure And Properties Of Aluminium-Silicon Alloys*', *Journal Of Material Processing Technology* 55 ✓
- [49] **John E Gruzleski, Bernard M. Closset**, *The Treatment of Aluminium-Silicon Alloys* (Americans Foundrymans Society, Inc, 1990), hal.
- [50] <http://www.eaa.net/education/TALAT/lectures/3205.pdf>, 2006
- [51] **Niyama Eisuke, Anzai Koichi, Funakabo Tatsuya, Hiratsuka Sadato.**" *Some Basic Research for Thin-Wall Casting Technology*". *Journal of Material Processing Technology*.
- [52] **P.R. Beeley, B.Met, Ph.D, FIM**, *Foundry Technology*, (Butterworth, London: 1972), hal: 14-22.
- [53] http://www.outokumpu.com/pages/page_5764.aspx
- [54] *Metallurgi Aluminium. Modification of Aluminium Silicon Foundry Alloys*. 10 Oktober 2008. http://metallurgical.com/Downloads/tech_paper_pdfs/Guide Modif AlSi Alloys.pdf ✓
- [55] **E. Taghaddos a, M.M. Hejazi b, R. Taghiabadi a, S.G. Shabestari b.**2008 "*Effect of iron-intermetallics on the fluidity of 413 aluminium alloy*". Department of Materials and Metallurgical Engineering, International University, Qazvin, Iran. ✓
- [56] **A. M. Samuel, F. H. Samuel, and H. W. Doty,**" *Observations on The Formation of β -AlFeSi Phase in 319 Type Al-Si Alloys*", *Journal of Materials Science*, Vol. 31 (1996), hal. 5529-5539
- [57] **B. Kulunk, D.J. Zuliani.**"*Application For The Strontium Treatment Of Wmught And Die-Cast Al*", JOM.
- [58] **F. Paray, et al,** "*Metallurgical Effects of Strontium on Wrought 606 1 Alloys*", *Light Metals*, W. Hale (ed.), The Minerals, Metals & Materials Society, 1996
- [59] **B. Closset, et al,** "*Microstructures and Properties of Strontium Treated Aluminum Electrical Conductor Alloys*", *Light Metals* 1996, W. Hale (ed.), The Minerals, Metals & Materials Society

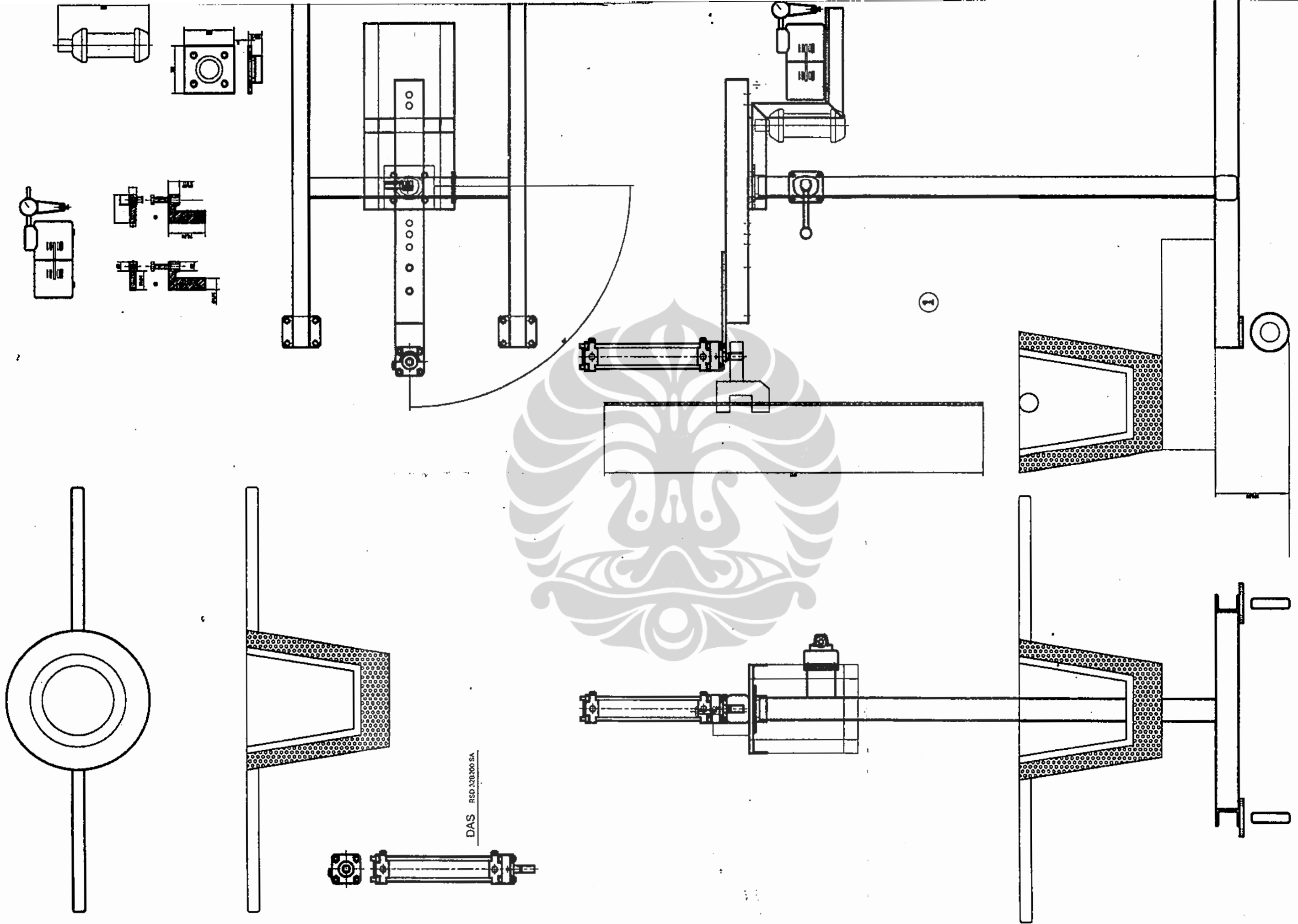
- [60] V. Stefaniay, A. Gringer, T. Türmezey, "Intermetallic Phases in the Aluminium- Side Corner of the AlFeSi-Alloy System", Journal of Materials Science, vol. 22, 1987.
- [61] F.H. Samuel, et al, "Decomposition of Fe-Intermetallics in Sr-Modified Cast 6XXX Type Aluminum Alloys for Automotive Skin," (Canada,2008)
- [62] S. Shivkumar, L. Wang, D. Apelian, 1991,"Molten Metal Processing of Advanced Cast Aluminum Alloys", JOM.
- [63] G.W. Boone, R.F. Carver, R.G. Seese,1998, "Optirnizing Grain Refiners and Modifier in Al-Si Alloys", Modcm Casting
- [64] Y. Awano, and Y. Shimizu, "Non-Equilibrium Crystallisútion of AlFeSi Compound in Melt-Superkat Al-Si Alloy Castings." AFS Transactions, Vol. 98, 1990.
- [65] L. Backerud, O. Chai, J. Tamminen, "Solidification Characteristics of Aluminium Alloys," Vol. 2 : Foundry Alloys", (USA, 1990).
- [66] Y. Komiyama, K. Uchida, "Effect of Fe, Mn, Zn and Ti on Mechanical Properties and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg Casting Alloy", J. Japan Iw. Light Metals, vol. 26
- [67] L.A. Narayan, F.H. Samuel, "Crystallization Behaviour of Iron-Containing Intermetallic Compounds in 319 Aluminum Alloy", Metallurgical and Materials Trattsactions A, vol. 25A, 1994.
- [68] A. Gringer, et al, "Aluminium." vol.10, 1989.
- [69] John Gruzleski and Bernard Closset, *The Treatment of Liquid Aluminium- Silicon Alloys.* (USA : American Foundrymen's Society Inc, 1990).
- [70] Ned Tenekedjiev, Hasim Mulazimoglu, Bernard Closset, and John Gruzleski, *Microstructures and Thermal Analysis of Strontium-Treated Aluminum-Silicon Alloys.* (USA : American Foundrymen's Society Inc, 1995), hal. 46, 50, 74-75.
- [71] <http://www.tech.plym.ac.uk/sme/mech330/alcast1.htm> ; 23 April 2006
- [72] Software, "PICSARA." Bildanalssystem AB (Sweden, 2005) ✓
- [73] Cheng Dong, "PowderX." Institutenof Physics, Chinese Academy of Sciences (Beijing)
- [74] Xpowder Ver. 2004.04.45 Pro. ISBN 84-609-1497-6 (Dp.Lg.GR-1001/04.Reg 4071204) J.D. Martin (2004).
- [75] JIS Handbook. *Non-Ferrous Metals and Metallurgy.* Japanese Standards Association.
- [76] Dahle. AK dan Lars Arnberg. "The Effect of Grain Refinement on The Fluidity of Aluminum Alloys". Materials Science Forums vol 217-222, pp 259-264,1996
- [77] C. John dan H. A. Richard "The Fluidity of Molten Metals" Universitas Birmingham. 1994.
- [78] John dan H. A. Richard.1994," Solidification Defects in Casting" Universitas Birmingham.
- [79] K. Jeongmin,1996, " Effect of Solidification Mechanism on The Porosity Formation in Aluminium Alloys" Universitas Wisconsin, Madison.

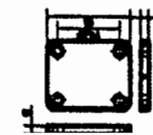
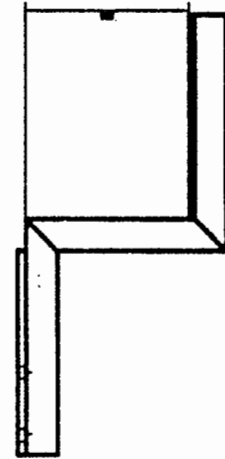
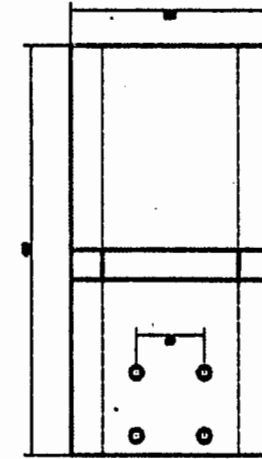
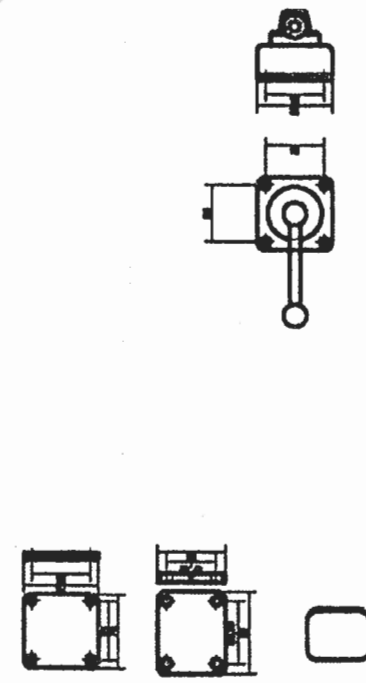
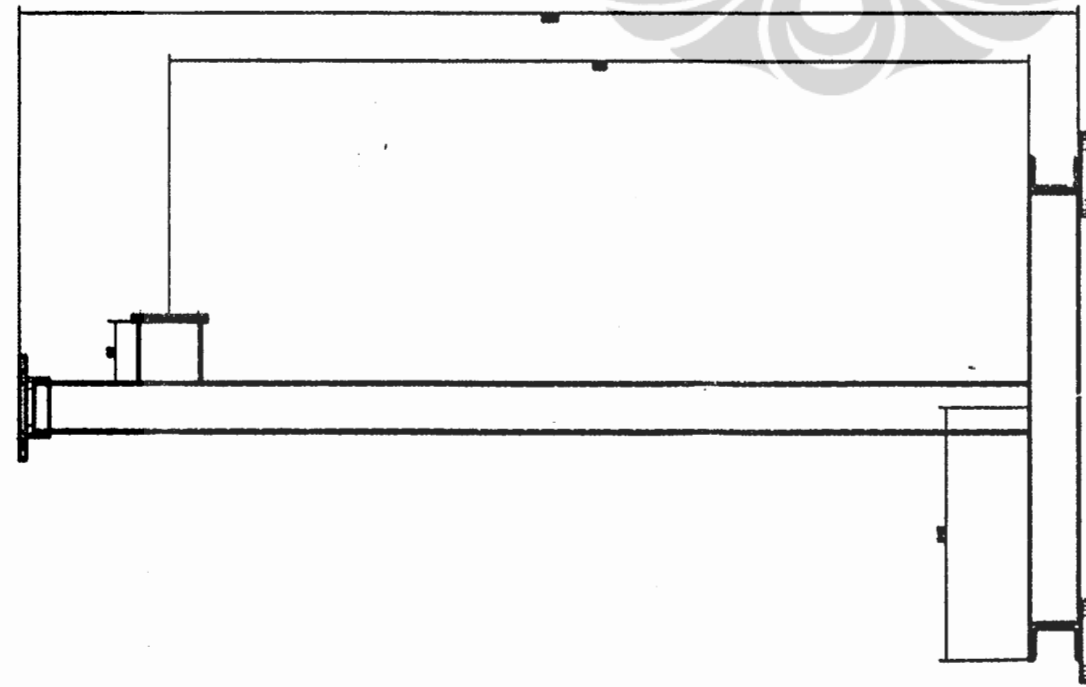
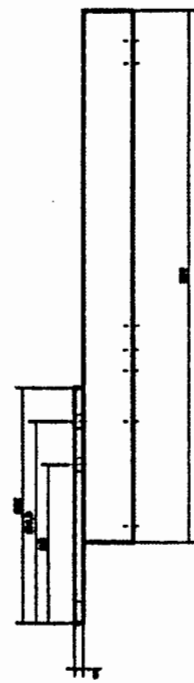
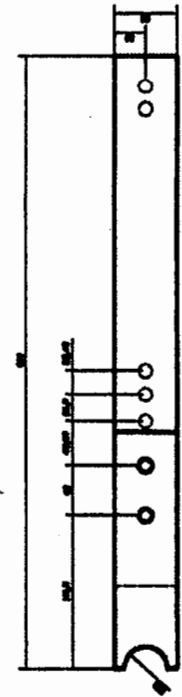
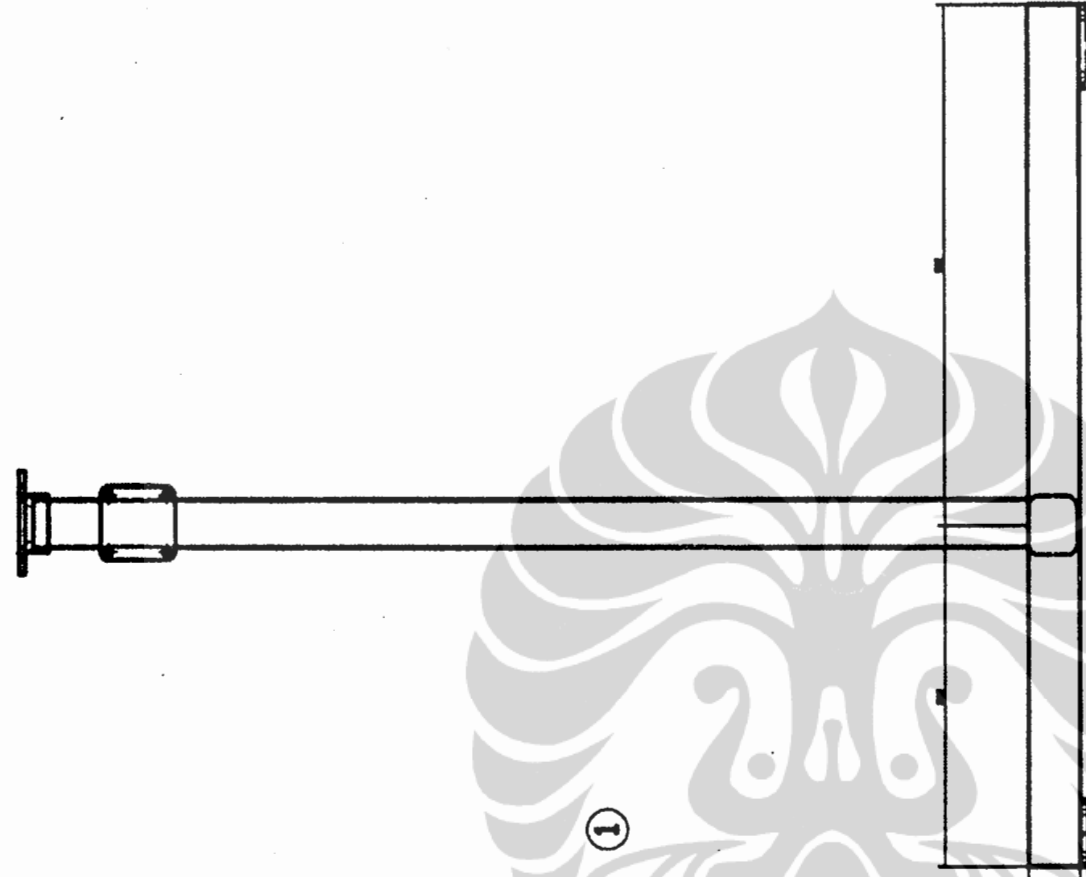
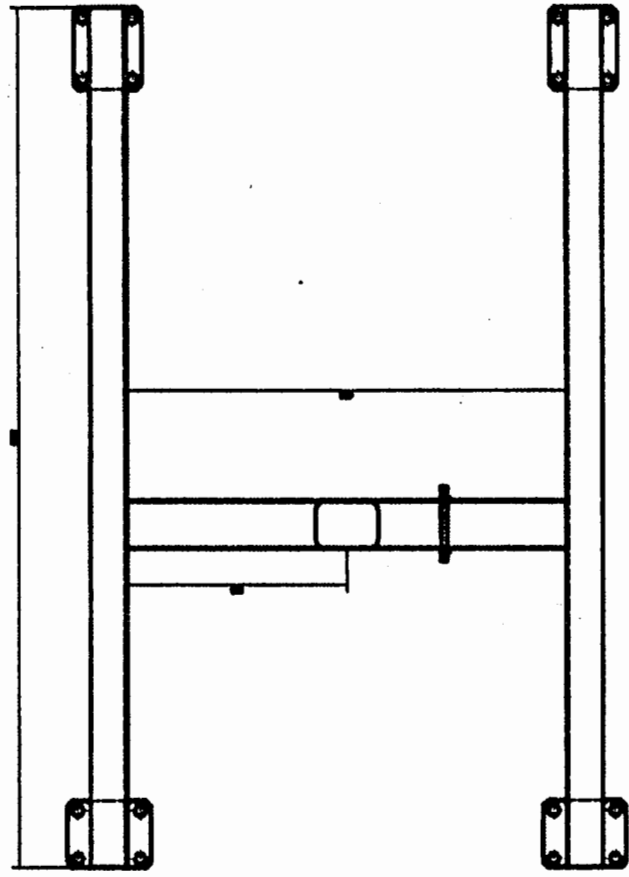
Universitas Indonesia

- [80] Shivkumar. S, dkk,1990," *Modeling of Microstructure Evolution and Microporosity Formation in Cast Aluminium Alloys*" AFS Transaction.
- [81] Kajornchaiyakul, J.dkk,2005" *Relationship Between Porosity Level and Fluidity and Mechanical Properties of 356 Alloy*". National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand. ✓



Universitas Indonesia

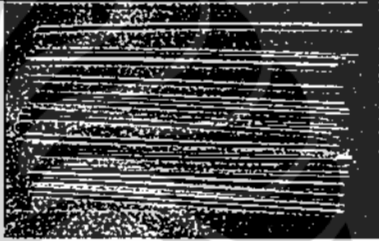

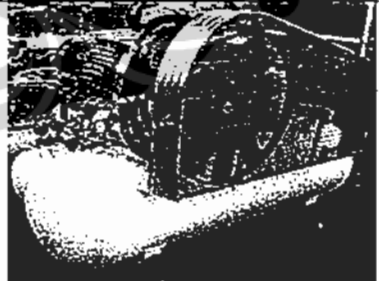
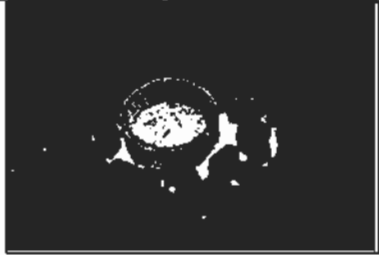


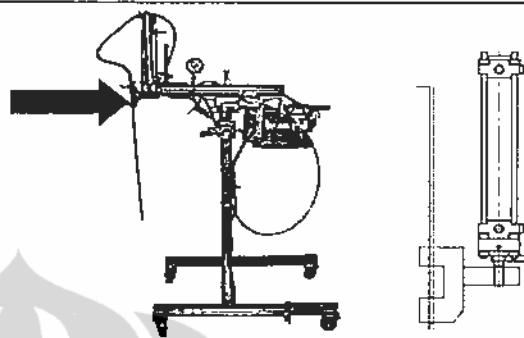
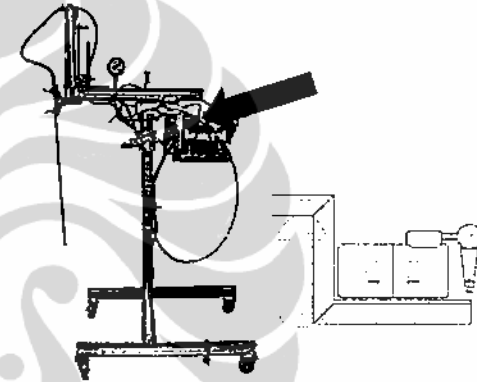
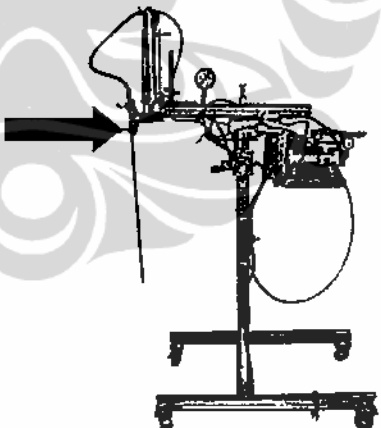


16	1	CLAMPING PIPE		
15	1	CRUSIBLE SET		
14	1	LIMITS VALVE 3/2 WAY		
13	1	TOGGLE VALVE 3/2 WAY		
12	1	HAND VALVE 4/3 WAY		
11	4	WHEELS	FILTER INSIDE	
10	1	VACUUM CHAMBER		
9	1	HAND VALVES BRACKET		
8	4	WHEEL BRACKET		
7	1	MOUNTING TABLE	WELD JOINT	
6	1	HOSE	SILICON RUBBER	
5	1	ROTARY TABLE		
4	1	ADJUSTABLE SUPPORT		
3	1	VACUUM PUMP		
2	1	FRAME	MED - C STEEL	
1	1	RSD 32B200 SA AIR CYLINDER	WELD JOINT 10Z - 2R	
NO	QTY	PART NO	MATERIAL	NOTE
PROJECTION:			SCALE: AS SEEN	
D			DSN BY : AHMAD ASHARI AM, ST	
UNITS : mm			CHK BY : I. IS PRIMA NANDA, MT	
DATE : 04 2010			APPD BY : Prof. DR. BAMBANG S	
DEPT. OF METALLURGY UNIVERSITY OF INDONESIA				
WORKSHOP DIV.				
NO: 03/04/10				
SHEET 1 OF 7				

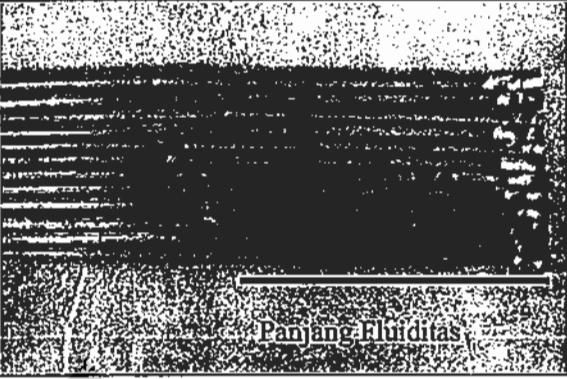
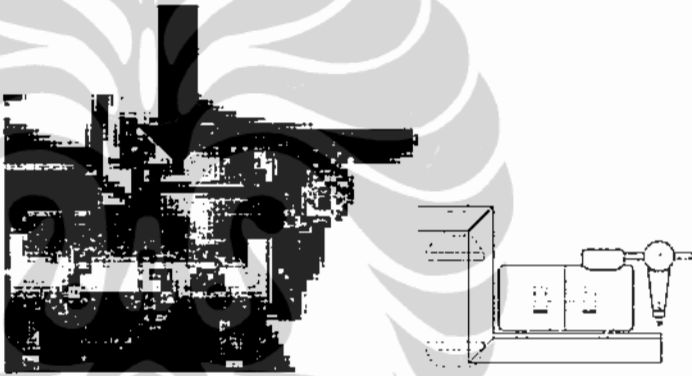

LAMPIRAN
STANDARD OPERATIONAL PROCEDURE
(S.O.P)

NAMA ALAT/MESIN UJI	FLUIDITY TESTING MACHINE
DESKRIPSI	VACUUM PUMP : 220V 50Hz PNEUMATIC SYSTEM: 5-10 BAR SEMI AUTOMATIC
JENIS PENGUJIAN	FLUIDITAS LOGAM CAIR
OPERATOR	PENELITI/TEKNISI

NO	PROSEDUR	KETERANGAN
PERSIAPAN		
01	SIAPKAN PIPA HISAP	
02	NYALAKAN POMPA VACUUM	
04	NYALAKAN KOMPRESSOR	
05	SIAPKAN LOGAM CAIR	

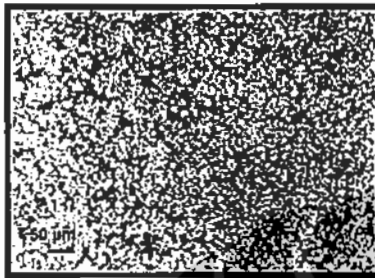
PERSIAPAN PENGUJIAN		
01	PERIKSA JALUR PNEUMATIK DAN SISTEM PNEUMATIK	
02	PERIKSA JALUR VACUUM PUMP	
03	PASANG PIPA HISAP PADA PIPA SILICON RUBBER	

04	<p>ATUR KETINGGIAN HISAP PADA <i>CRUSSIBLE</i> (LOGAM CAIR)</p>	
05	<p>SETELAH SUHU MENCAPAI TEMPERATUR YANG DIINGINKAN TURUNKAN <i>TOGGLE</i> PNEUMATIC</p>	
06	<p>KETIKA PIPA MENYENTUH LOGAM CAIR DAN BERHENTI TUNGGU 3 DETIK NAIKAN <i>TOGGLE</i></p>	

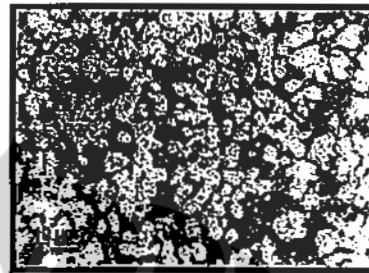
07	CABUT PIPA HISAP DAN HITUNG NILAI FLUIDITAS	
08	SIKLUS BERLANJUT PADA PROSES SELANJUTNYA	PROSES 01 SAMPAI DENGAN 07
09	MATIKAN POMPA VAKUM	
10	MATIKAN COMPRESSOR	
PENGUJIAN SELESAI		

LAMPIRAN B

FOTO STRUKTUR MIKRO (MIKROSKOP OPTIK)
 PADUAN KOMERSIL ADC 12 DITAMBAH *MODIFIER* STRONSIUM

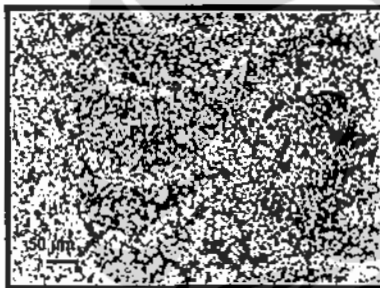


(a) Perbesaran 100x

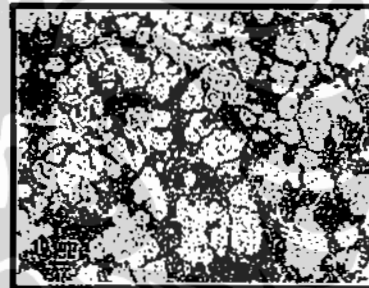


(b) Perbesaran 500x

Gambar B.1 Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium 0,03 % pada temperatur 640°C, etsa 0,5 % HF

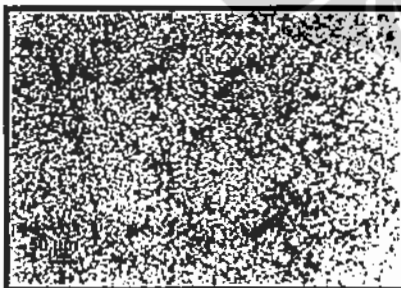


(a) Perbesaran 100x

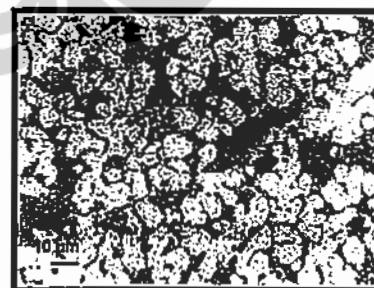


(b) Perbesaran 500x

Gambar B.2 Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium 0,03 % pada temperatur 660°C, etsa 0,5% HF

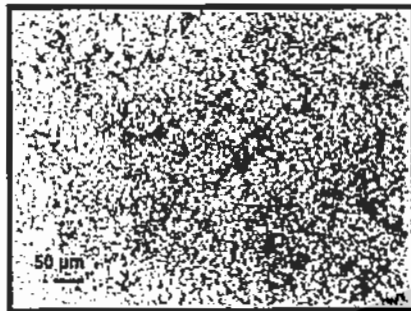


(a) Perbesaran 100x



(b) Perbesaran 500x

Gambar B.3. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium 0,03 % pada temperatur 680°C, etsa 0.5% HF

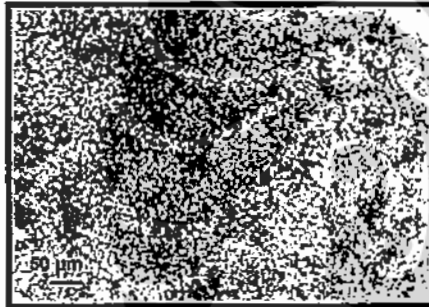


(a) Perbesaran 100x



(b) Perbesaran 500x

Gambar B.4. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium 0,03 % pada temperatur 700°C, etsa 0,5% HF

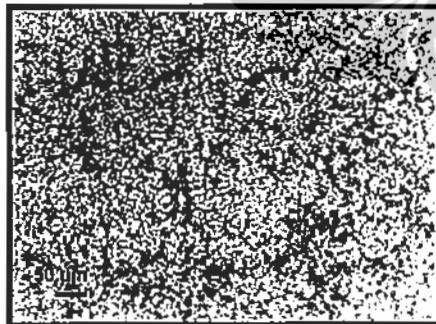


(a) Perbesaran 100x

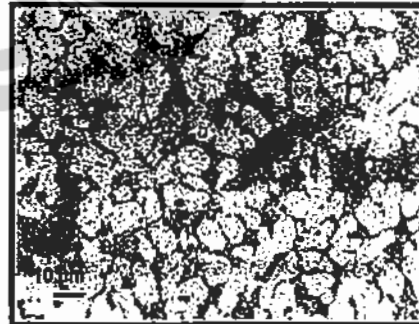


(b) Perbesaran 500x

Gambar B.5. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium 0,015 % pada temperatur 677°C, etsa 0,5% HF

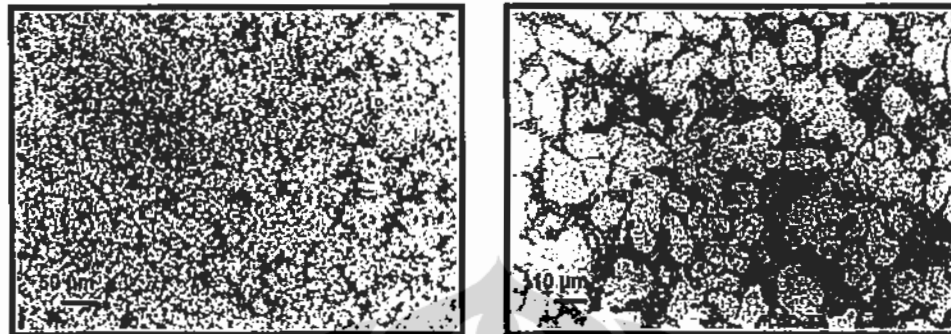


(a) Perbesaran 100x



(b) Perbesaran 500x

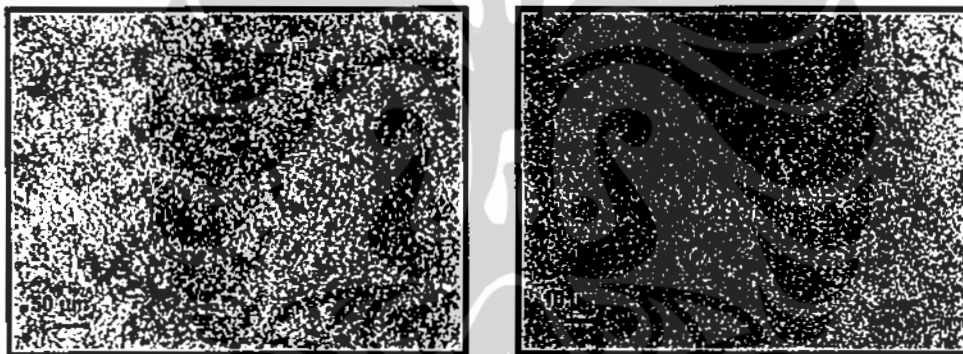
Gambar B.6. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium 0,03 % pada temperatur 681°C, etsa 0,5% HF



(a) Perbesaran 100x

(b) Perbesaran 500x

Gambar B.7. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium 0,045 % pada temperatur 679°C, etsa 0,5% HF



(a) Perbesaran 100x

(b) Perbesaran 500x

Gambar B.8. Struktur mikro sampel uji fluiditas dengan penambahan *modifier* stronsium 0,06 % pada temperatur 676,5°C, etsa 0,5% HF

LAMPIRAN C

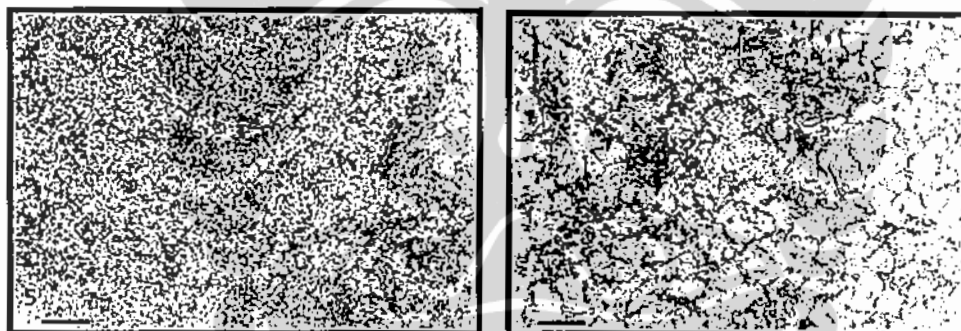
C.1. LAMPIRAN FOTO STRUKTUR MIKRO

PADUAN KOMERSIL ADC 12 DITAMBAH GRAIN REFINER Al_5TiB 

(a)

(b)

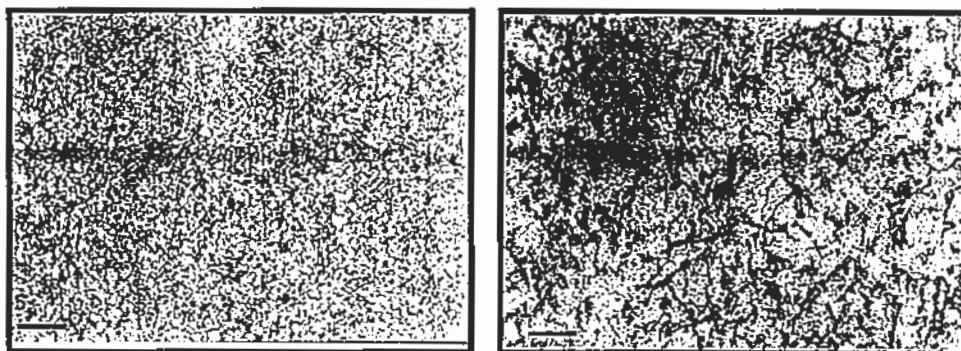
Gambar C.1. Struktur mikro Paduan ADC12 tanpa penambahan *grain refiner*, temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF



(a)

(b)

Gambar C.2. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,05% Al_5TiB , temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF



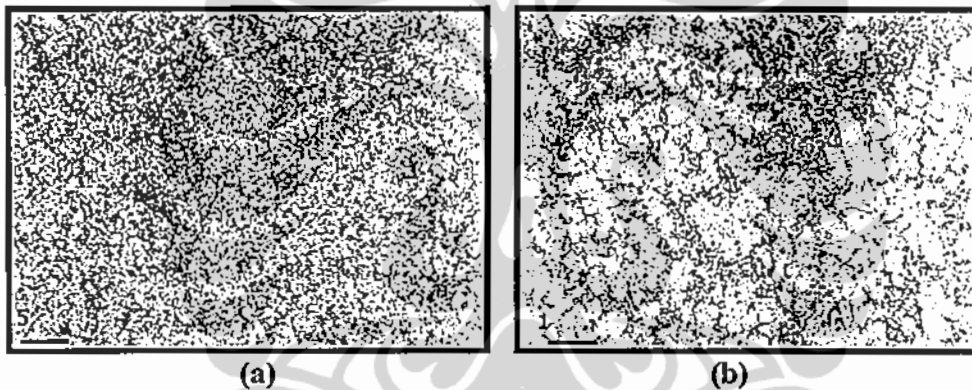
(a)

(b)

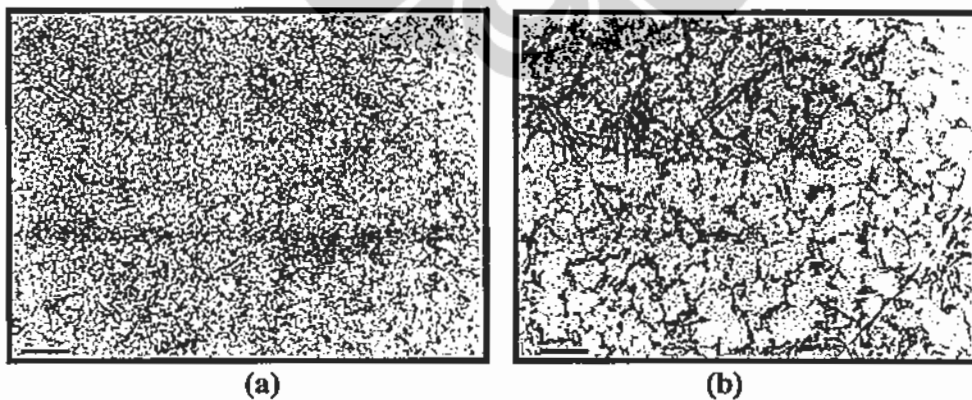
Gambar C.3. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,1% Al_5TiB , temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF



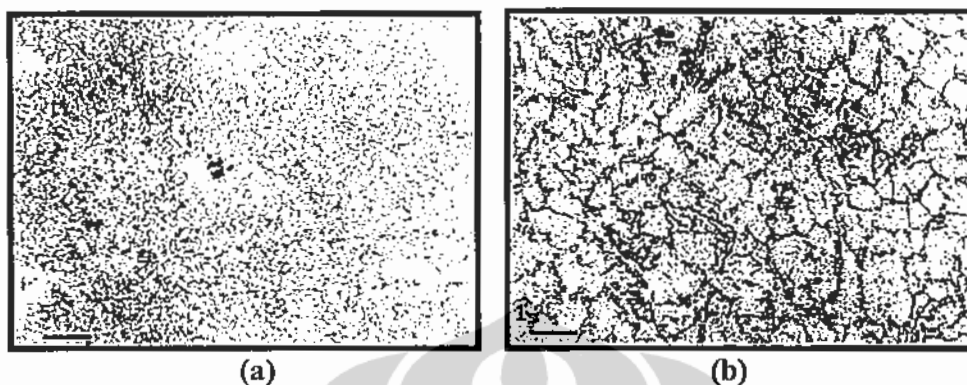
Gambar C.4. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al₃TiB, temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF



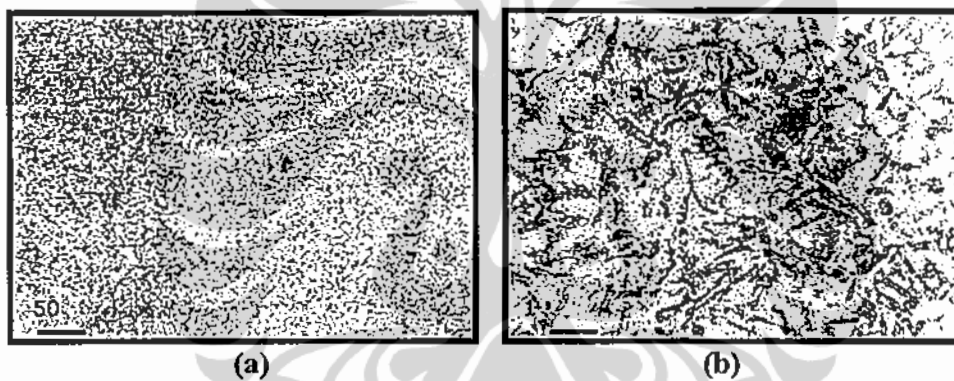
Gambar C.5. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,2% Al₃TiB, temperatur tuang 680 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF



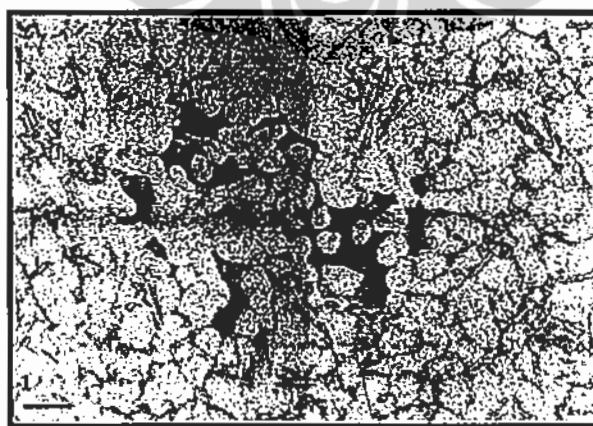
Gambar C.6. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al₃TiB, Temperatur tuang 640 °C, (a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF



Gambar C.7. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al₅TiB, Temperatur tuang 660 °C,
(a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF

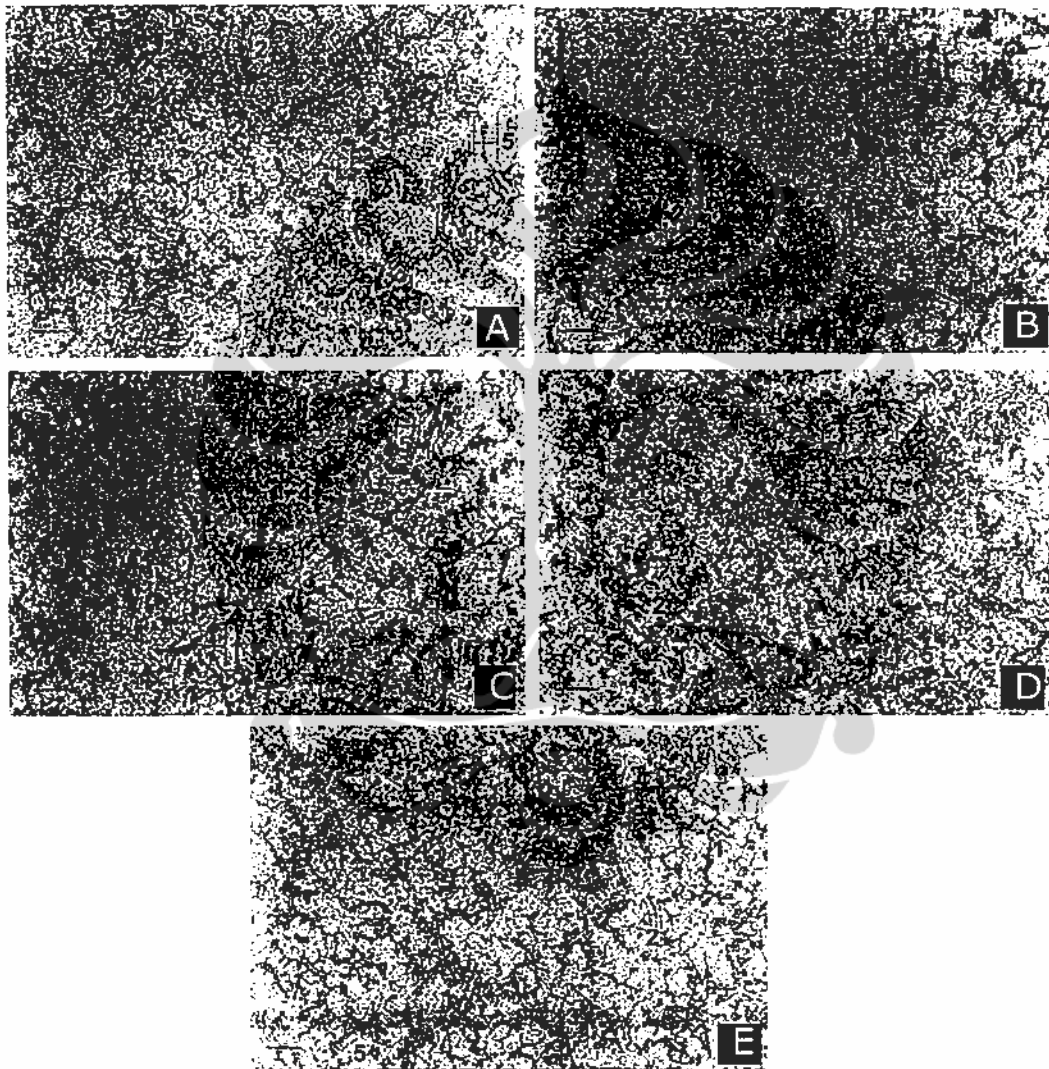


Gambar C.8. Struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al₅TiB, Temperatur tuang 700 °C,
(a)100x, (b)500x, etsa 0,5%HF

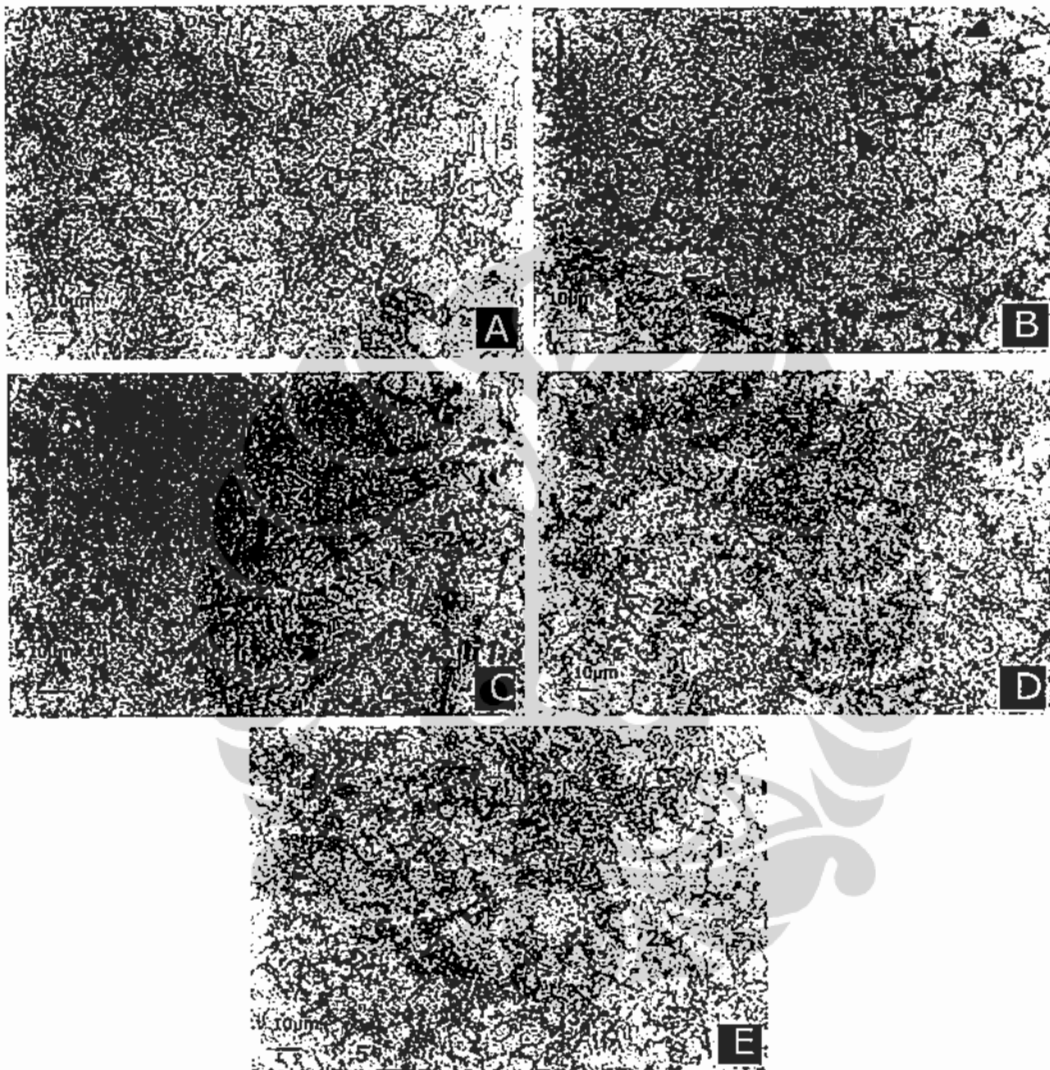


Gambar C.9. Shrinkage pada struktur mikro Paduan ADC12 dengan 0,15% Al₅TiB, temperatur tuang 680 °C, 500x, etsa 0, %HF

**C.2. PENGUKURAN DAS PADA STRUKTUR MIKRO
PADUAN KOMERSIL ADC 12 DITAMBAH *GRAIN REFINER* Al₅TiB**



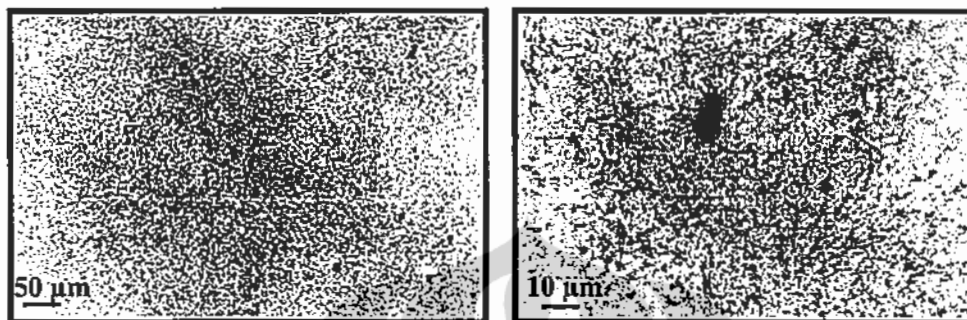
Gambar C.10. Lokasi pengukuran DAS Paduan ADC 12 dengan penambahan (a)0% Al₅TiB (b) 0,05% Al₅TiB (c) 0,1% Al₅TiB (d) 0,15% Al₅TiB (e) 0,2% Al₅TiB pada temperatur tuang 680 °C.



Gambar C.11. Lokasi pengukuran DAS Paduan ADC 12 dengan penambahan (a)0% Al_5TiB (b) 0,05% Al_5TiB (c) 0,1% Al_5TiB (d) 0,15% Al_5TiB (e) 0,2% Al_5TiB pada temperatur tuang 680 °C.

LAMPIRAN D

D. Foto Struktur Mikro Hasil Validasi Degassing



(a)

(b)

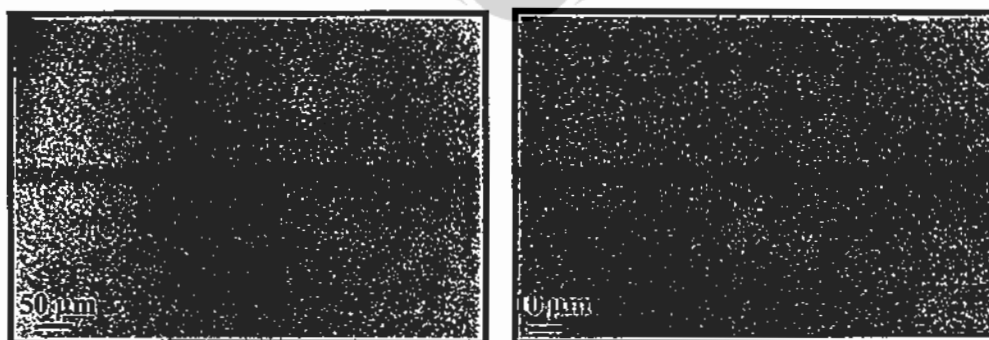
Gambar D.1 a dan b Struktur mikro 0 menit degassing, etsa HF 0,5 %.



(a)

(b)

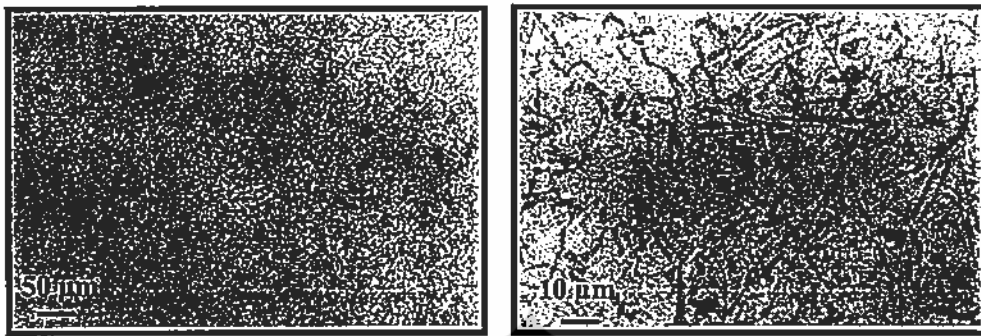
Gambar D.2 a dan b Struktur mikro 1 menit degassing, etsa HF 0,5 %.



(a)

(b)

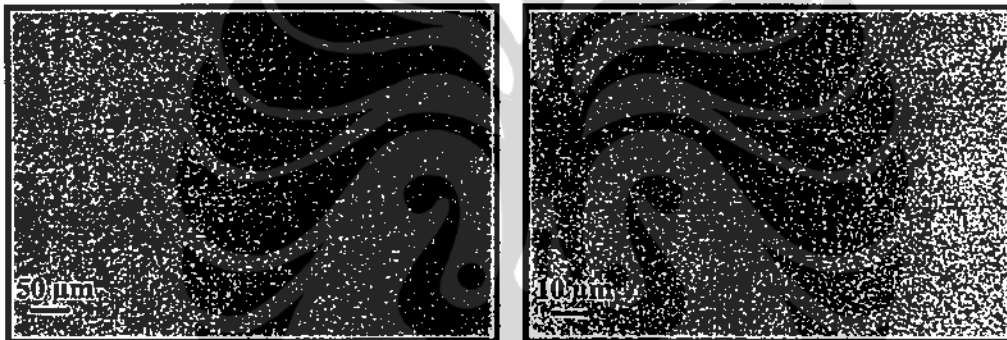
Gambar D.3 a dan b Struktur mikro 2 menit degassing, etsa HF 0,5 %.



(a)

(b)

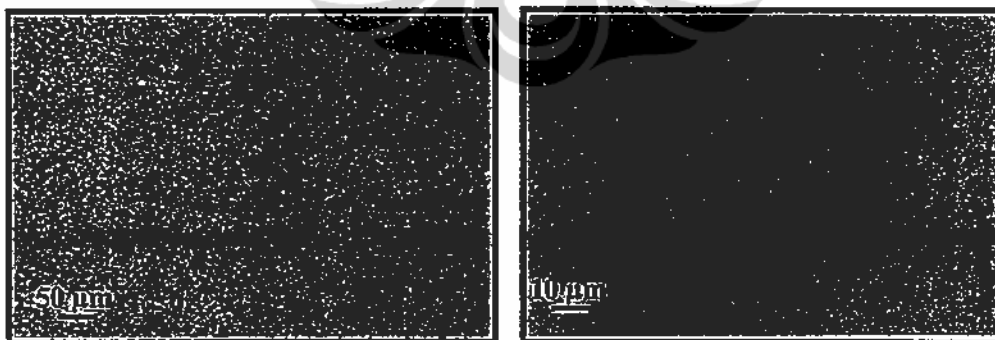
Gambar D.4 a dan b Struktur mikro sampel 4 menit degassing , etsa HF 0,5 %.



(a)

(b)

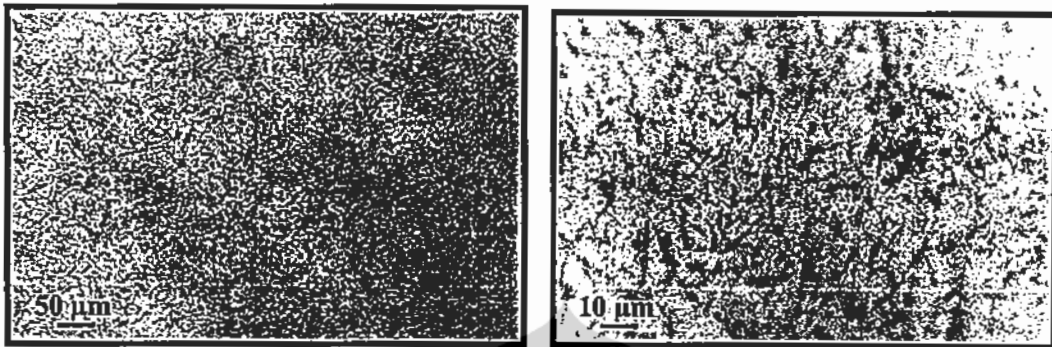
Gambar D.5 a dan b Struktur mikro temperatur $\pm 640^{\circ}\text{C}$, etsa HF 0,5 %.



(a)

(b)

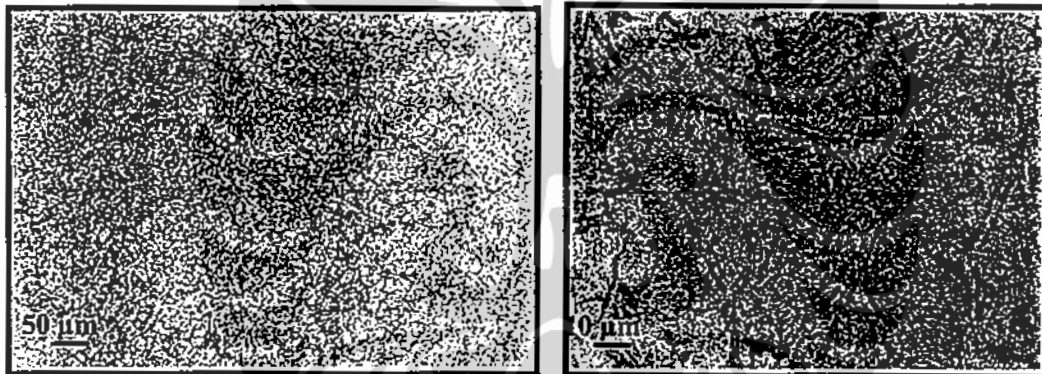
Gambar D.6 a dan b Struktur mikro temperatur $\pm 660^{\circ}\text{C}$, etsa HF 0,5 %.



(a)

(b)

Gambar D.7 a dan b Struktur mikro temperatur $\pm 680^{\circ}\text{C}$, etsa HF 0,5 %.



(a)

(b)

Gambar D.8 a dan b Struktur mikro temperatur $\pm 700^{\circ}\text{C}$, etsa HF 0,5 %.

LAMPIRAN E
PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA PADA PADUAN HIPOEUTEKTIK
(Al-7%Si)

Tabel E.1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik Sebelum Penambahan Elemen Besi

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ti
N 1	91,756	8,1237	0,08309	0	0,0216	0,0007	0,00571
N 2	92,024	7,8613	0,07878	0	0,0216	0,0007	0,0053
Rata-rata	91,89	7,9925	0,080935	0	0,0216	0,0007	0,005505

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Sn	Pb	Ca	P	Mn	Ni	Zn
N 1	0,00662	0,00042	0,00063	0,00346	0,00682	0,01094	0
N 2	0,00662	0,00042	0,00051	0,00243	0,00643	0,01102	0
Rata-rata	0,00662	0,00042	0,00057	0,002945	0,006625	0,01098	0

Tabel E.2. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik *as-cast* Setelah Penambahan 0,5% Fe

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ti
N 1	91,9	7,513	0,53913	0	0,00216	0,00442	0,00478
N 2	91,117	8,3026	0,53455	0	0,00216	0,00365	0,00504
Rata-rata	91,5085	7,9078	0,53684	0	0,00216	0,004035	0,00491

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Sn	Pb	Ca	P	Mn	Ni	Zn
N 1	0,00662	0,00042	0,00028	0,00254	0,00795	0,01466	0
N 2	0,00662	0,00042	0,00023	0,00398	0,00833	0,01569	0
Rata-rata	0,00662	0,00042	0,000255	0,00326	0,00814	0,015175	0

Tabel E.3. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik *as-cast* Setelah Penambahan 1,0% Fe

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ti
N 1	91,7818	7,1828	1,011	0	0,0021	0,00165	0,00482
N 2	91,069	7,8242	1,0834	0	0,0021	0,00167	0,00466
Rata-rata	91,4254	7,5035	1,0472	0	0,0021	0,00166	0,00474

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Sn	Pb	Ca	P	Mn	Ni	Zn
N 1	0,00662	0,00042	0	0	0,00175	0,00697	0,0041
N 2	0,00662	0,00042	0	0	0,00175	0,00617	0
Rata-rata	0,00662	0,00042	0	0	0,00175	0,00657	0,00205

Tabel E.4. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik *as-cast* Setelah Penambahan 1,4% Fe

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ti
N 1	90,516	7,7742	1,4117	0,24273	0,00215	0,00182	0,00589
N 2	90,514	8,0926	1,34	0,002941	0,00215	0,00085	0,00469
Rata-rata	90,515	7,9334	1,37585	0,122836	0,00215	0,001335	0,00529

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Sn	Pb	Ca	P	Mn	Ni	Zn
N 1	0,00662	0,00733	0,00036	0	0,00395	0,01496	0,01197
N 2	0,00662	0,000424	0	0	0,00175	0,00782	0
Rata-rata	0,00662	0,003877	0,00018	0	0,00285	0,01139	0,005985

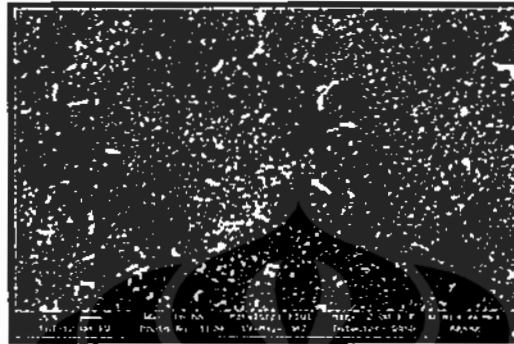
Tabel E.5. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Al-Si Hipoeutektik *as-cast* Setelah Penambahan 1,8% Fe

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ti
N 1	90,109	7,1014	1,7826	0,77559	0,002154	0,00415	0,00884
N 2	90,211	7,8027	1,9322	0	0,00216	0,0021	0,00536
Rata-rata	90,16	7,45205	1,8574	0,387795	0,002157	0,003125	0,0071

Sampel	Komposisi Kimia (% berat)						
	Sn	Pb	Ca	P	Mn	Ni	Zn
N 1	0,03517	0,03397	0,00023	0	0,01022	0,03297	0,10388
N 2	0,00662	0,00042	0,00012	0,0049	0,00961	0,01376	0,00803
Rata-rata	0,020895	0,017195	0,000175	0,00245	0,009915	0,023365	0,055955

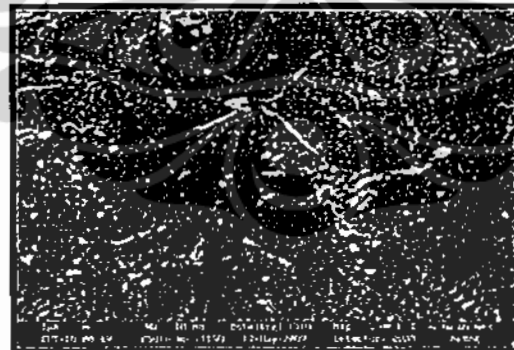
LAMPIRAN F

F.1. HASIL FOTO SEM/EDX PADUAN HIPOEUTEKTIK



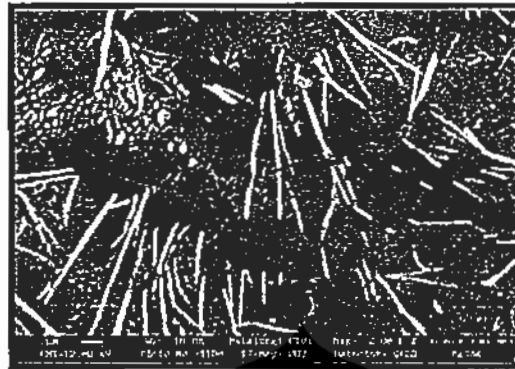
Gambar F.1 Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 0,5% Fe pada temperatur tuang 700°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF

No.	Komposisi (%)				Warna	Indikasi Fasa yang Terbentuk
	Al	Si	Fe	O		
1	73,31	17,14	-	9,55	Abu-abu muda	Si eutektik
2	95,04	2,94	-	2,02	Abu-abu	Matrik Al
3	82,71	4,07	11,14	2,08	Putih	
4	70,36	6,12	22,08	1,44	Putih	



Gambar F.2 Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,0% Fe pada temperatur tuang 700°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF

No.	Komposisi (%)				Warna	Indikasi Fasa yang Terbentuk
	Al	Si	Fe	O		
1	49,71	49,26	-	1,04	Abu-abu muda	Si eutektik
2	98,10	1,19	-	0,70	Abu-abu	Matrik Al
3	47,33	28,59	14,33	9,74	Putih	
4	39,96	48,98	6,97	4,08	Putih	



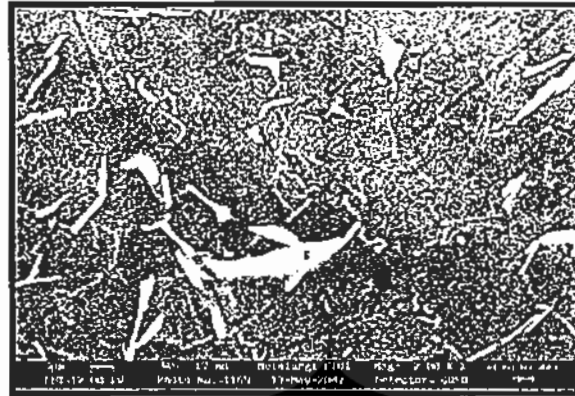
Gambar F.3 Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,4% Fe pada temperatur tuang 700°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF

No.	Komposisi (%)				Warna	Indikasi Fasa yang Terbentuk
	Al	Si	Fe	O		
1	68,10	31,23	-	0,67	Abu-abu muda	Si eutektik
2	98,14	1,32	-	0,53	Abu-abu	Matrik Al
3	61,63	17,23	19,67	1,48	Putih	
4	69,13	12,64	16,28	1,95	Putih	



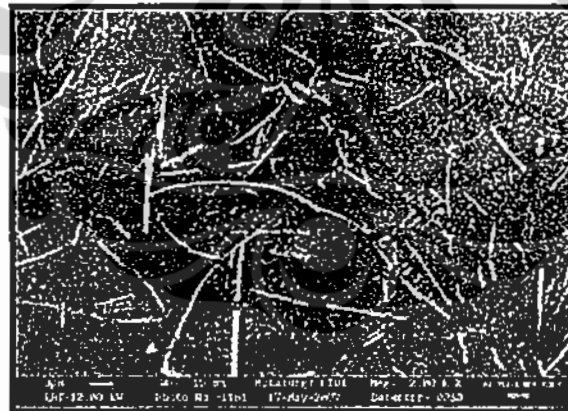
Gambar F.4 Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,8% Fe pada temperatur tuang 700°C, perbesaran 1000 X, etsa 0,5% HF

No.	Komposisi (%)				Warna	Indikasi Fasa yang Terbentuk
	Al	Si	Fe	O		
1	70,78	28,52	-	0,71	Abu-abu muda	Si eutektik
2	98,35	1,26	-	0,39	Abu-abu	Matrik Al
3	78,32	10,11	8,72	2,86	Putih	
4	68,81	9,31	20,22	1,65	Putih	



Gambar F.5 Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,0% Fe pada temperatur tuang 720°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF

No.	Komposisi (%)				Warna	Indikasi Fasa yang Terbentuk
	Al	Si	Fe	O		
1	59,78	39,60	-	0,62	Abu-abu muda	Si eutektik
2	98,17	1,11	-	0,73	Abu-abu	Matrik Al
3	51,79	18,00	29,00	1,21	Putih	
4	76,27	15,03	7,46	1,23	Putih	



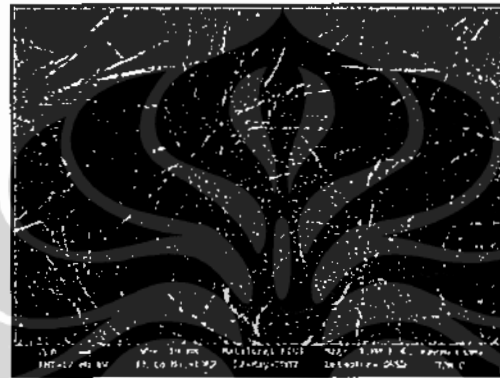
Gambar F.6 Foto hasil pengujian SEM Al-Si hipoeutektik dengan penambahan 1,8% Fe pada temperatur tuang 720°C, perbesaran 2000 X, etsa 0,5% HF

No.	Komposisi (%)				Warna	Indikasi Fasa yang Terbentuk
	Al	Si	Fe	O		
1	83,24	15,75	-	1,01	Abu-abu muda	Si eutektik
2	99,09	0,91	-	-	Abu-abu	Matrik Al
3	65,44	13,29	18,81	2,46	Putih	
4	73,23	12,70	10,42	0,67	Putih	

**F.2. STRUKTUR MIKRO PADUAN HIPOEUTEKTIK(Al-7%Si)
YANG DITAMBAHKAN Fe DAN Sr**

Al-7%Si + 1,53 % Fe + 0,015% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0,015	1,53

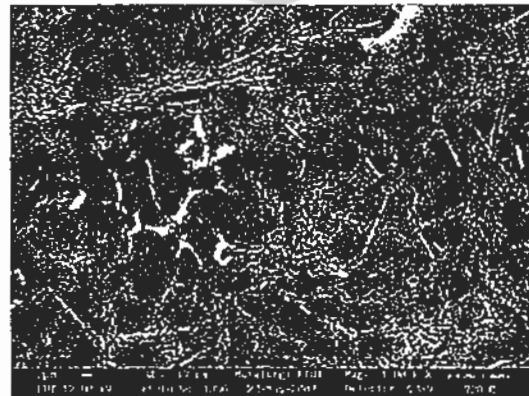


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.7 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,53 % Fe + 0,015% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,36 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0,03	1,36

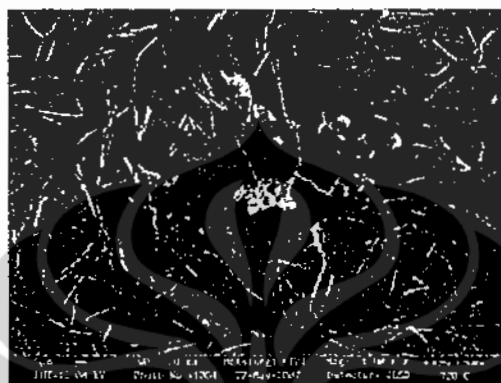


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.8 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,36 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,56 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0,03	1,56

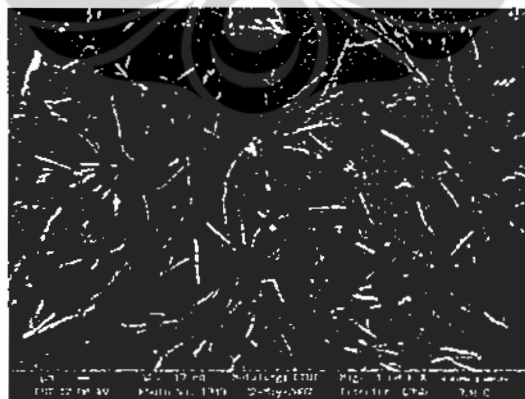


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.9 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,56 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,608 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0,03	1,608

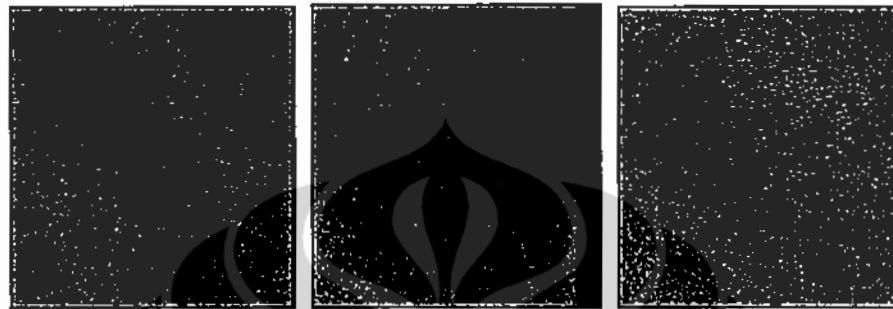


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.10 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,608 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0,045	1,64



(a) Perbesaran 100x

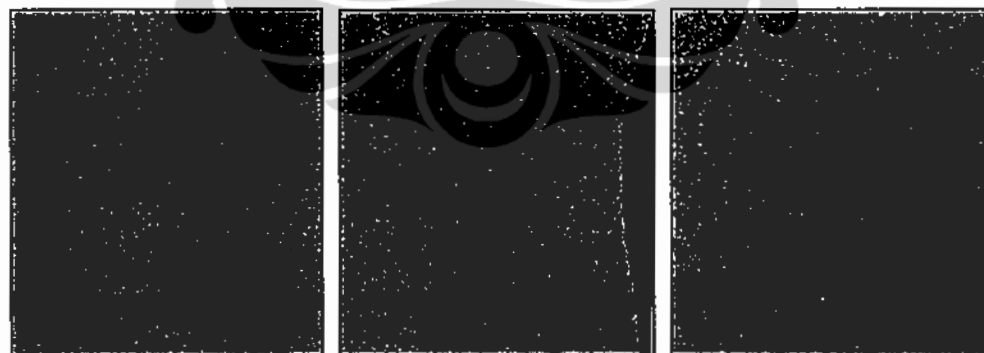
(b) Perbesaran 100x

(c) Perbesaran 500x

Gambar F.11 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,24 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
700	0,045	1,24



(a) Perbesaran 100x

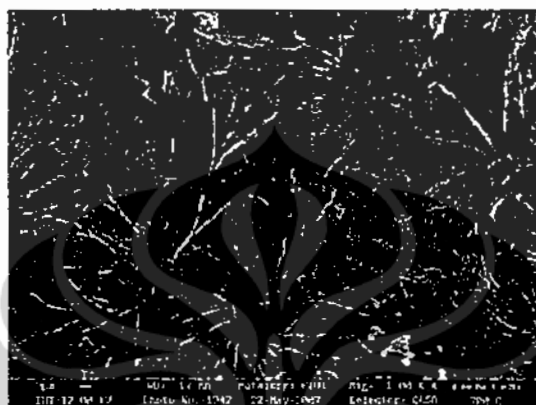
(b) Perbesaran 100x

(c) Perbesaran 500x

Gambar F.12 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,24 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,46 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
700	0,045	1,46

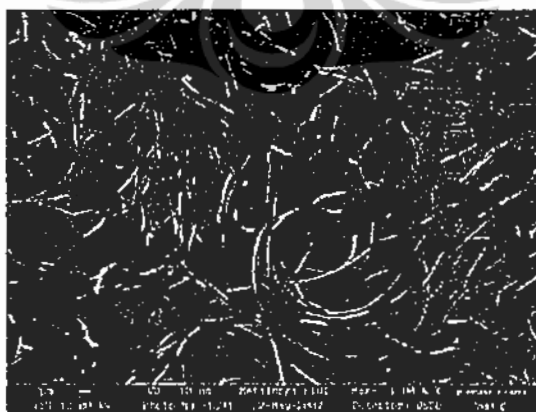


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.13 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,46 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
700	0,045	1,64

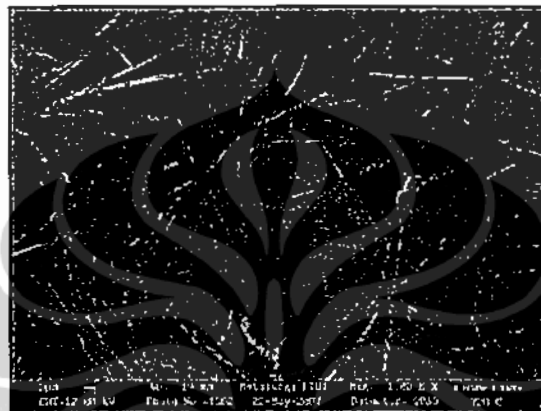


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.14 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1.53 % Fe + 0.015% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0.015	1.53

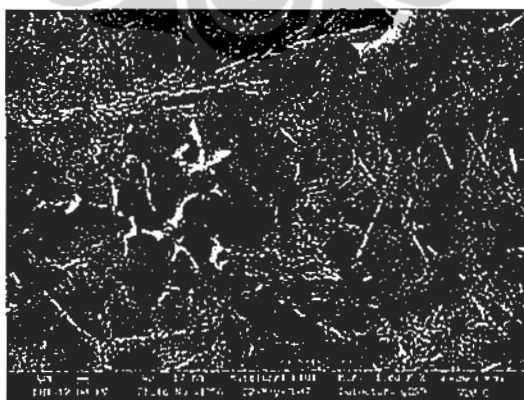


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.15 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,53 % Fe + 0,015% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,36 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0,03	1,36

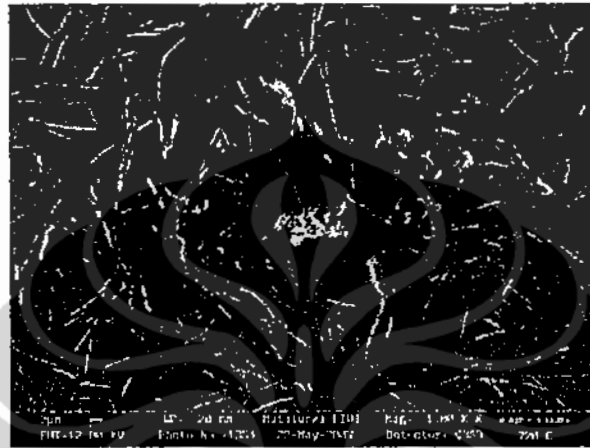


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.16 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,36 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,56 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0,03	1,56

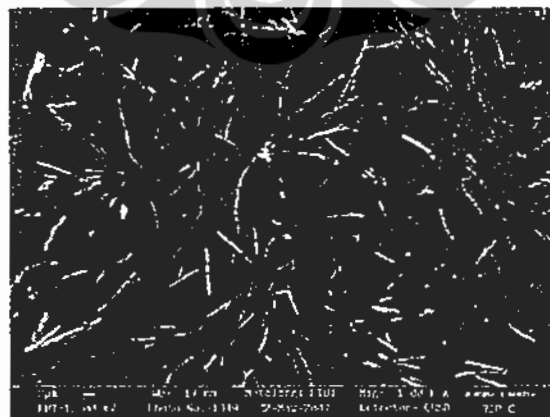


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.17 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1.56 % Fe + 0.03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0.5 % HF

Al-7%Si + 1,608 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0,03	1,608

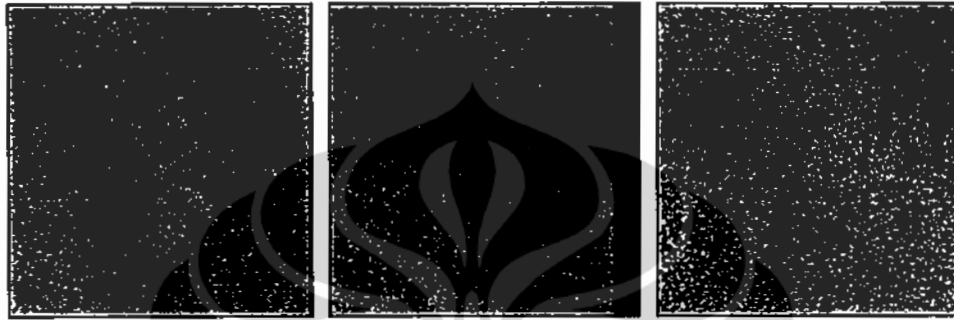


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.18 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,608 % Fe + 0,03% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 720°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
720	0,045	1,64



(a) Perbesaran 100x

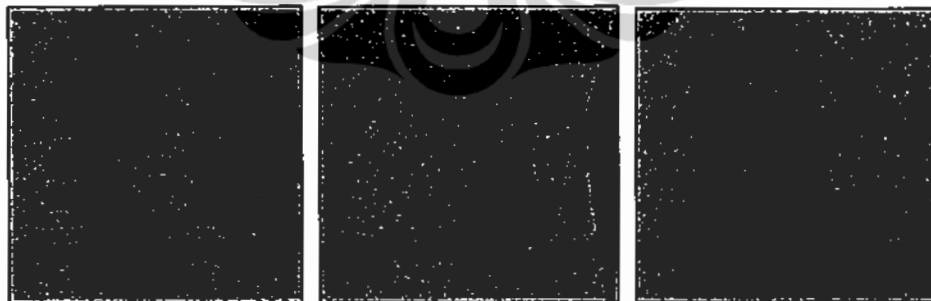
(b) Perbesaran 100x

(c) Perbesaran 500x

Gambar F.19 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 720°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,24 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
700	0,045	1,24



(a) Perbesaran 100x

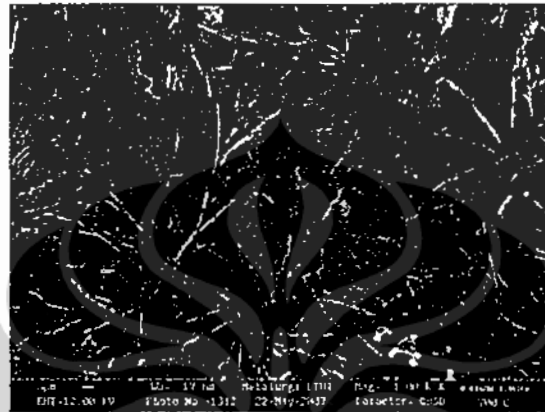
(b) Perbesaran 100x

(c) Perbesaran 500x

Gambar F.20 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,24 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,46 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
700	0,045	1,46

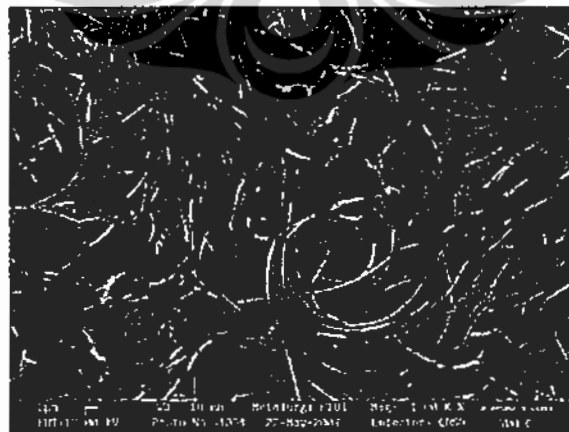


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

Gambar F.21 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,46 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF

Al-7%Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C

Temperatur (°C)	Penambahan Sr (%)	Penambahan Fe (%)
700	0,045	1,64

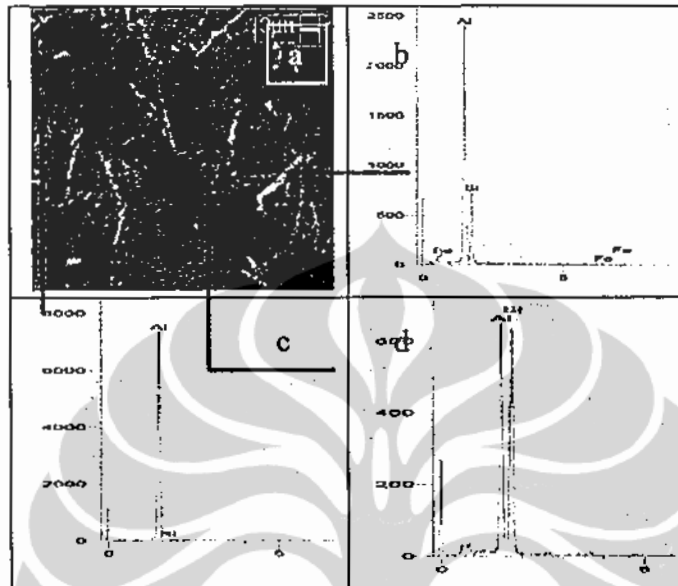


(d) Foto SEM dengan perbesaran 1000x

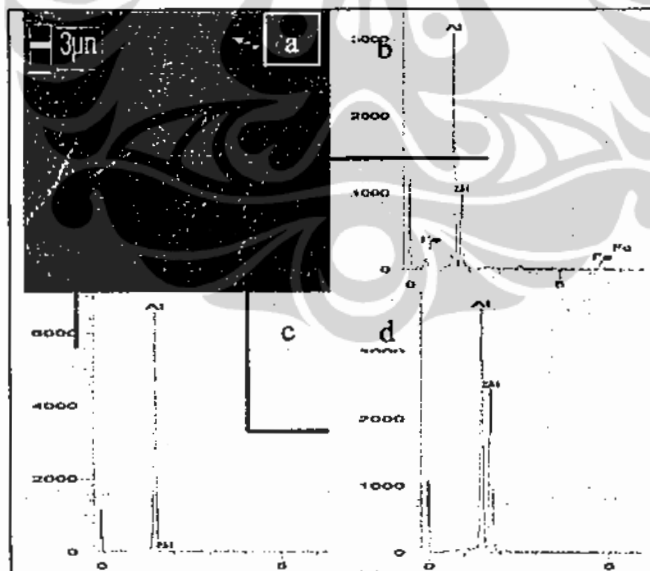
Gambar F.22 Foto sampel uji fluiditas Al-7%Si + 1,64 % Fe + 0,045% Sr pada temperatur 700°C, etsa 0,5 % HF

LAMPIRAN G

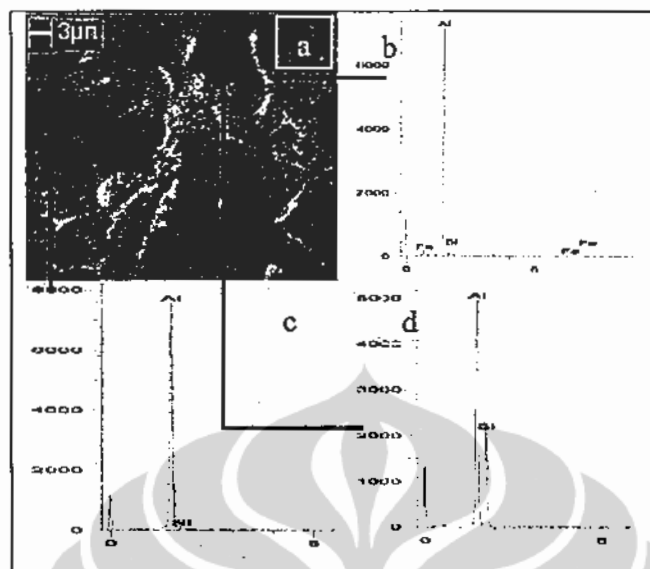
FOTO SEM / EDX PADA PADUAN HIPOEUTEKTI (Al-7%Si)



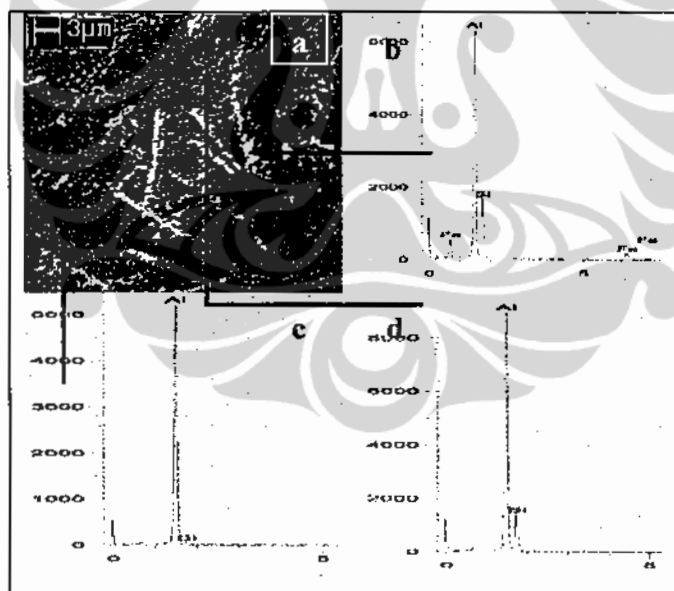
Gambar G.1 (a) Hasil SEM Paduan Al-7%Si-1,2%Fe dengan etsa HF 0,5%. (b) hasil EDX pada Intermetalik. (c) hasil EDX pada matriks aluminium (d) hasil EDX pada eutektik silikon.



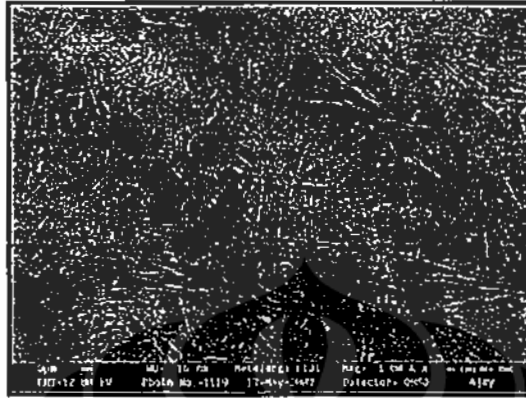
Gambar G.2 (a) Hasil SEM Paduan Al-7%Si-1,4%Fe dengan etsa HF 0,5%. hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks aluminium (d) eutektik silikon.



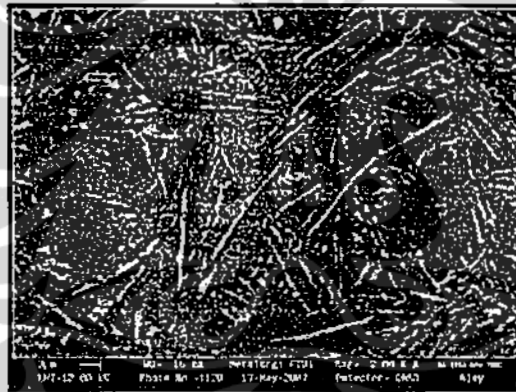
Gambar G.3 (a) Hasil SEM Paduan Al-7%Si-1,6%Fe dengan etsa HF 0,5%. hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks aluminium (d) eutektik silikon.



Gambar G.4 (a) Hasil SEM Paduan Al-7%Si-1,8%Fe dengan etsa HF 0,5%. hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks aluminium (d) eutektik silikon.



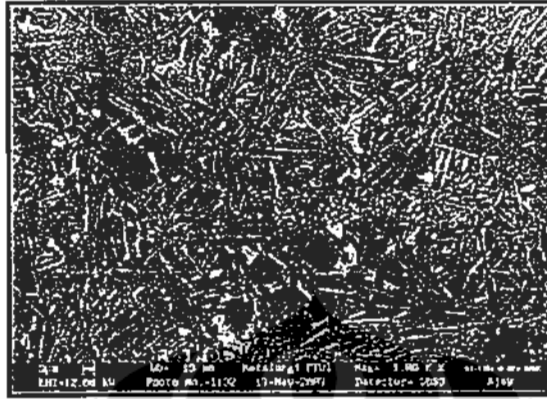
Gambar H.3 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)



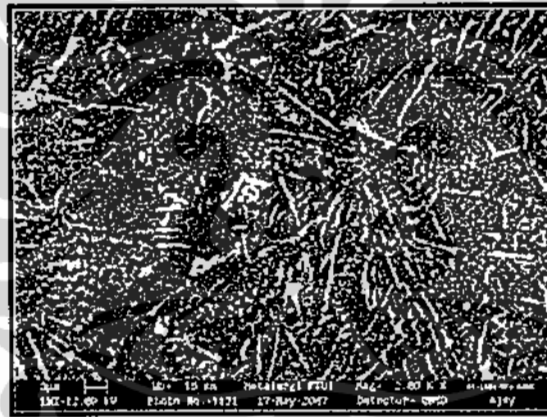
Gambar H.4 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)

Tabel H.2 Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 0% Fe pada Temperatur Tuang 720°C

No	Komposisi (% atom)			Morfologi
	Al	Si	Fe	
1	63,10	36,90	-	Pipih, panjang ~18 μ m, abu-abu
2	98,65	1,35	-	Agak hitam
3	94,35	5,65	-	Putih, agak bulat
4	84,30	15,70	-	Porositas pada matriks aluminium



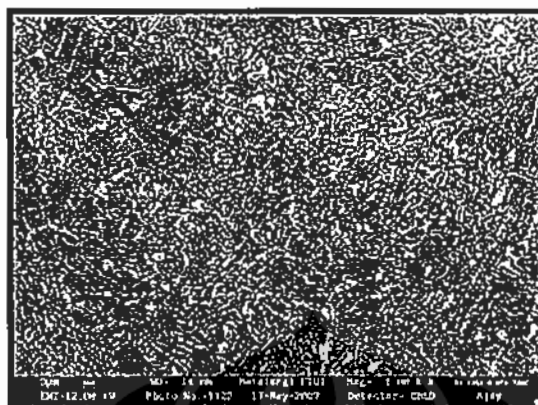
Gambar H.5 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0,8%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)



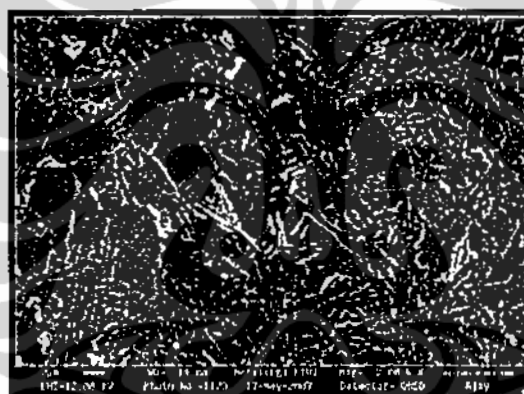
Gambar H.6 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0,8%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)

Tabel H.3 Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 0,8% Fe pada Temperatur Tuang 680°C

No	Komposisi (% atom)				Morfologi
	Al	Si	Fe	O	
1	74,25	25,75	-	-	Pipih, panjang ~9µm berlekuk, abu-abu
2	98,73	1,27	-	-	Agak hitam
3	88,10	2,50a	4,12	5,28	Putih, panjang berlekuk-lekuk
4	71,16	7,67	11,15	10,02	Putih, agak bulat



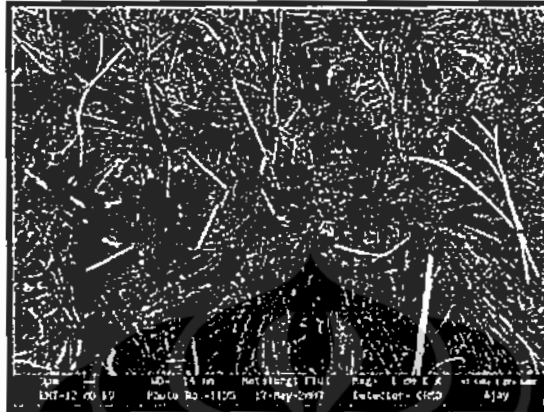
Gambar H.7 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0,8%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)



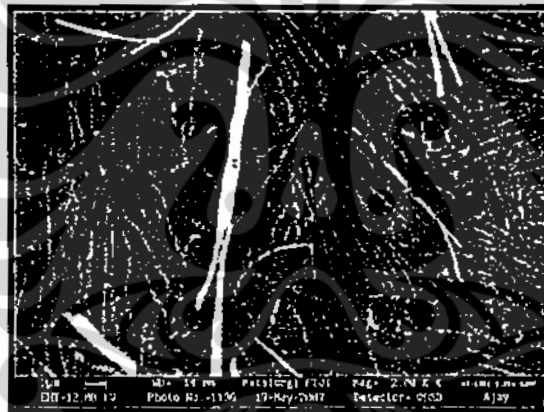
Gambar H.8 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 0,8%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)

Tabel H.4 Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 0,8% Fe pada Temperatur Tuang 720°C

No	Komposisi (% atom)			Morfologi
	Al	Si	Fe	
1	87,47	12,53	-	abu-abu, Pipih, panjang ~12µm berlekuk
2	98,26	1,74	-	Agak hitam
3	76,53	15,54	7,93	Putih, pendek agak gemuk
4	83,06	4,71	12,22	Putih, pendek agak pipih



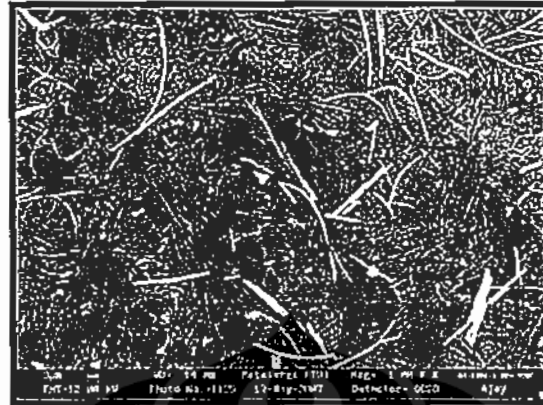
Gambar H.9 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 1,2%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)



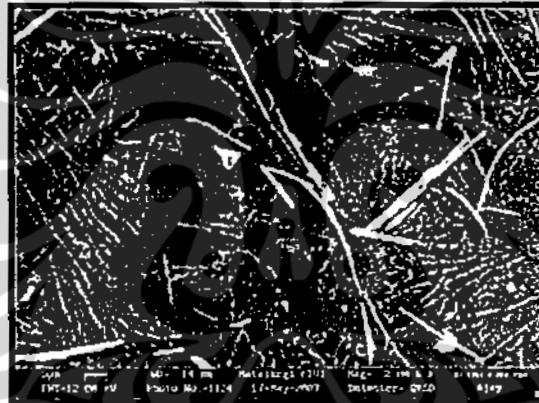
Gambar H.10 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 1,2%Fe pada temperatur tuang 680°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)

Tabel H.5 Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 1,2% Fe pada Temperatur Tuang 680°C

No	Komposisi (% atom)			Morfologi
	Al	Si	Fe	
1	72,02	27,98	-	abu-abu, Pipih, panjang ~6µm
2	98,62	1,38	-	Agak hitam
3	74,86	16,26	8,88	Putih, panjang 12 µm dan bercabang
4	64,66	18,89	16,46	Putih, panjang ~52 µm, bercabang dan besar



Gambar H.11 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 1,2%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 1000x dan ETSA HF 0,5%)

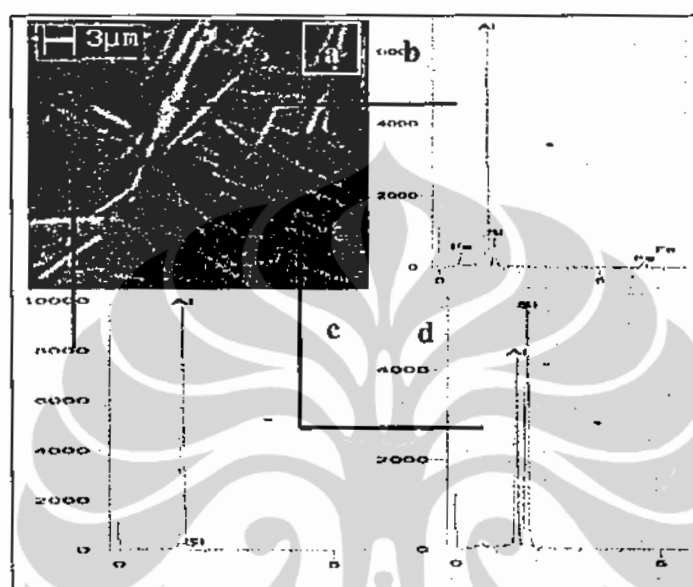


Gambar H.12 Struktur mikro Paduan Eutektik Al-Si dengan 1,2%Fe pada temperatur tuang 720°C (Perbesaran 2000x dan ETSA HF 0,5%)

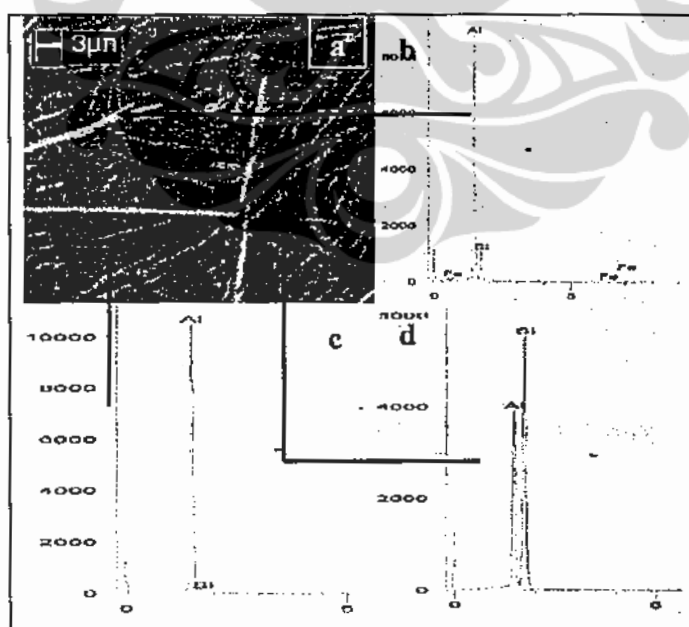
Tabel H.6 Komposisi Fasa-Fasa yang Terbentuk pada Paduan Eutektik Aluminium Silikon dengan 1,2% Fe pada Temperatur Tuang 720°C

No	Komposisi (% atom)			Morfologi
	Al	Si	Fe	
1	86,28	13,72	-	abu-abu, Pipih, panjang ~15µm
2	97,49	2,51	-	Agak hitam
3	46,39	21,05	32,56	Putih, segitiga, panjang sisi 3 µm
4	82,77	12,49	4,73	Putih, panjang ~12 µm, bercabang

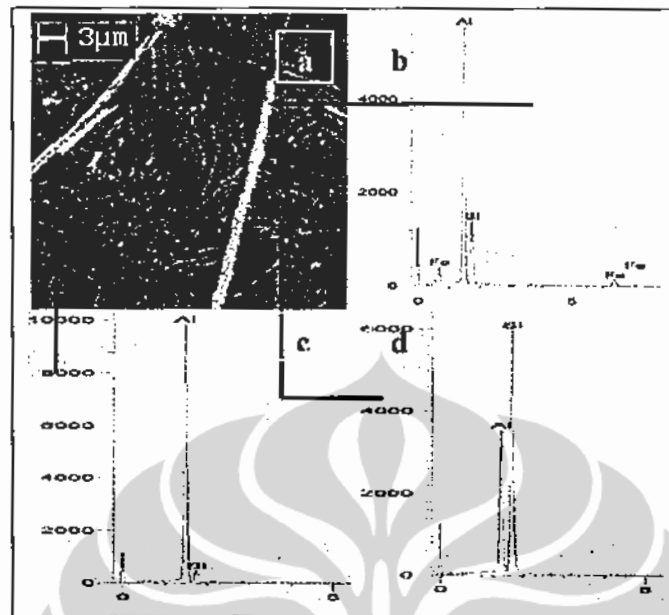
LAMPIRAN I
HASIL PENGUJIAN SEM/EDX PADA PADUAN ALUMINIUM SILIKON
EUTEKTIK (Al-11%Si)



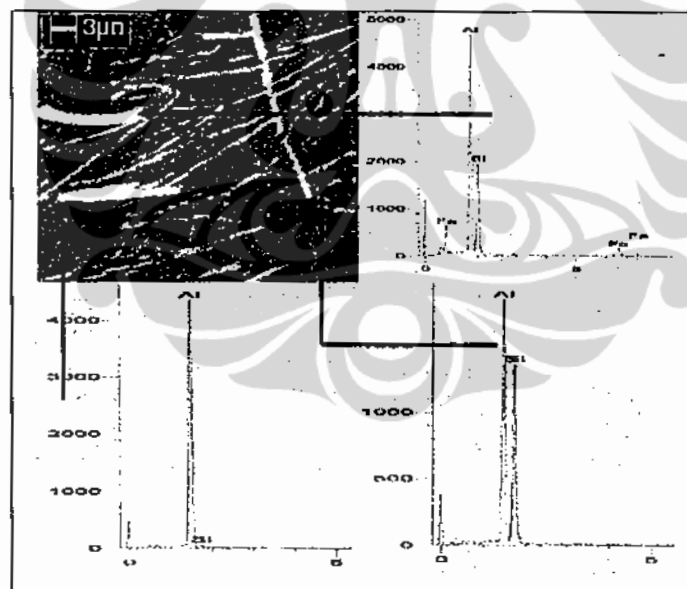
Gambar I.1 (a) Hasil SEM Paduan Al-11%Si-13,3%Fe dengan etsa HF 0,5%. hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks aluminium (d) eutektik silikon



Gambar I.2 (a) Hasil SEM Paduan Al-11%Si-0,8%Fe dengan etsa HF 0,5%. hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks aluminium (d) eutektik silikon.



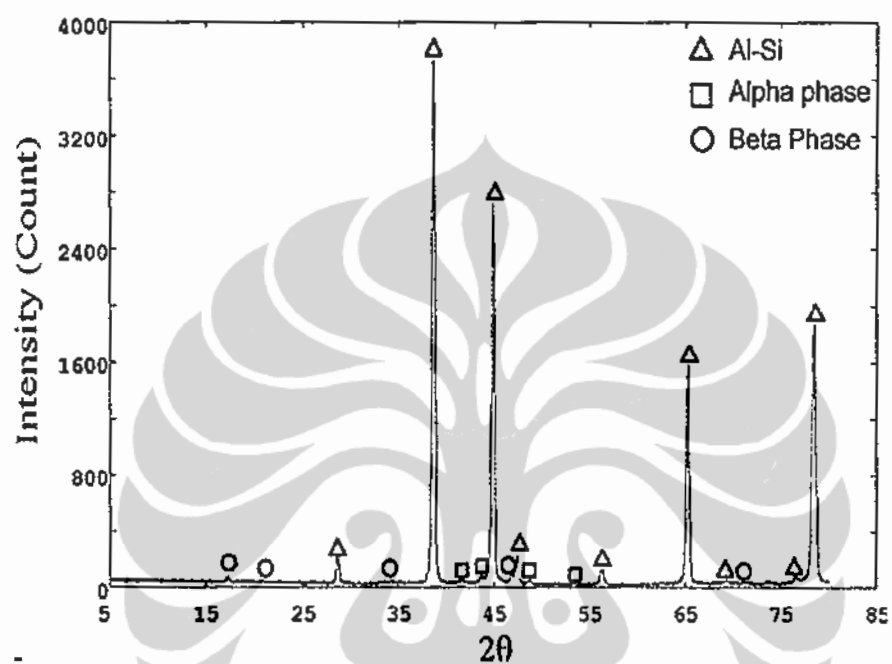
Gambar I.3 (a) Hasil SEM Paduan Al-11%Si-1%Fe dengan etsa HF 0,5%. hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks Al (d) eutektik silikon.



Gambar I.4 (a) Hasil SEM Paduan Al-11%Si-1,2%Fe dengan etsa HF 0,5%. hasil EDX pada (b) Intermetalik. (c) matriks Al (d) eutektik silikon.

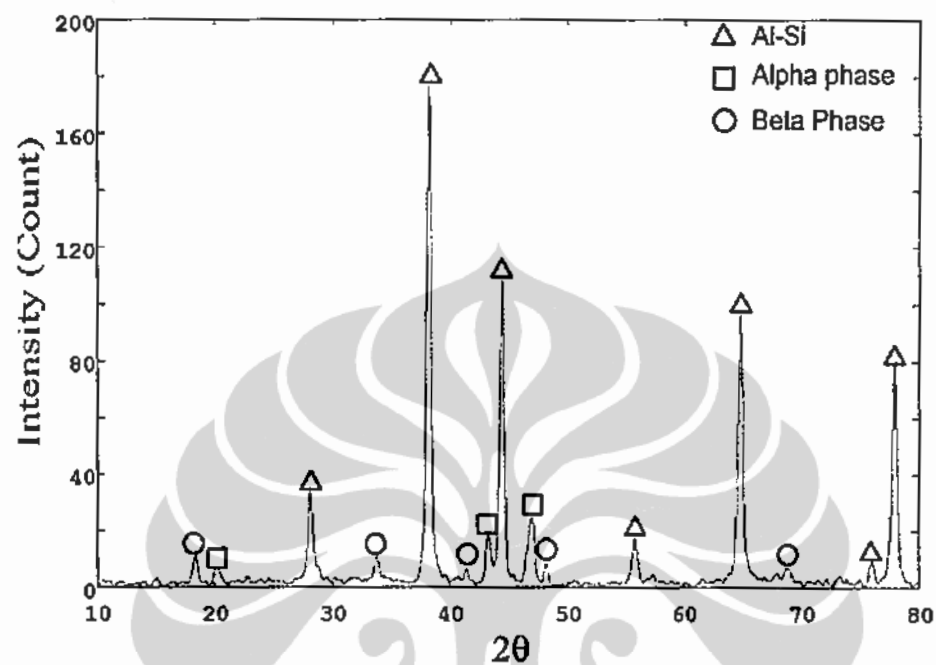
LAMPIRAN J

J.1. ANALISA XRD PADUAN HIPOEUTEKTIK (Al-7%Si) +Fe+Sr



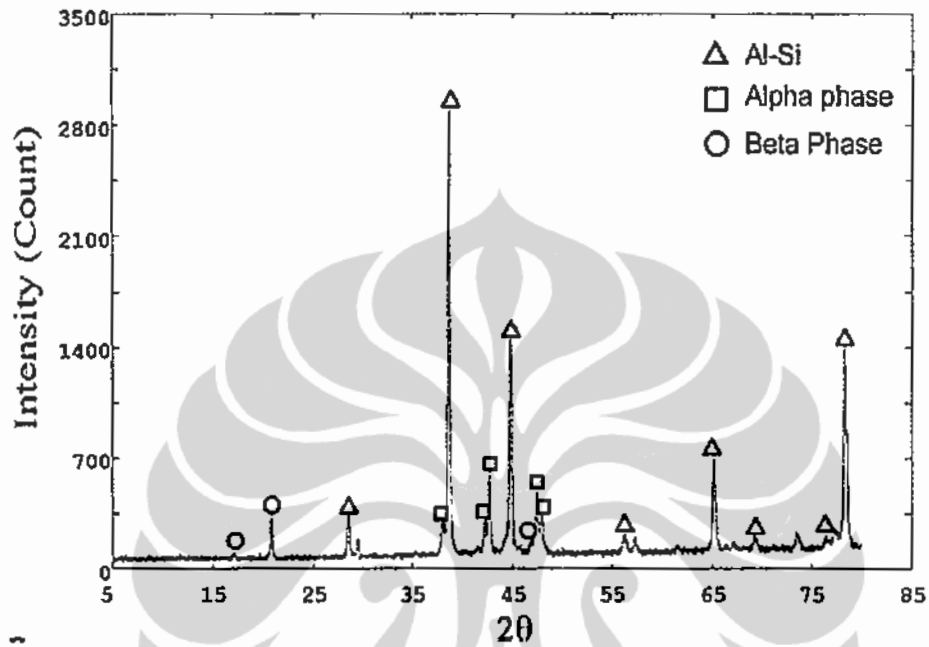
Fasa	alpha	beta	Al-Si
	219.2	625.7	1909.8
	385.7	563.9	2937.6
luas peak	319.8	388.7	18789
	187	427.9	3311.8
		189.4	2292.7
			12967
			523.7
			724
			11819.6
jumlah	1111.7	2195.6	81713.6
presentase	1.307561	2.582424	96.11002

Gambar J.1. Analisa XRD Al-7 % Si + 1,2 % Fe + 0,015 % Sr



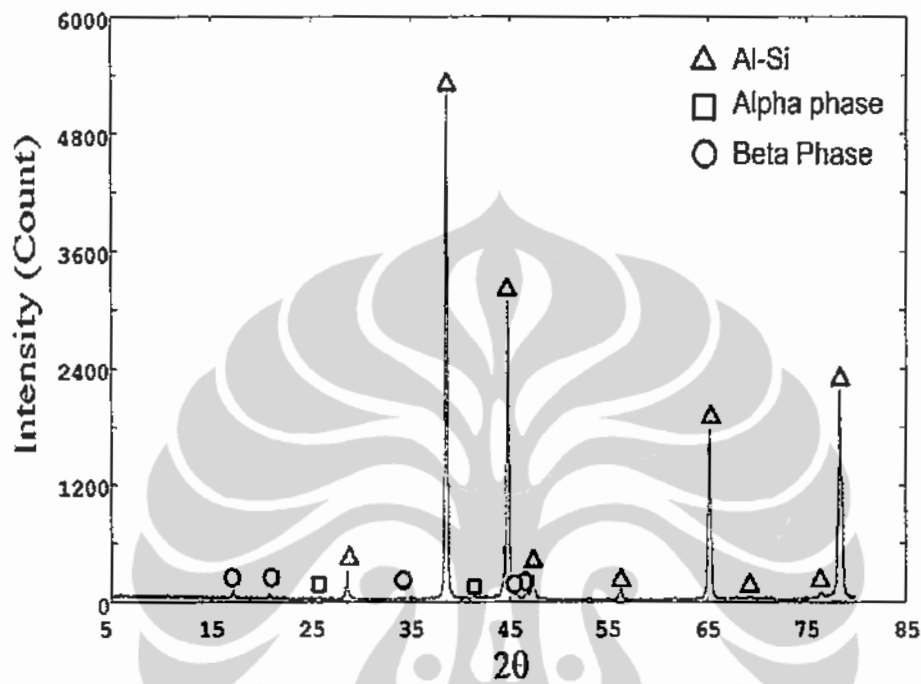
Fasa	alpha	beta	Al-Si
	193	266.3	715.7
	471.5	268.1	3891.2
	186	136.3	2396
luas peak		592.4	433.7
		246.1	2116.5
			267.7
			1814.6
jumlah	850.5	1509.2	11635.4
presentase	6.077127	10.78377	83.1391

Gambar J.2. Al-7 % Si + 1,2 % Fe + 0,03 % Sr



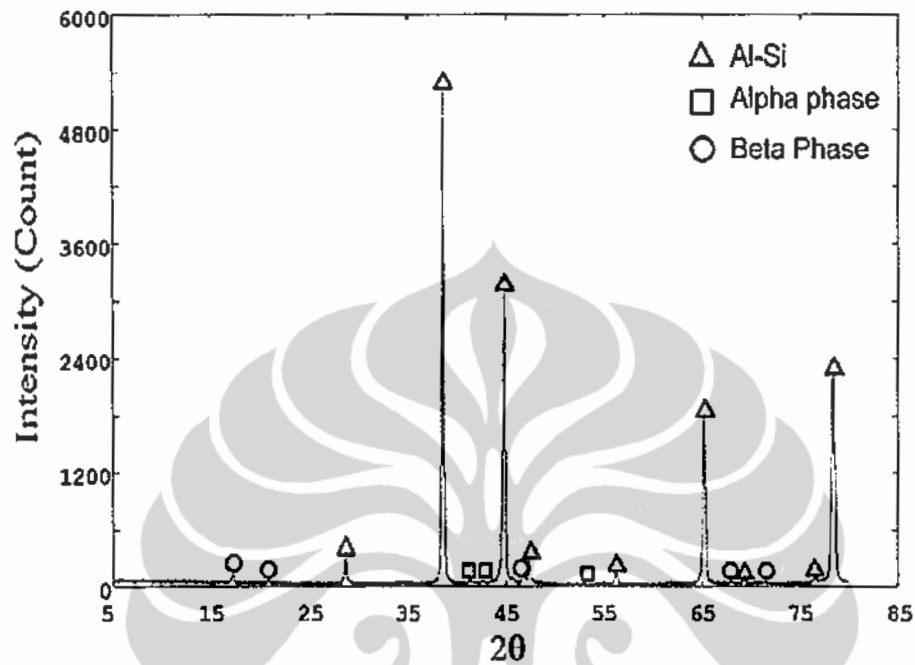
Fasa	alpha	beta	Al-Si
luas peak	3971.4	1484.7	5090.3
	4003.7	4035.7	41939.5
	8134.6	2239.8	22113.2
	7555.6		3198.2
	4498.4		11958.4
			4487.4
			2681.0
			20626.4
jumlah	28163.7	7760.2	112094.4
presentase	19.02717	5.24273	75.7301

Gambar J.3. Al-7 % Si + 1,2 % Fe + 0,045 % Sr



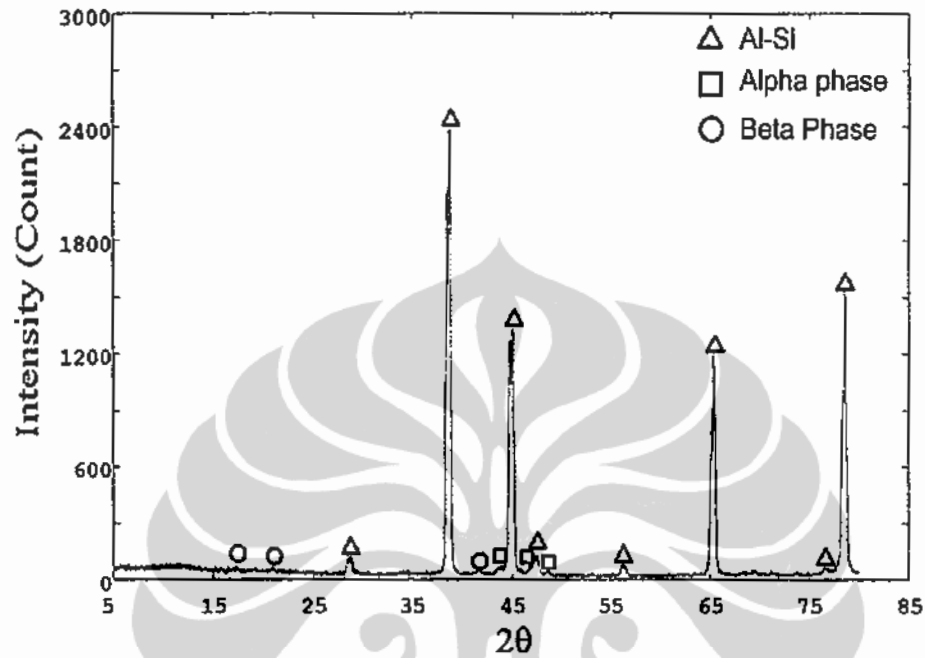
Fasa	alpha	beta	Al-Si
luas peak	228.0	817.3	4001.0
	606.1	373.0	70533.0
	761.9	619.8	30832.2
		1410.1	3405.7
			2084.4
			24967.3
			361.1
			606.5
		24697.5	
jumlah	1596.0	3220.2	161488.7
presentase	0.959683	1.936323	97.10399

Gambar J.4. Al-7 % Si + 1,4 % Fe + 0,015 % Sr



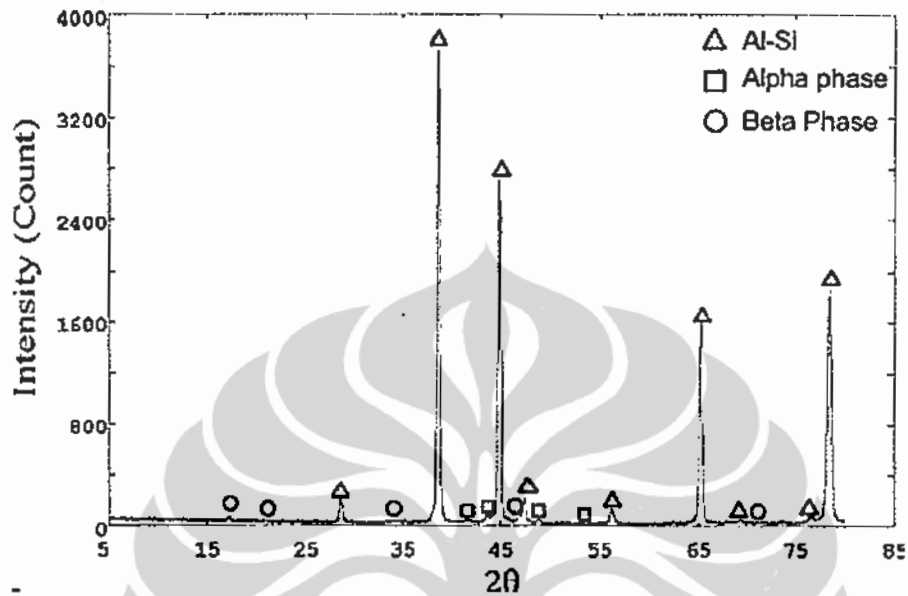
Fasa	alpha	beta	Al-Si
	319.9	1436.0	3471.1
	223.5	373.9	46917.1
	534.8	1047.9	35443.2
		356.5	3635.4
luas peak		244.2	577.4
			16950.1
			419.3
			857.9
			20880.7
jumlah	1078.2	3458.5	129152.2
presentase	0.806499	2.586976	96.60652

Gambar J.5. Al-7 % Si + 1,6 % Fe + 0,015 % Sr



Fasa	alpha	beta	Al-Si
	680.3	640.7	1443.7
	1024.5	490.0	29876.5
	390.8	1403.9	15080.4
luas peak		517.6	1285.7
			2325.4
			17048.8
			779.3
jumlah	2095.6	3052.2	101611.4
presentase	1.962922	2.858957	95.17812

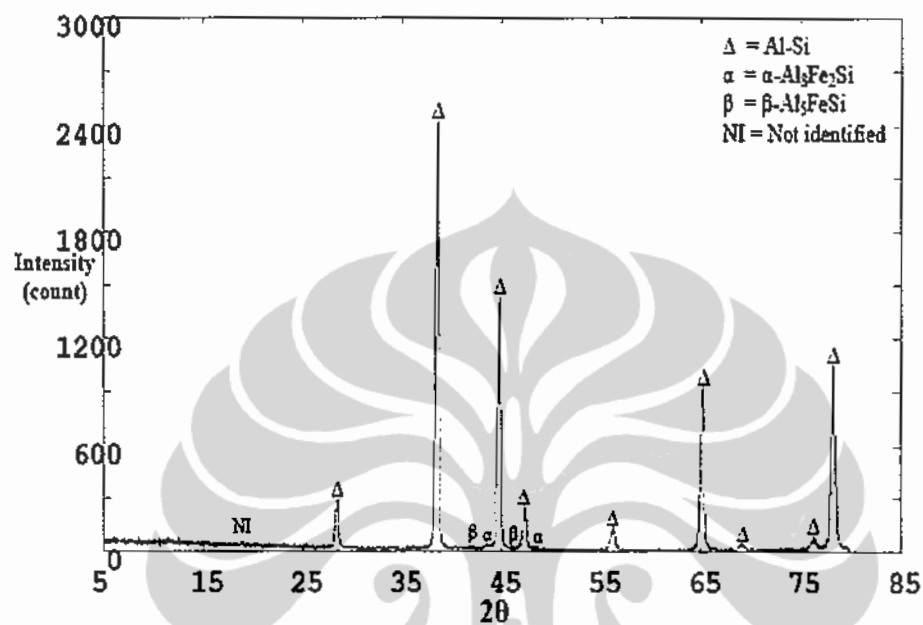
Gambar J.6. Al-7 % Si + 1,6 % Fe + 0,045 % Sr



Fasa	alpha	beta	Al-Si
luas peak	219.2	625.7	1909.8
	385.7	563.9	29376
	319.8	388.7	18789
	187	427.9	3311.8
		189.4	2292.7
			12967
			523.7
			724
			11819.6
jumlah	1111.7	2195.6	81713.6
presentase	1.307561	2.582424	96.11002

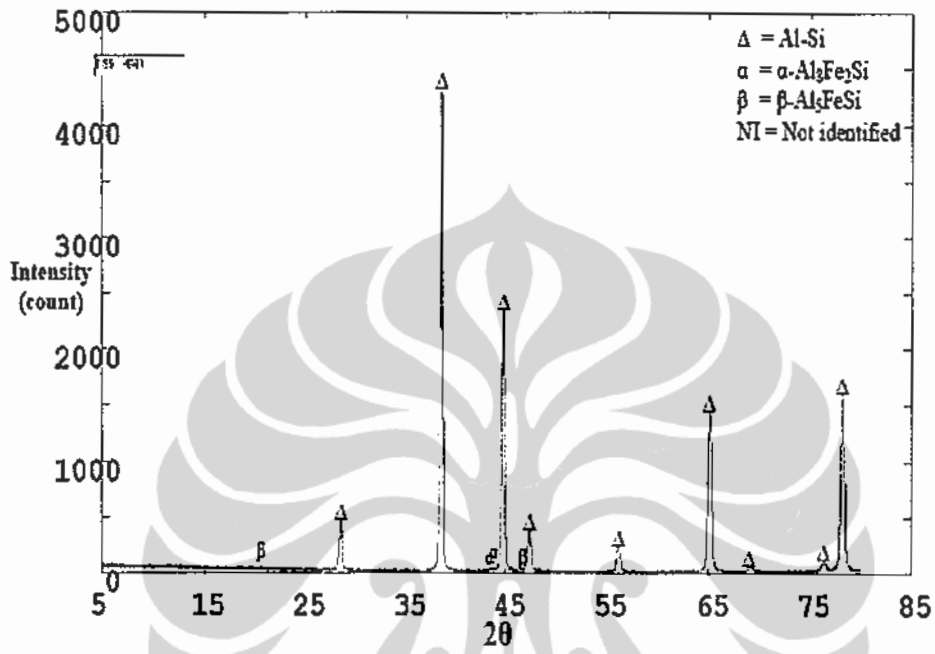
Gambar J.7. Al-7%Si + 1.2 % Fe + 0.015 % Sr

J.2. ANALISA XRD PADUAN EUTEKTIK ALUMINIUM SILIKON + Fe + Sr



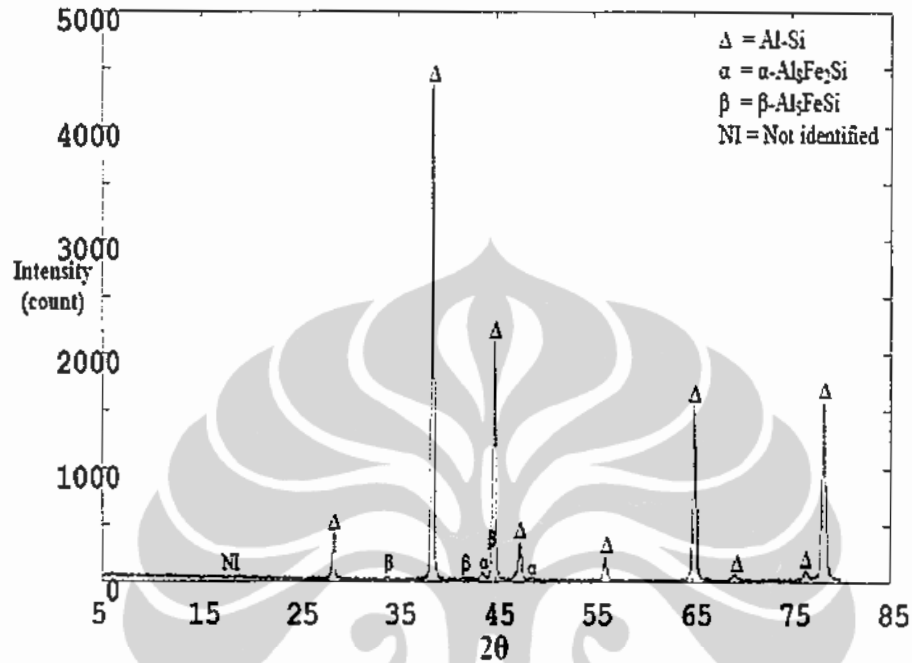
2θ	Area	fasa
18.770	656	NI
28.537	4882.2	Al-Si
38.583	46112.7	Al-Si
41.863	303.8	β-AlFeSi
43.606	460.7	α-AlFeSi
44.819	15842.6	Al-Si
46.853	3466.5	β-AlFeSi
47.363	5319.9	Al-Si
48.650	302	α-AlFeSi
56.186	3479	Al-Si
65.177	10156.4	Al-Si
69.165	669.2	Al-Si
76.406	1618.6	Al-Si
78.303	11865	Al-Si
78.720	2416.8	Al-Si
total	107551.4	

Gambar J.8. Al-11%Si + 0,6% Fe + 0,015% Sr



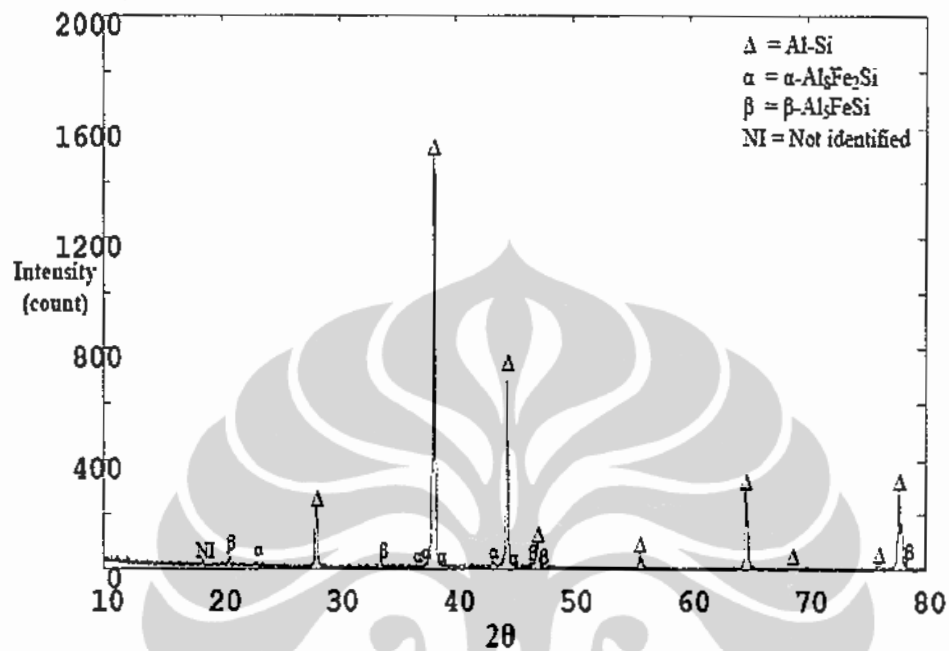
2θ	Area	fase
20.576	250	β-AlFeSi
28.521	4392	Al-Si
38.556	38375.3	Al-Si
43.567	576	α-AlFeSi
43.877	264	α-AlFeSi
44.794	26191.1	Al-Si
46.767	330	β-AlFeSi
47.347	6528	Al-Si
56.107	3250	Al-Si
65.136	14439.8	Al-Si
65.323	3724.9	Al-Si
69.010	620	Al-Si
76.420	1026	Al-Si
78.273	21315.6	Al-Si
78.445	6090	Al-Si
total	127272.7	

Gambar J.9. Al-11%Si + 0,6% Fe + + 0,030% Sr



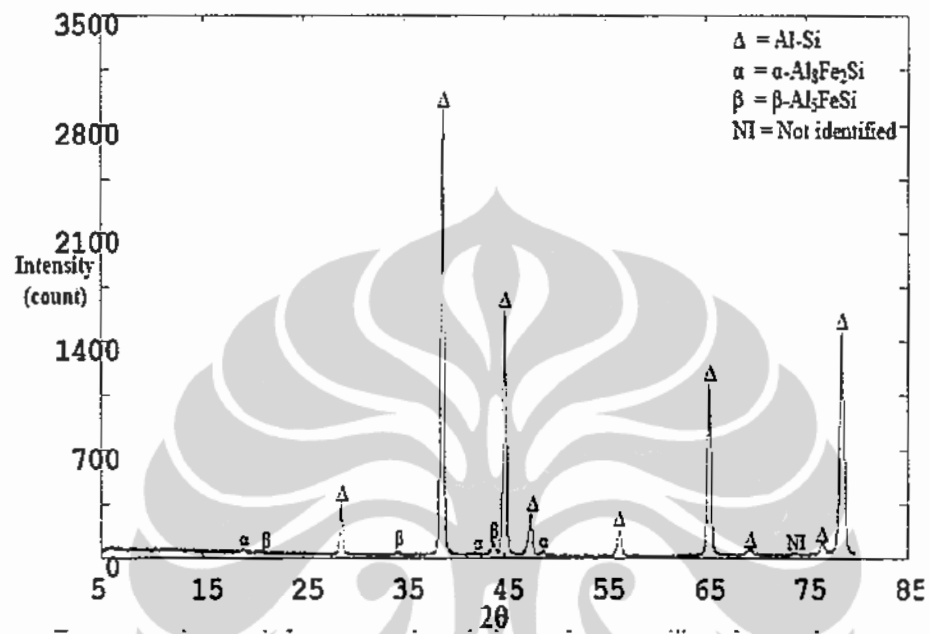
2 θ	Area	fasa
18.724	208	NI
28.622	3696	Al-Si
34.149	208	β -AlFeSi
38.647	26531.8	Al-Si
38.762	8280.2	Al-Si
41.688	184	β -AlFeSi
43.774	288	α -AlFeSi
44.626	1764	β -AlFeSi
45.001	5849.9	Al-Si
47.439	3850	Al-Si
48.659	245	α -AlFeSi
56.253	1596	Al-Si
65.253	10920	Al-Si
65.409	4248.1	Al-Si
69.287	308	Al-Si
76.508	750	Al-Si
total	68927	

Gambar J.10. Al-11%Si + 0,6% Fe + 0,045% Sr



2 Theta	Area	fasa
18.464	320	NI
20.717	384	β -AlFeSi
20.715	272	β -AlFeSi
28.117	2310	Al-Si
33.935	88	β -AlFeSi
38.167	15796.1	Al-Si
38.745	112	α -AlFeSi
43.174	152	α -AlFeSi
44.395	4374.1	Al-Si
45.129	110	α -AlFeSi
46.342	84	β -AlFeSi
46.969	728	Al-Si
47.472	95	β -AlFeSi
55.789	264	Al-Si
64.740	2142	Al-Si
68.653	128	Al-Si
75.977	125	Al-Si
78.073	1392	Al-Si
78.347	138	β -AlFeSi
29014.2		

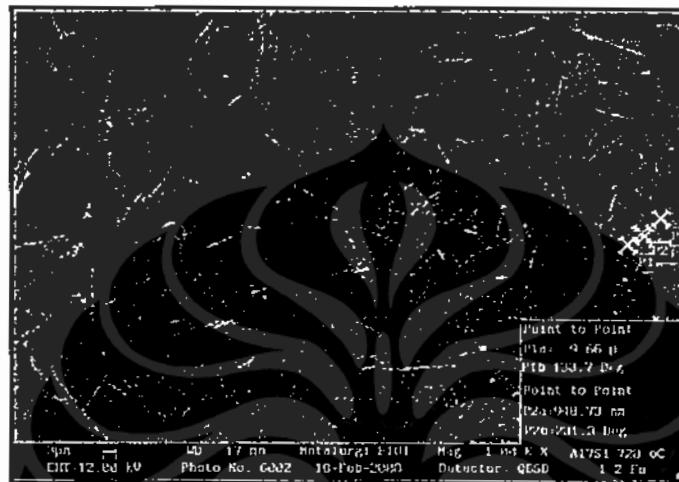
Gambar J.11. Al-11%Si + 0,8% Fe + 0,015% Sr



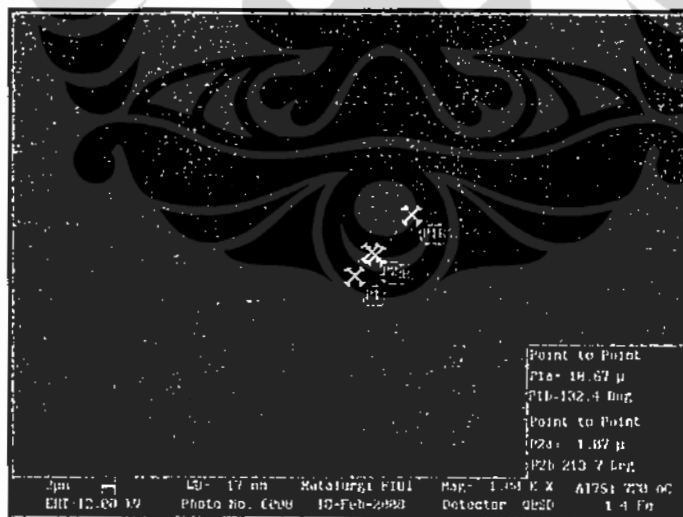
2Thetn	Area	fasa
18.981	1013.8	α -AlFeSi
21.172	316.9	β -AlFeSi
28.745	4515.2	Al-Si
34.403	757.5	β -AlFeSi
38.835	39780.9	Al-Si
42.511	180.7	α -AlFeSi
43.929	1793.9	β -AlFeSi
45.064	24438.2	Al-Si
46.871	184	β -AlFeSi
47.635	4772.5	Al-Si
48.853	678.2	α -AlFeSi
56.435	3368.3	Al-Si
65.437	19255.2	Al-Si
69.451	698.4	Al-Si
71.537	192	β -AlFeSi
76.767	2282	Al-Si
77.251	220	β -AlFeSi
77.742	372	β -AlFeSi
78.540	19558.2	Al-Si
79.231	264	β -AlFeSi
total	124641.9	

Gambar J.12. Al-11%Si + 1% Fe + 0,015% Sr

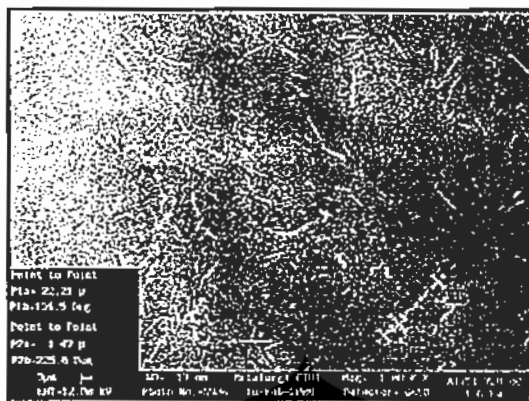
LAMPIRAN K
HASIL SEM, PENGUKURAN PANJANG DAN LEBAR INTERMETALIK
PADUAN Al-7%Si



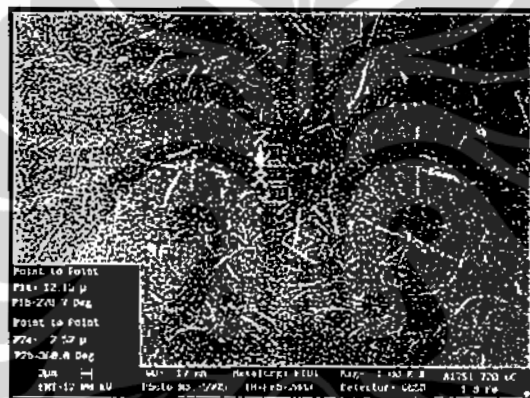
Gambar K.1 Pengukuran panjang intermetalik pada Al-7%Si-1,2%Fe. 1000x, etsa HF 0,5%.



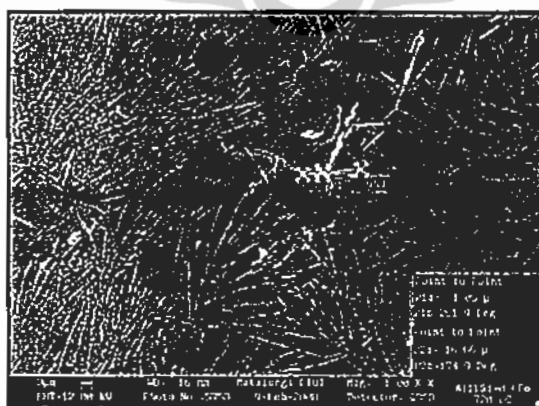
Gambar K.2 Pengukuran panjang intermetalik pada Al-7%Si-1,4%Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



Gambar K.3 Pengukuran panjang intermetalik pada Al-7%Si-1,6%Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



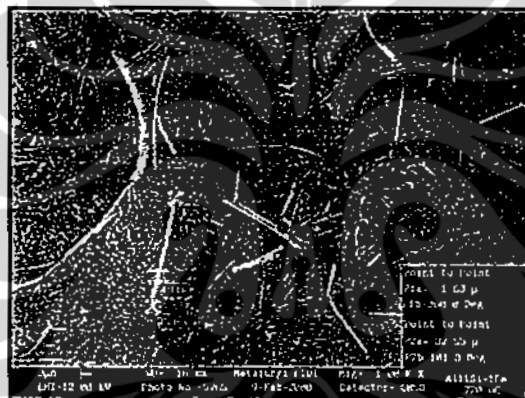
Gambar K.4 Pengukuran panjang intermetalik pada Al-7%Si-1,8%Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



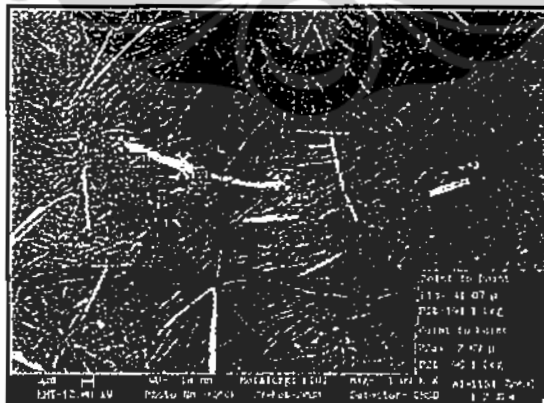
Gambar K.5 Pengukuran panjang intermetalik pada Al-11%Si-0,6%Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



Gambar K.6 Pengukuran panjang intermetalik pada Al-11%Si-0,8%Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



Gambar K.7 Pengukuran panjang intermetalik pada Al-11%Si-1%Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.

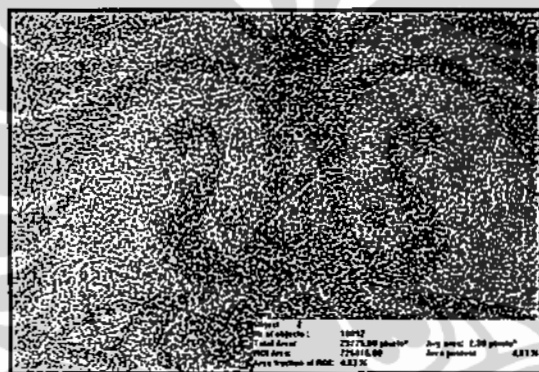


Gambar K.8 Pengukuran panjang intermetalik pada Al-11%Si-1,2%Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.

LAMPIRAN L
PENGUKURAN FRAKSI LUAS INTERMETALIK PADUAN Al-7%wtSi DAN Al-
11%wtSi



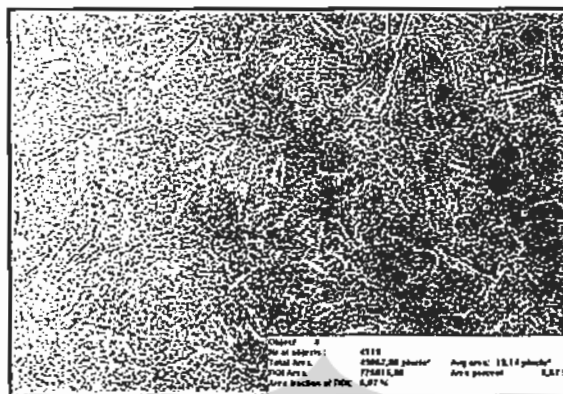
Gambar L.1 Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7%Si dengan penambahan 1,2% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



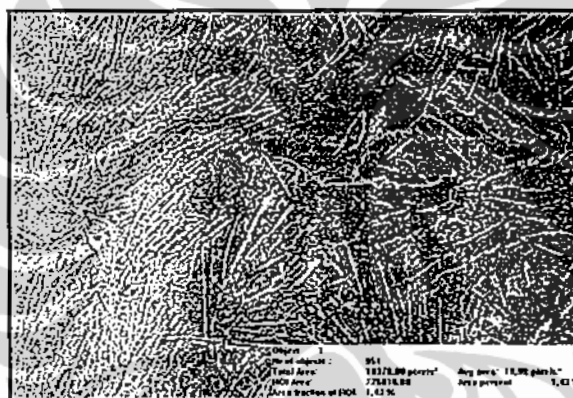
Gambar L.2 Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7%Si dengan penambahan 1,4% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



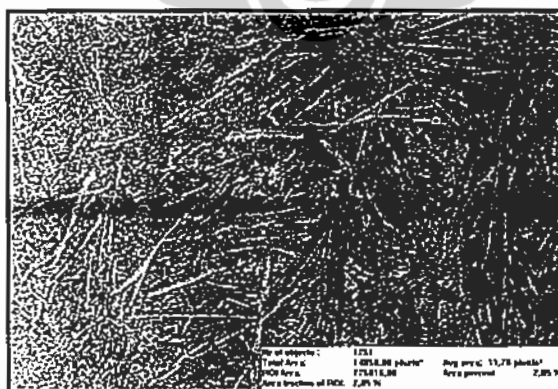
Gambar L.3 Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7%Si dengan penambahan 1,6% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



Gambar L.4 Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-7%Si dengan penambahan 1,8% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



Gambar L.5 Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-11%Si dengan penambahan 0,6% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



Gambar L.6 Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-11%Si dengan penambahan 0,8% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



Gambar L.7 Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-11%Si dengan penambahan 1% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.



Gambar L.8 Hasil perhitungan fraksi intermetalik pada foto SEM pada Al-11%Si dengan penambahan 1,2% Fe. Perbesaran 1000x, etsa HF 0,5%.

LAMPIRAN M

Tabel M.1. Hasil pengujian fluiditas Al-7 %Si + Fe (1,2-1,6%)

Temperatur (°C)	Al-7 %Si	Nilai Fluiditas (cm)	Peningkatan Fluiditas	Keterangan
720	Al-7 %Si + 1,2 %Fe	16,95 ✓	11,5 %	Penurunan
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe	15		
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe	14,5	3,33 %	Penurunan
700	Al-7 %Si + 1,2 %Fe	15,05 ✓	4,3 %	Penurunan
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe	14,4		
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe	13,7	4,8 %	Penurunan
680	Al-7 %Si + 1,2 %Fe	14,95 ✓	9,4 %	Penurunan
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe	13,55		
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe	12,25	9,6 %	Penurunan
660	Al-7 %Si + 1,2 %Fe	13,65 ✓	7,3 %	Penurunan
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe	12,40		
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe	10,95	11,7 %	Penurunan

Tabel M.2. Hasil pengujian fluiditas Al-7 %Si + 1,2 % Fe + Sr (0,015-0,045%)

Temperatur (°C)	Al-7 %Si	Nilai Fluiditas (cm)	Peningkatan Fluiditas (cm)	Keterangan
720	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,015 % Sr	18,5	27,4 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,030 % Sr	25,5 ✗		
	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,045 % Sr	23,5	6,8 %	Penurunan
700	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,015 % Sr	16,95	8,6 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,030 % Sr	18,55 ✗		
	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,045 % Sr	17,05	8 %	Penurunan
680	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,015 % Sr	15,65	3,7 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,030 % Sr	16,25 ✗		
	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,045 % Sr	15,9	2,1 %	Penurunan
660	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,015 % Sr	14,5	5,8 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,030 % Sr	15,4 ✗		
	Al-7 %Si + 1,2 %Fe + 0,045 % Sr	11,4	25,9 %	Penurunan

Tabel M.3. Hasil pengujian fluiditas Al-7 %Si + 1,4 % Fe + Sr (0,015-0,045%)

Temperatur ($^{\circ}$ C)	Paduan	Nilai Fluiditas (cm)	Peningkatan Fluiditas (cm)	Keterangan
720	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,015 % Sr	17,9	15,4 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,030 % Sr	21,15		
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,045 % Sr	13,95	34 %	Penurunan
700	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,015 % Sr	15,1	15,4 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,030 % Sr	17,85		
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,045 % Sr	13,6	23,8 %	Penurunan
680	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,015 % Sr	13,3	10,7 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,030 % Sr	14,9		
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,045 % Sr	11,65	21,8 %	Penurunan
660	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,015 % Sr	12,15	3,2 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,030 % Sr	12,55		
	Al-7 %Si + 1,4 %Fe + 0,045 % Sr	10,25	18,3 %	Penurunan

Tabel M.4. Hasil pengujian fluiditas Al-7 %Si + 1,6 % Fe + Sr (0,015-0,045%)

Temperatur ($^{\circ}$ C)	Paduan	Nilai Fluiditas (cm)	Peningkatan Fluiditas (cm)	Keterangan
720	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,015 % Sr	15,45	10,4 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,030 % Sr	17,25		
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,045 % Sr	13,75	20,3%	Penurunan
700	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,015 % Sr	14,7	6,7 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,030 % Sr	15,75		
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,045 % Sr	12,5	20,6 %	Penurunan
680	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,015 % Sr	13,65	6,5 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,030 % Sr	14,6		
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,045 % Sr	11	24,6 %	Penurunan
660	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,015 % Sr	11,55	6,5 %	Peningkatan
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,030 % Sr	12,35		
	Al-7 %Si + 1,6 %Fe + 0,045 % Sr	10,15	17,8 %	Penurunan

Tabel M.5 Hasil pengujian fluiditas Al-11 % Si + Fe (0,6-1,0%)

Temperatur (°C)	Al-11 %Si	Nilai Fluiditas (cm)	Peningkatan Fluiditas	Keterangan
720	Al-11 %Si + 0,6 %Fe	30,1	0,5 %	Penurunan
	Al-11 %Si + 0,8 %Fe	29,95		
	Al-11 %Si + 1,0 %Fe	29		
700	Al-11 %Si + 0,6 %Fe	27,6	3,6 %	Penurunan
	Al-11 %Si + 0,8 %Fe	27,05		
	Al-11 %Si + 1,0 %Fe	27,6		
680	Al-11 %Si + 0,6 %Fe	25,9	2,5 %	Penurunan
	Al-11 %Si + 0,8 %Fe	25,26		
	Al-11 %Si + 1,0 %Fe	24,05		
660	Al-11 %Si + 0,6 %Fe	22,87	4,9 %	Penurunan
	Al-11 %Si + 0,8 %Fe	21,75		
	Al-11 %Si + 1,0 %Fe	21,65		

Tabel M.6 Hasil pengujian fluiditas Al-11 %Si + 0,6 %Fe + Sr (0,015-0,045%)

Temperatur (°C)	Al-11 %Si	Nilai Fluiditas (cm)	Peningkatan Fluiditas (cm)	Keterangan
720	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,015 % Sr	30,4	15,5 %	Peningkatan
	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,030 % Sr	36		
	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,045 % Sr	25,45		
700	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,015 % Sr	30,6	2,08 %	Peningkatan
	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,030 % Sr	31,25		
	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,045 % Sr	22,3		
680	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,015 % Sr	24,75	2,7 %	Peningkatan
	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,030 % Sr	25,45		
	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,045 % Sr	22,2		
660	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,015 % Sr	22,45	9,6 %	Peningkatan
	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,030 % Sr	24,85		
	Al-11 %Si + 0,6 %Fe + 0,045 % Sr	21,6		