



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH PENAMBAHAN MODIFIER FOSFOR  
DAN PERLAKUAN PANAS (T4 & T6) TERHADAP  
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIS PADUAN  
ALUMINIUM HIPEREUTEKTIK (Al-16%Si)**

**SKRIPSI**

**M. Edward H. I.  
0405040449**

**UNIVERSITAS INDONESIA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH PENAMBAHAN *MODIFIER* FOSFOR  
DAN PERLAKUAN PANAS (T4 & T6) TERHADAP  
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK PADUAN  
ALUMINIUM HIPEREUTEKTIK (Al-16%Si)**

**SKRIPSI**

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

**M. Edward H.I.  
0405040449**

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

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

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

**Nama : M. Edward H. I.**  
**NPM : 0405040449**

**Tanda Tangan : .....**  
**Tanggal : 2 Juli 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : M. Edward H. I.  
NPM : 0405040449  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan Modifier Fosfor dan  
Perlakuan Panas (T4 & T6) terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Paduan  
Aluminium Hipereutektik (Al-16%Si)

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof.Dr.-Ing.Ir. Bambang Suharno (.....)  
Penguji 1 : Dr. Ir. Donanta Dhaneswara (.....)  
Penguji 2 : Ir. Dwi Martha Nurjaya M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 Juli 2009

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**Prof. Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno,**

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

DAN

**Ir. Budi Wahyu Utomo M.T.**

selaku pembimbing di industri yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

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

---

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

Nama : M. Edward H.I.  
NPM : 0405040449  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**Pengaruh Penambahan Modifier Fosfor dan Perlakuan Panas (T4 & T6)  
terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Paduan Aluminium  
Hipereutektik (Al-16%Si)**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 2 Juli 2009

Yang menyatakan

(M. Edward H.I.)

## ABSTRAK

Nama : M. Edward H. I.  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Pengaruh Penambahan Modifier Fosfor dan Perlakuan Panas (T4 & T6) Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Paduan Aluminium Hipereutektik (Al-16%Si)

Piston merupakan salah satu sistem penggerak kendaraan bermotor yang terbuat dari paduan aluminium hipereutektik. Dibutuhkan material yang memiliki ekspansi termal yang rendah, karena temperatur dalam ruang pembakaran kendaraan bermotor berada sekitar 310<sup>0</sup>C bisa membuat aluminium mengalami perubahan dimensi. Hal itu sangat tidak diinginkan, maka itu diperlukan penambahan unsur silikon berlebih sehingga paduan aluminium menurun ekspansi termalnya. Tetapi jika komposisi silikon terlalu tinggi material tersebut menjadi rapuh. Maka dari itu diperlukan penambahan unsur lain, sehingga didapatkan material yang tidak hanya keras dan memiliki ekspansi termal yang rendah tetapi juga tangguh. Penambahan unsur fosfor bisa merubah morfologi silikon primer yang tadinya berbentuk poligonal menjadi lebih halus, dampaknya sifat mekanisnya akan meningkat.

Pada penelitian ini, material paduan aluminium didesain pada kondisi hipereutektik (16%). Kemudian ditambahkan fosfor sebesar 0,0032wt%, 0,00373wt%, dan 0,0057wt%. Setelah itu sampel uji dilakukan proses perlakuan panas T4 & T6. Untuk mengetahui sifat mekanis material, dilakukan pengujian kekuatan tarik, kekerasan serta keausan. Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro serta fasa – fasa yang terbentuk dalam paduan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fosfor pada material paduan aluminium hipereutektik akan mengubah morfologi dan ukuran silikon primer dari yang berbentuk poligonal dan kasar menjadi berbentuk *blocky* dan halus. Hasil karakterisasi material menunjukkan, dengan bertambahnya kadar fosfor (0,0032wt%, 0,00373wt%, dan 0,0057wt%), maka sifat mekanik paduan aluminium hipereutektik akan mengalami peningkatan. Dengan komposisi fosfor terbesar 0,0057wt% memiliki Ultimate Tensile Stress yaitu 188,6MPa untuk sampel T4 dan 208,7 MPa untuk sampel T6. Sedangkan kekerasan dengan komposisi fosfor terbesar memiliki 63,23 HRB untuk sampel T4 dan 71 HRB untuk sampel T6. Laju aus yang menggambarkan nilai ketahanan aus juga memperlihatkan kecenderungan yang sama. Pada komposisi fosfor terbesar, memiliki laju aus terendah. Kecuali pada sampel fosfor tertinggi setelah perlakuan panas T4. Hal tersebut dikarenakan adanya porositas yang berukuran besar dipermukaan sampel uji.

Kata kunci : paduan Al-Si hipereutektik, modifier P, Treatment (T4 & T6)

## ABSTRACT

Name : M. Edward H.I.  
Study Program : Metallurgy and Material Engineering  
Title : Effect of Phosphorus Modifier and Treatment Process (T4 & T6) on Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic Aluminium Alloy (Al-16%Si)

Piston part in motorcycle is a component from burner machine which has made from aluminium hypereutectic alloy. So there is a lot of need material that has low in expansion thermal properties, because the temprature inside the machine is about 310<sup>0</sup>C, it is possible that aluminium will change in its dimension. Of course it must be avoided, so the aluminium needs to be alloying, using silicon (Si) in high concentrate to reduce thermal expansion. But when the amount of silicon that dissolved is much, the properties of aluminium alloy will be brittle and easily get fracture. Because of that the aluminium alloy need to be add by another element, to make a material that not only has low expansion thermal and good hardness, but also has good toughness so the piston can not easily fracture. To improve the mechanical properties is by adding modifier, phosphorus is one of example.

In this research, aluminium alloy was designed in hypereutectic condition (16wt% Silicon). Phosphorus modifier was added to the melt with composition 0,0032wt%, 0,00373wt%, 0,0057wt%. After that, the experiment sample will go through heat treatment (T4 & T6) process. To know the mechanical properties, experiment sample were tested with tensile strength, hardness and wear machine. Microstructure testing were conducted to observe microstructure changing and phases formed in alloy.

Result of this research shows that in increasing phosphorus (0,0032wt%, 0,00373wt%, dan 0,0057wt%) in hipereutectic aluminium alloys changes the morphology and size of primary silicon from coarse polygonal to fine blocky structure. The result of characterization material shows that increasing phosphor increase the mechanical properties of hypereutectic aluminium alloys. With the biggest composition phosphorus (0,0057wt%) have Ultimate Tensile Stress 188,6 MPa for T4 sample and 208,7 MPa for T6 sample. Hardness of the biggest composition phosphorus (0,0057wt%) have 63,23 HRB for T4 sample and 71 HRB for T6 sample. *The Wear Rate* that tells wear resistance of aluminium alloys hypereutectic also shows the same trend. With the biggest composition phosphorus (0,0057wt%) for T6 process, have the smallest *Wear Rate*. Except with the biggest composition phosphorus (0,0057wt%) for T4 process. It is because there is a lot of big porous in the surface of experiment sample.

Keywords : Al-Si hypereutectic alloy, Phosphorus modifier, Aluminium treatment (T4 & T6)

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI</b> .....	ii
<b>PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	iv
<b>LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian .....	2
1.3.1 Material .....	2
1.3.2 Variabel Penelitian .....	2
1.3.3 Jenis Pengujian .....	3
1.3.4 Tempat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
2.1 Paduan aluminium hipereutektik ( Al-16%Si).....	4
2.1.1 Aluminium Sebagai Penyusun Paduan Hipereutektik (Al-16%Si)..	6
2.1.2 Paduan AC8A [Japan International Standard (JIS)].....	6
2.1.3 Pengaruh Unsur Paduan pada Paduan AC8A.....	10
2.1.4 Fasa-Fasa yang Terdapat pada Paduan AC8A.....	12
2.1.5 Prinsip pembekuan aluminium.....	12

2.2 Paduannya Aluminium Silikon.....	15
2.2.1 Pengaruh Struktur Mikro terhadap Sifat Mekanis Paduan Al-Si	16
2.2.1.1 Fasa Intermetalik.....	16
2.2.2.1 Penghalusan Fasa Primer.....	16
2.3 Modifikasi Paduan Aluminium Silikon.....	17
2.3.1 Prinsip Penambahan Modifier.....	18
2.3.2 Pengaruh Modifikasi Terhadap Karakteristik Paduan Al-Si...	19
2.3.2.1 Pengaruh Modifikasi terhadap Temperatur Eutektik dan Komposisi.....	19
2.3.2.2 Pengaruh Modifikasi terhadap Porositas.....	20
2.4 Modifier fosfor	20
2.4.1 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Karakteristik Paduan Al-Si Eutektik.....	21
2.4.2 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Karakteristik Paduan Al-Si Hipereutektik.....	24
2.4.3 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Struktur Mikro.....	27
2.4.4 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Kekuatan Tarik.....	30
2.4.5 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Kekerasan dan Keausan....	31
2.5 Perlakuan Panas Pada Paduan Aluminium Silikon.....	31
2.5.1 Solution Heat Treating.....	32
2.5.2 Quenching.....	33
2.5.3 Precipitation Heat Treating (Age Hardening).....	33
2.5.4 Mekanisme penguatan precipitation heat treatment.....	34
2.5.5 Mekanisme Penguatan.....	36
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>39</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	39
3.2 Peralatan dan Bahan .....	41
3.3 Prosedur Penelitian .....	42

3.3.1.Persiapan Penelitian .....	41
3.3.1.1. Perhitungan Material Balance .....	41
3.3.1.2. Persiapan Alat dan Bahan .....	43
3.4 Proses Peleburan .....	44
3.5 Pengecekan Komposisi.....	44
3.6 Penambahan Fosfor .....	45
3.7 Proses Penuangan Kedalam Cetakan.....	46
3.8 Proses Perlakuan Panas (T4 & T6).....	47
3.9 Persiapan Sampel .....	49
3.9.1 Preparasi Sample Uji Tarik.....	49
3.9.2 Preparasi Sampel Uji Kekerasan dan Keausan .....	49
3.9.3 Preparasi Sampel Uji Struktur Mikro.....	50
3.10 Pengujian .....	53
3.10.1 Pengujian Tarik .....	53
3.10.2 Pengujian Kekerasan .....	54
3.10.3 Pengujian Keausan .....	54
3.10.4 Pengujian Struktur Mikro dengan Mikroskop Optik .....	56
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>57</b>
<b>BAB V KESIMPULAN .....</b>	<b>71</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>73</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>76</b>

## DAFTAR GAMBAR

		<b>Halaman</b>
<b>Gambar 2.1</b>	Diagram fasa yang memperlihatkan kelarutan unsur Magnesium dalam Aluminium.....	11
<b>Gambar 2.2</b>	<i>Ternary diagram</i> hubungan antara silikon dan magnesium pada paduan aluminium seri 3 (Al-Si-Cu/Mg). a)proyeksi solidus; b)proyeksi solvus.....	11
<b>Gambar 2.3</b>	Struktur <i>Lamellar Eutektik</i> .....	12
<b>Gambar 2.4</b>	Diagram Fasa Al-Si dan Struktur Mikro yang terdapat di dalamnya.....	12
<b>Gambar 2.5</b>	Grafik pembekuan aluminium - silikon <i>hipereutektik</i> ..	13
<b>Gambar 2.6</b>	Struktur dendrit yang sedang tumbuh.....	14
<b>Gambar 2.7</b>	Diagram Fasa Al-Si.....	15
<b>Gambar 2.8</b>	(a) Analisis termal paduan eutektik normal dan termodifikasi selama pemanasan dan pendinginan; (b) Pergeseran liquidus silikon dan penurunan temperatur eutektik pada penambahan natrium.....	19
<b>Gambar 2.9</b>	Perbandingan Jumlah Inti yang Terbentuk antara paduan aluminium yang termodifikasi dan tidak termodifikasi.....	22
<b>Gambar 2.10</b>	Interaksi Antara Fosfor dengan Sodium dan Stronsium terhadap Morfologi <i>Silikon Eutektik</i> pada Paduan Al-7%Si (A356).....	23
<b>Gambar 2.11</b>	Skema kondisi dalam keadaan cair dari diagram Al-Na-P-Si.....	26

<b>Gambar 2.12</b>	Morfologi silikon primer pada paduan A390 (a) Unmodified; (b) Modifikasi dengan 0,1% P.....	27
<b>Gambar 2.13</b>	(a)Morfologi silikon primer pada paduan Al-Si hipereutektik (a) Modifikasi dengan 0,1% P; (b).....	28
<b>Gambar 2.14</b>	Grafik keseluruhan proses treatment aluminium.....	31
<b>Gambar 2.15</b>	Grafik tempratur proses <i>Solution Heat Treating</i> .....	32
<b>Gambar 2.16</b>	Diagram fasa sistem A-B dimana pada tempratur tinggi berada dalam kondisi satu fasa sedangkan pada tempratur rendah akan terbentuk dua fasa.....	34
<b>Gambar 2.17</b>	Mekanisme presipitasi <i>supersaturated solid solution</i> .	35
<b>Gambar 2.18</b>	Mekanisme presipitat $\theta$ pada matriks $\alpha$ (a ke b) dan proses pembentukan presipitat kasar (c ke f)	36
<b>Gambar 2.19</b>	Mekanisme pemotongan presipitat.....	37
<b>Gambar 2.20</b>	Skema proses <i>dislocation bypass (orowan looping)</i>	37
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian.....	39
<b>Gambar 3.2</b>	a) cetakan uji tarik setelah coating b) cetakan sampel spektro.....	47
<b>Gambar 3.3</b>	a) hasil cor sampel uji tarik dan spektro; b) proses penuangan ke cetakan uji tarik komposisi setelah.....	47
<b>Gambar 3.4</b>	Grafik proses treatment (T4 & T6).....	48
<b>Gambar 3.5</b>	a) proses cutting sampel uji tarik; b) hasil sampel uji tarik.....	49
<b>Gambar 3.6</b>	Penampang sampel uji tarik yang diambil untuk sampel keras dan aus.....	49
<b>Gambar 3.7</b>	Penampang sampel uji tarik yang diambil untuk sampel mikrostruktur <i>Mounting</i> .....	50
<b>Gambar 3.8</b>	(a)Mounting press machine b) hasil mounting sampel mikro.....	50
<b>Gambar 3.9</b>	(a) Mesin <i>Grinding &amp; Polishing</i> ; (b) Proses pengamplasan.....	51
<b>Gambar 3.10</b>	Proses pemolesan.....	52

<b>Gambar 3.11</b>	(a) Mesin uji tarik Shimadzu; (b) Peletakan sample pada mesin uji tarik; (c) Standar ASTM sample pengujian tarik.....	53
<b>Gambar 3.12</b>	(a) Hardness Rockwell Tester; (b) Penjejukan sample	54
<b>Gambar 3.13</b>	Skema pengujian keausan metode Ogoshi.....	55
<b>Gambar 3.14</b>	(a) Mesin Pengujian Keausan Ogoshi; (b) Sampel yang telah diuji aus.....	56
<b>Gambar 3.15</b>	Pengamatan pada mikroskop optik digital Keyence....	56
<b>Gambar 4.1</b>	Perbandingan mikrostruktur paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan fosfor; a) as-cast, perbesaran 450X; b) T4, perbesaran 200X; c) T6, perbesaran 200X.....	60
<b>Gambar 4.2</b>	Grafik kekuatan tarik paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan fosfor pada perlakuan yang berbeda tuang.....	63
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik kekerasan paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan fosfor pada perlakuan panas yang berbeda.....	65
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik laju keausan paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan fosfor pada perlakuan panas yang berbeda.....	67

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Sifat aluminium yang penting pada berbagai macam aplikasi.....	4
<b>Tabel 2.2</b>	Sifat fisik yang dimiliki oleh aluminium murni (99.5% Al).....	5
<b>Tabel 2.3</b>	Klasifikasi Aluminium Paduan sesuai Standar AA.....	6
<b>Tabel 3.1</b>	Perhitungan <i>Material Balance</i> Penambahan Fosfor H5202	43
<b>Tabel 3.2</b>	Hasil uji spektro setelah proses GBF.....	45
<b>Tabel 3.3</b>	Perhitungan <i>Material Balance</i> Penambahan Fosfor .....	41
<b>Tabel 4.1</b>	Hasil pengujian komposisi kimia.....	57
<b>Tabel 4.2</b>	Tabel data uji tarik paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan modifier P dan treatment (T4 & T6).	63
<b>Tabel 4.3</b>	Tabel data nilai kekerasan paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan modifier P dan treatment (T4 & T6).....	63
<b>Tabel 4.4</b>	Tabel data laju aus paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan modifier P dan proses perlakuan panas yang berbeda.....	68

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran A</b>	Hasil Uji Komposisi Kimia .....	76
<b>Lampiran B</b>	Hasil Uji kekerasan dan Uji Keausan .....	81
<b>Lampiran C</b>	Hasil Pengujian Kekuatan Tarik .....	84



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 LATAR BELAKANG**

Hampir semua kendaraan bermotor menggunakan piston sebagai salah satu sistem penggerak dalam mesin. Suhu rata-rata didalam ruang pembakaran saat beroperasi berada sekitar temperatur  $320^{\circ}\text{C}$ , sementara suhu lubricant sekitar  $75^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>. Aluminium sebagai unsur utama dalam piston cenderung mengalami pemuaian lebih besar dibandingkan baja pada suhu tersebut. Jadi dibutuhkan material yang memiliki termal ekspansi yang rendah sehingga ukuran piston sesuai dengan cylinder head pada temperatur operasi dan tidak akan kehilangan dimensi saat suhu dingin. Dengan menambahkan paduan silikon akan memperkecil ekspansi termal selama kondisi operasi. Selain itu silikon juga berguna sebagai insulator, sehingga panas yang diserap oleh piston akan berkurang. Tetapi kekurangannya adalah semakin banyak konsentrasi silikon akan menyebabkan piston menjadi sangat brittle sehingga bisa menyebabkan terjadinya crack saat menyalakan mesin pertama kali.

Oleh karena itu dibutuhkan penambahan unsur lain yang dapat meningkatkan performa piston saat operasi, tidak hanya memiliki ketahanan aus yang tinggi dalam arti memiliki kekerasan yang baik atau ekspansi termal yang rendah namun harus juga tangguh selama piston beroperasi dalam temperatur tinggi dalam pengertian piston tidak menjadi brittle sehingga mudah mengalami cracking. Penambahan modifier adalah cara yang dapat digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik piston itu sendiri dengan cara mengubah mikrostruktur.

Pada penelitian ini akan digunakan material AC8A ( $\text{AlSi}_{12}\text{CuNiMg}$ ), yaitu paduan aluminium silikon yang dikembangkan oleh PT. X. Dan kadar silikon yang digunakan adalah silikon hipereutektik dengan kadar silikon mendekati 16%. Diharapkan dengan penambahan kadar fosfor sebagai modifier yaitu sebesar 0.003%, 0.004%, 0.005%, dan 0.006% akan memberikan dampak perubahan sifat mekanik diantaranya kekuatan tarik, kekerasan, dan ketahanan aus.

Jika ternyata dengan memberikan penambahan modifier fosfor kepada material AC8A memberikan sifat mekanik yang baik terhadap piston maka PT. X akan mengembangkan pembuatan piston menggunakan material AC8A yang tentu saja dampaknya akan memberikan keuntungan perusahaan dari segi financial, sebab material ini tentu saja secara ekonomi lebih murah dari material AC8H yang biasa digunakan dalam pembuatan piston dan materialnya didatangkan dari negara lain (impor).

## **I.2 Tujuan Penelitian**

1. Mengetahui pengaruh penambahan unsur fosfor terhadap struktur mikro paduan aluminium silikon hipereutektik.
2. Membandingkan dan mengetahui pengaruh struktur mikro terhadap sifat mekanik yaitu kekerasan, kekuatan tarik, dan ketahanan aus paduan aluminium silikon hipereutektik yang telah mengalami perlakuan panas (T4 dan T6).

## **I.3 Ruang lingkup penelitian**

### **I.3.1 Material**

Material yang digunakan sebagai ingot adalah material AC8A (Al, Si, Cu, Mg). Proses pembuatan sampel dengan cara gravity casting dengan cara meleburkan ingot kemudian ditambahkan silikon murni sehingga didapatkan konsentrasi silikon hipereutektik.

### **I.3.2 Variabel Penelitian**

- 1 Variabel penelitian yang digunakan adalah konsentrasi modifier fosfor (0.003%, 0.004%, 0.005%, dan 0.006%).
- 2 Perlakuan panas :
  - T4 : solution treatment – quenching – natural aging
  - T6 : solution treatment – quenching – artificial aging

### I.3.3 Pengujian

Pengujian-pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi:

1. Pengujian komposisi kimia terhadap masing-masing variabel sampel.
2. Pengamatan struktur mikro terhadap masing-masing variabel sampel.
3. Pengujian kekuatan tarik terhadap masing-masing variabel sampel.
4. Pengujian kekerasan terhadap masing-masing variabel sampel.
5. Pengujian ketahanan aus terhadap masing-masing variabel sampel.

### I.3.4 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di 3 tempat yang berbeda yaitu :

1. PT. X kawasan industri Cikarang, dimana dilakukan :
  - Proses pengecoran
  - Pembuatan dan preparasi sampel uji tarik dan kekerasan
  - Pengujian komposisi kimia
2. PT.X wilayah Jakarta Utara, dimana dilakukan :
  - Pengujian kekerasan dan pengujian kekuatan tarik
  - Pengamatan mikroskop optik
3. Departemen Metalurgi dan Material FTUI Depok, dimana dilakukan :
  - Pengujian keausan

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1. PADUAN ALUMINIUM HIPEREUTEKTIK ( Al-16%Si)

#### 2.1.1. Aluminium Sebagai Penyusun Paduan Aluminium Hipereutektik (Al-16%Si)

Aluminium memiliki karakteristik yang unik, beberapa sifat dan aplikasi aluminium diantaranya :

- Relatif lebih ringan, memiliki sepertiga density baja
- Kebanyakan tahan terhadap perubahan cuaca, banyak digunakan dalam industri makanan
- Daya pantul terhadap cahaya sangat baik, sehingga banyak digunakan pada aplikasi arsitektur baik untuk interior maupu eksterior
- Paduan aluminium bisa memiliki kekuatan (strength) yang sama atau melebihi pada baja struktural biasa
- Memiliki sifat elastis yang baik saat digunakan pada aplikasi struktural yang rentan terhadap beban kejut (shock-loading). Ketangguhannya tidak jauh berkurang pada temperatur rendah (terutama terhadap beban impak; karena aluminium tidak memiliki tempratur transisi) jika dibandingkan baja
- Lebih mudah dibentuk saat proses cold work
- Memiliki sifat elektrik dan panas sebaik tembaga<sup>[2]</sup>.

Tabel 2.1 Sifat aluminium yang penting pada berbagai macam aplikasi<sup>[2]</sup>.

Aplikasi	Properties					Jenis semi-product		
	Ringan	Konduktivitas panas dan elektrik	Ketahanan korosi	Aspek estetika	Casting/ forging	lembaran	Kabel, kawat	Aluminium foil
Transportasi	●		○	○	○	○		
Arsitektur	○		○	●		○		

lanjutan

Aplikasi	Properties					Jenis semi-product		
	Ringan	Konduktivitas panas dan elektrik	Ketahanan korosi	Aspek estetika	Casting/forging	lembaran	Kabel, kawat	Aluminium foil
Pengemasan	+	+	●	●		○		○
Industri elektrik	+	●	○				○	○
Peralatan rumah tangga	○	●	●	○		○		○
Peralatan, mesin	●	○	○	○	○	○		
Kimiawi & industri makan	○	○	●	○	+	○		

Keterangan : + diinginkan, ○ penting, ● sangat penting

Tabel 2.2 Sifat fisik yang dimiliki oleh aluminium murni (99.5% Al)<sup>[2]</sup>.

Keterangan	Nilai	Satuan
Berat atom	26.98	
Nomor atom	13	
Jarak antar atom	$4.0496 \cdot 10^{-8}$	cm
Density pada 20 °C	2.71	gr/cm <sup>3</sup>
Konduktivitas termal	2.1-2.3	W/cm K
Koefisien ekspansi termal	23.5	1/K .10 <sup>6</sup>
peningkatan volum dari	6.5	%
Tempratur lebur	658 (931)	°C (K)
Tempratur didih	2270 (2543)	°C (K)
Konduktivitas elektrik	34-36	m/Ohm. mm <sup>2</sup>
Resistivity (20 °C)	$2.65 \cdot 10^{-6}$	Ohm.cm
Modulus of elasticity (E)	$7.4 \cdot 10^4$	N/mm <sup>2</sup>
Shear Modulus (G)	$2.7 \cdot 10^4$	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.34	

### 2.1.2. Paduan AC8A [Japan International Standard (JIS)]

Material AC8A merupakan material paduan aluminium dengan komposisi utama Al,Si,Cu,Mg dan Ni. Penamaan AC8A merupakan sistem penamaan menggunakan standar JIS yang dipakai oleh negara Jepang. Material ini sepadan dengan aluminium AA 336.0 menurut standar AA (Aluminium Alloys).

Tabel 2.3 Klasifikasi Aluminium Paduan sesuai Standar AA<sup>[3]</sup>.

Komposisi Kimia %									
Kelas	Simbol	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti
Kelas 1A	AC 1A	4.0-5.0	1.2 max	0.3 max	0.3 max	0.5 max	0.3 max	-	0.25 max
Kelas 2A	AC 2A	3.5-4.5	4.0-5.0	0.2 max	0.5 max	0.8 max	0.5 max	-	0.2 max
Kelas 2B	AC 2B	2.0-4.0	5.0-7.0	0.5 max	1.0 max	1.0 max	0.5 max	0.3 max	0.2 max
Kelas 3A	AC 3A	0.2 max	10.0-13.0	0.1 max	0.3 max	0.8 max	0.3 max	-	-
Kelas 4A	AC 4A	0.2 max	8.0-10.0	0.4-0.8	0.2 max	0.5 max	0.3-0.8	-	0.2 max
Kelas 4B	AC 4B	2.0-4.0	7.0-10.0	0.5 max	1.0 max	1.0 max	0.5 max	0.3 max	0.2 max
Kelas 4C	AC 4C	0.2 max	6.5-7.5	0.2-0.4	0.3 max	0.5 max	0.5 max	-	0.2 max
Kelas 4D	AC 4D	1.0-1.5	4.5-5.5	0.4-0.6	0.3 max		0.5 max	-	0.2 max
Kelas 5A	AC 5A	3.5-4.5	0.6 max	1.2-1.8	0.1 max	0.8 max	0.5 max	1.2-2.3	0.2 max
Kelas 7A	AC 7A	0.1 max	0.3 max	3.5-5.5	0.1 max	0.4 max	0.6 max	-	0.2 max
Kelas 7B	AC 7B	0.1 max	0.3 max	9.5-11.0	0.1 max	0.4 max	0.1 max	-	0.2 max
Kelas 8A	AC 8A	0.8-1.3	11.0-13.0	0.7-1.3	0.1 max	0.8 max	0.1 max	1.0-2.5	0.2 max
Kelas 8B	AC 8B	2.0-4.0	8.5-10.5	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	0.5-1.5	0.2 max
Kelas 8C	AC 8C	2.0-4.0	8.5-10.5	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	-	0.2 max

### 2.1.3. Pengaruh Unsur Paduan pada Paduan AC8A

#### 1. Silikon (Si)

Silikon merupakan unsur paduan utama pada aluminium yang berfungsi untuk meningkatkan sifat mampu alir serta menurunkan pembentukan *shrinkage*. Penambahan silikon, terutama pada kadar 5 – 13% akan meningkatkan *castability* (fluiditas dan ketahanan *hot tear* = retak panas). Silikon ini juga memiliki berat jenis yang lebih rendah daripada aluminium sehingga tidak memberikan kontribusi penambahan berat produk. Penambahan silikon pada kadar >12% dapat menurunkan ekspansi termal serta meningkatkan ketahanan aus akibat terbentuknya kristal “*primary Si*” yang keras sehingga cocok untuk aplikasi temperatur tinggi seperti piston. Silikon dengan magnesium akan membentuk

Mg<sub>2</sub>Si, dengan besi dan unsur lainnya akan membentuk fasa kompleks yang tidak terlarut<sup>[4],[5]</sup>.

## 2. Tembaga (Cu)

Tembaga dalam aluminium akan membentuk CuAl<sub>2</sub> yang akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan dalam kondisi *as-cast* atau *heat treatment*. Paduan yang mengandung 4 – 5,5% Cu memberikan respon yang paling baik terhadap *thermal treatment* dan menunjukkan peningkatan *casting properties*.

Tembaga akan mengurangi ketahanan *hot tear* dan meningkatkan potensial terjadinya *interdendritic shrinkage*. Tembaga juga akan menurunkan fluiditas dan ketangguhan<sup>[4],[5]</sup>.

## 3. Magnesium (Mg)

Magnesium memiliki kelarutan 17,4 % pada 450<sup>0</sup>C. Penambahan magnesium akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada paduan aluminium tanpa terlalu menurunkan keuletan dan biasanya digunakan dalam paduan kompleks aluminium silikon dengan tembaga, nikel dan unsur lainnya.

Pengaruh penting dari penambahan unsur ini di dalam paduan Al-Si yaitu bersama dengan Si membentuk persenyawaan Mg<sub>2</sub>Si. Dengan adanya persenyawaan Mg<sub>2</sub>Si di dalam paduan Al-Si, maka sifat mekanis dapat ditingkatkan. Dalam pemaduan di pengecoran pada umumnya memiliki rentang dari 4 sampai 10%<sup>[4],[5]</sup>.

## 4. Seng (Zn)

Seng tidak memberikan manfaat yang signifikan dalam pengecoran aluminium. Tetapi, bila dipadu dengan tembaga (Cu) dan /atau magnesium (Mg) akan menghasilkan paduan *heat treatable* karena membentuk presipitat MgZn<sub>2</sub> yang akan meningkatkan sifat kekerasan dan kekuatan. Meningkatkan penambahan seng dan magnesium akan menurunkan ketahanan korosi aluminium<sup>[4],[5]</sup>.

## 5. Besi (Fe)

Penambahan besi ke dalam paduan aluminium dapat meningkatkan ketahanan terhadap *hot tear* dan menurunkan kecenderungan terjadinya efek penyambungan (*soldering*) dengan cetakan pada die casting. Kelarutan besi dalam *solid state* sangat rendah (0,005%), oleh karena itu, hampir semua besi dalam

aluminium hadir sebagai fasa kedua intermetalik dalam kombinasi dengan aluminium atau unsur lainnya, yang paling sering dijumpai adalah  $\text{FeAl}_2$ ,  $\text{FeMnAl}_6$ , dan  $\alpha\text{AlFeSi}$ . Keberadaan fasa intermetalik ini akan meningkatkan kekuatan paduan terutama pada temperatur tinggi, tetapi juga menyebabkan *embrittlement* dari mikrostruktur serta mengurangi *flowability*. Besi dengan mangan, kromium, dan elemen lainnya akan mendorong pembentukan fasa lumpur (*sludging phase*)<sup>[4],[5]</sup>.

#### 6. Mangan (Mn)

Mangan merupakan unsur pengotor yang umum dalam aluminium primer dengan konsentrasi normalnya berada pada range 5 sampai 50 ppm. Mangan menurunkan *resistivity*. Mangan akan meningkatkan kekuatan baik dalam *solid solution* maupun sebagai endapan fasa intermetalik yang halus. Jumlah fraksi volume  $\text{MnAl}_6$  yang tinggi pada paduan aluminium yang mengandung lebih dari 0,5% Mn memberikan pengaruh baik kepada kualitas internal produk cor<sup>[4],[5]</sup>.

#### 7. Nikel

Kelarutan nikel dalam aluminium tidak melebihi 0,04%. Diatas jumlah tersebut, nikel akan membentuk fasa intermetalik. Fasa intermetalik ini biasanya berkombinasi dengan unsur besi menghasilkan  $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ . Pada aluminium murni, kadar nikel hingga 2% dapat meningkatkan kekuatan tetapi akan menurunkan keuletan. Nikel biasa ditambahkan pada paduan aluminium – silikon untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada aplikasi temperatur tinggi dan untuk mengurangi koefisien ekspansi<sup>[4],[5]</sup>.

#### 8. Kromium (Cr)

Kromium biasanya ditambahkan pada paduan Al-Mg, Al-Mg-Si, dan Al-Mg-Zn. Penambahan maksimum kromium adalah 0,35%, jika melebihi batas tersebut, maka akan membentuk konstituent yang kasar dengan pengotor atau unsur penambah lainnya seperti mangan, besi dan titanium. Kromium mempunyai laju difusi yang lambat dan membentuk fasa terdispersi yang halus pada produk tempa. Kromium digunakan untuk mengontrol struktur butir, untuk mencegah pertumbuhan butir pada paduan Al-Mg dan mencegah kristalisasi pada paduan Al-Mg-Si atau paduan Al-Zn selama *hot working* atau *heat treatment*<sup>[4],[5]</sup>.

### 2.1.3.1. Pengaruh Unsur Minor pada Paduan Aluminium

#### 1. Titanium (Ti)

Titanium digunakan terutama sebagai penghalus butir pada aluminium *casting* atau ingot. Pengaruh titanium menurun seiring dengan waktu *holding* dalam keadaan cair dan dengan *repeated remelting*. Pengaruh penghalusan butir semakin besar jika terdapat boron di dalam cairan atau jika ditambahkan sebagai master alloy dipadu dengan boron sebagai  $TiB_2$ <sup>[4],[5]</sup>.

#### 2. Boron (B)

Boron digunakan dalam aluminium dan paduannya sebagai penghalus butir dan untuk meningkatkan konduktivitas dengan pengendapan vanadium, titanium, kromium dan molibdenum. Boron dapat digunakan sendiri sebagai penghalus butir (0,005 – 0,1%) selama pembekuan, tetapi akan semakin efektif jika digunakan bersama dengan titanium<sup>[4],[5]</sup>.

#### 3. Berilium (Be)

Penambahan *part per million* berilium dapat mengurangi oksidasi dan inklusi dalam komposisi yang mengandung magnesium. Pada konsentrasi yang lebih tinggi (>0,004%), berilium mempengaruhi pembentukan dan komposisi intermetalik besi, dimana akan meningkatkan kekuatan dan keuletan. Selain mengubah bentuk *insoluble phase* dari *plate* menjadi *nodular*, berilium juga mengubah komposisinya serta *reject* magnesium dari Al-Fe-Si kompleks. Hal ini menjadikan berilium dapat digunakan untuk aplikasi pengerasan (*hardening*)<sup>[4],[5]</sup>.

#### 4. Bismuth (Bi)

Bismuth digunakan untuk meningkatkan *machinability* dari paduan aluminium tuang pada konsentrasi tidak lebih dari 0,1%<sup>[4],[5]</sup>.

#### 5. Cadmium (Cd)

Penambahan cadmium melebihi 0,1% menyebabkan *hot shortness* pada beberapa paduan. Karena cadmium mempunyai adsorpsi neutron yang tinggi, cadmium harus dijaga pada kadar yang sangat rendah untuk penggunaan atomik energi. Sedikitnya 0,1% cadmium akan meningkatkan *machinability*<sup>[4],[5]</sup>.

#### 6. Kalsium (Ca)

Penambahan unsur kalsium dalam paduan aluminium – silikon akan meningkatkan kekuatan dan menurunkan elongasi. Kalsium mempunyai kelarutan yang rendah dalam aluminium dan membentuk intermetalik  $\text{CaAl}_4$ . Dengan silikon membentuk  $\text{CaSi}_2$  yang hampir tak larut dalam aluminium yang akan meningkatkan konduktivitas logam. Pada aluminium-magnesium-silikon, kalsium akan menurunkan *age hardening*<sup>[4],[5]</sup>.

#### 7. Karbon (C)

Karbon merupakan pengotor pada paduan aluminium, terdapat dalam bentuk oksikarbida dan karbida, biasanya dalam bentuk  $\text{Al}_4\text{C}_3$ .  $\text{Al}_4\text{C}_3$  akan terdekomposisi jika terdapat air atau uap air sehingga dapat menyebabkan *surface pitting*. *Normal metal transfer* dan *fluxing* akan mengurangi karbon sampai level ppm<sup>[4],[5]</sup>.

#### 8. Cerium (Ce)

Penambahan cerium pada paduan aluminium akan meningkatkan fluiditas dan mengurangi *die sticking*. Pada paduan yang mengandung besi (0,7%), cerium akan mengubah *acicular*  $\text{FeAl}_3$  menjadi senyawa *nonacicular*<sup>[4],[5]</sup>.

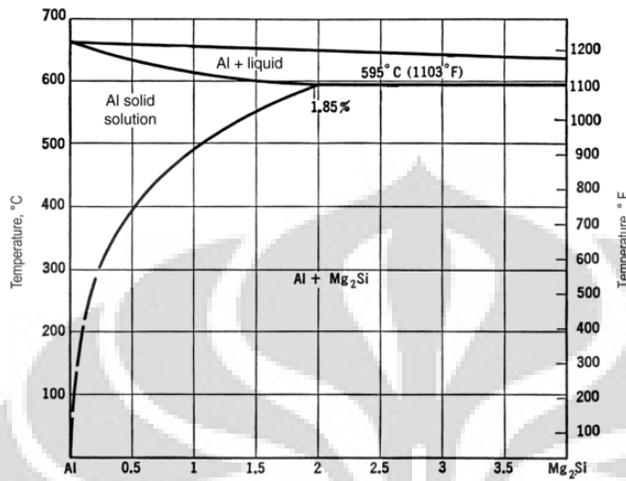
#### 9. Kobalt (Co)

Kobalt jarang ditambahkan pada paduan aluminium. Penambahan kobalt pada paduan aluminium-silikon yang mengandung besi akan mengubah *acicular*  $\beta$  (Al-Fe-Si) menjadi fasa Al-Co-Si yang lebih bulat, sehingga akan meningkatkan kekuatan dan elongasi<sup>[4],[5]</sup>.

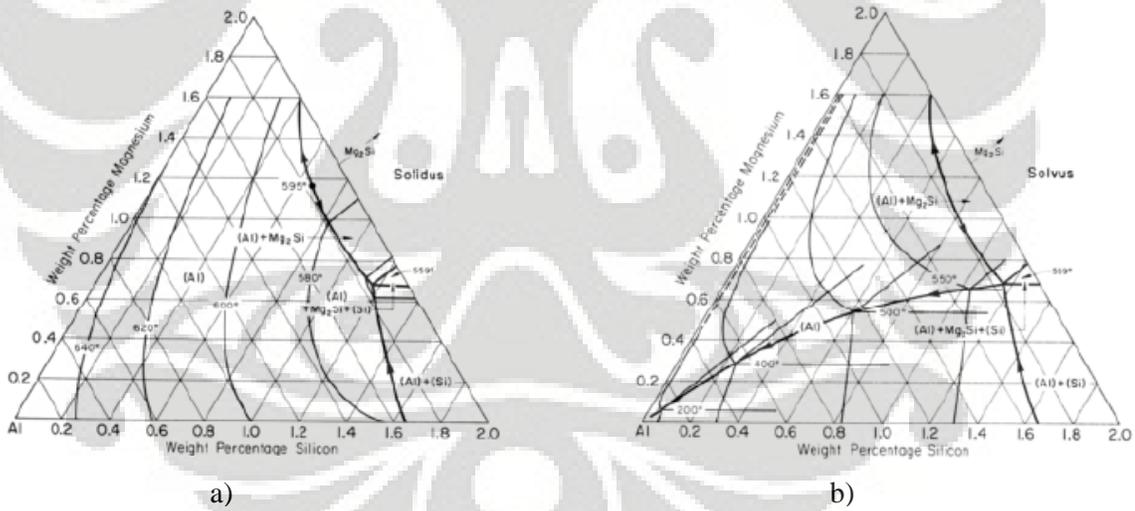
### 2.1.4. Fasa-Fasa yang Terdapat pada Paduan AC8A

Jika karakter material yang diinginkan adalah kekuatan (strength) dan kekerasan (hardness) maka penambahan magnesium akan membuat paduan aluminium bisa dilakukan proses perlakuan panas. Paduan 3 jenis unsur (Al-Mg-Si) dikuatkan melalui proses pembentukan presipitat yang metastabil seperti  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Diagram fasa pada gambar 2.1 memperlihatkan kelarutan magnesium dalam paduan aluminium (Al-Mg-Si) yang bisa menyebabkan terbentuknya presipitat  $\text{Mg}_2\text{Si}$  yang bersifat menguatkan. Dengan penambahan jumlah magnesium dalam jumlah kecil akan membuat paduan aluminium bisa dilakukan

proses penuaan (*Age Hardening*), yang nantinya bisa menghasilkan presipitat  $Mg_2Si$ .



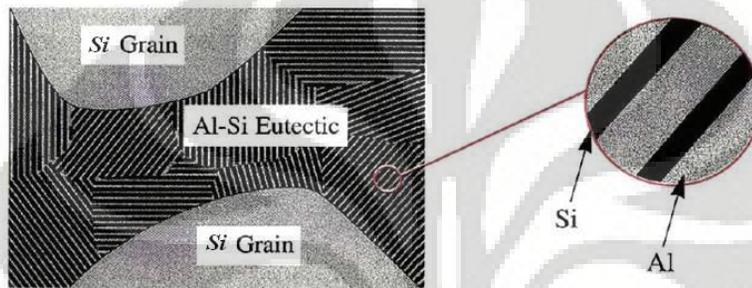
Gambar 2.1 Diagram fasa yang memperlihatkan kelarutan unsur Magnesium dalam Aluminium<sup>[6]</sup>.



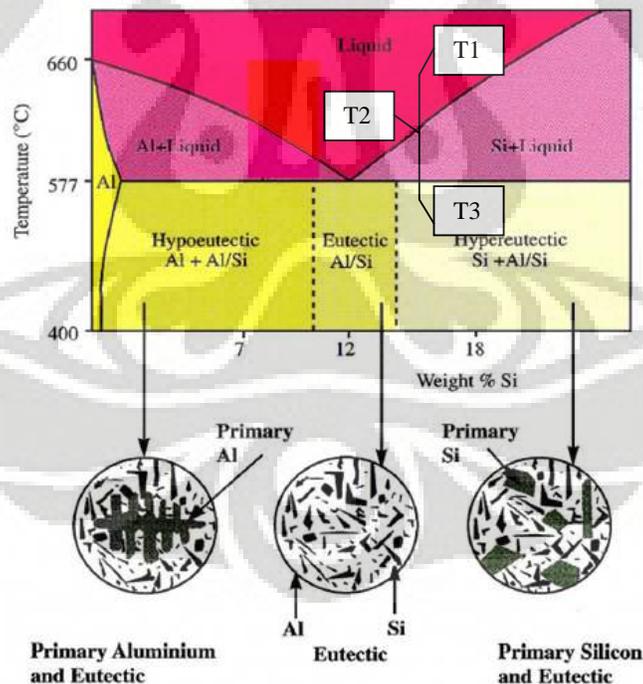
Gambar 2.2 Ternary diagram hubungan antara silikon dan magnesium pada paduan aluminium seri 3 (Al-Si-Cu/Mg). a) proyeksi solidus; b) proyeksi solvus<sup>[6]</sup>.

Pada gambar 2.2 memperlihatkan bahwa pada kadar magnesium sedikit, yang akan muncul sebagai fasa kedua hanya silikon. Tetapi jika kadar magnesium ditingkatkan, maka selain terdapat fasa silikon maka terdapat fasa  $Mg_2Si$ . Dan jika terdapat unsur mangan dalam jumlah besar maka bisa terbentuk fasa  $Al_4CuMg_5Si_4$  yang memberikan kontribusi meningkatnya kekuatan paduan<sup>[6]</sup>.

### 2.1.5. Prinsip pembekuan aluminium

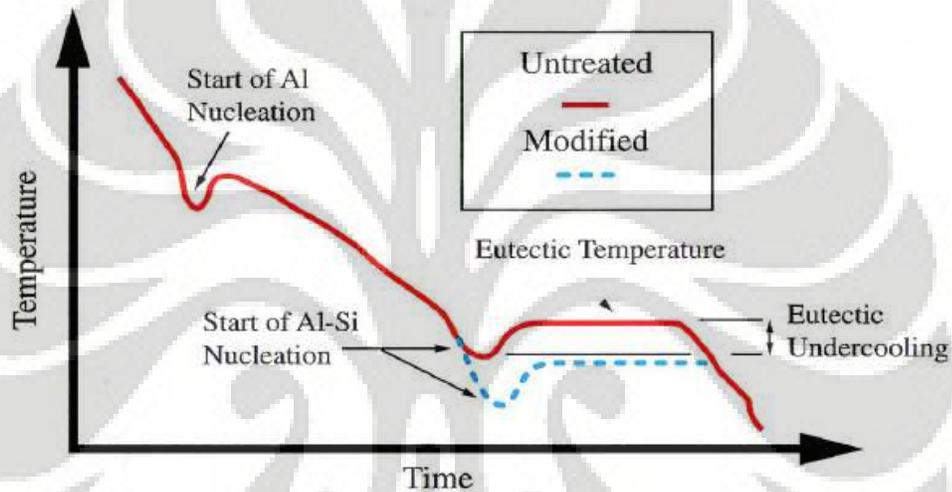


**Gambar 2.3** Struktur Lamellar Eutektik<sup>[7]</sup>.



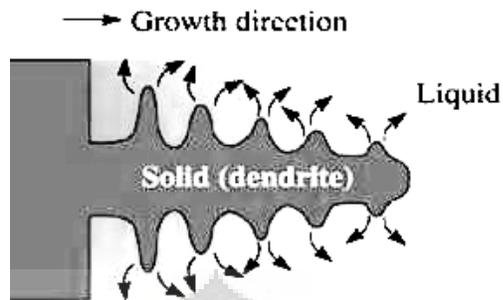
**Gambar 2.4** Diagram Fasa Al-Si dan Struktur Mikro yang terdapat di dalamnya<sup>[7]</sup>.

Gambar 2.3 merupakan gambaran fasa silikon primer dan eutektik Al-Si yang berbentuk lamelar. Pada Gambar 2.4 memperlihatkan diagram fasa Al-Si. Pada proses solidifikasi paduan aluminium hipereutektik pada gambar 2.4 dimulai pada temperatur tuang yaitu pada  $T_1$ , temperatur *liquidus* adalah  $T_2$ , dan temperatur solidus adalah  $T_3$ . Perbedaan antara temperatur tuang ( $T_1$ ) dan temperatur *liquidus* ( $T_2$ ) dinamakan *superheat*. Sedangkan daerah diantara temperatur *liquidus* dan temperatur *solidus* ( $T_3$ ) dinamakan *mushy zone* (zona lumpur).



**Gambar 2.5** Grafik pembekuan aluminium - silikon *hipereutektik*<sup>[7]</sup>.

Pembekuan dimulai ketika aluminium cair mencapai temperatur  $T_2$ , ditandai dengan terbentuknya silikon primer. Namun, awal pembekuan harus terjadi dibawah temperatur  $T_2$  untuk dapat membentuk inti awal silikon primer. Disini terlihat adanya selisih temperatur antara  $T_2$  dan temperatur pembekuan aktual dibawah  $T_2$ , selisih temperatur tersebut dinamakan *undercooling*. silikon primer yang terbentuk memiliki struktur dendritik (Gambar 2.6) dan merupakan larutan padat (*solid solution*) antara aluminium dengan silikon. Pembekuan terus berlangsung dan tidak terjadi pada satu temperatur saja, melainkan pada rentang temperatur  $T_2$  sampai mencapai temperatur  $T_3$ <sup>[7]</sup>.



**Gambar 2.6** Struktur dendrit yang sedang tumbuh<sup>[8]</sup>

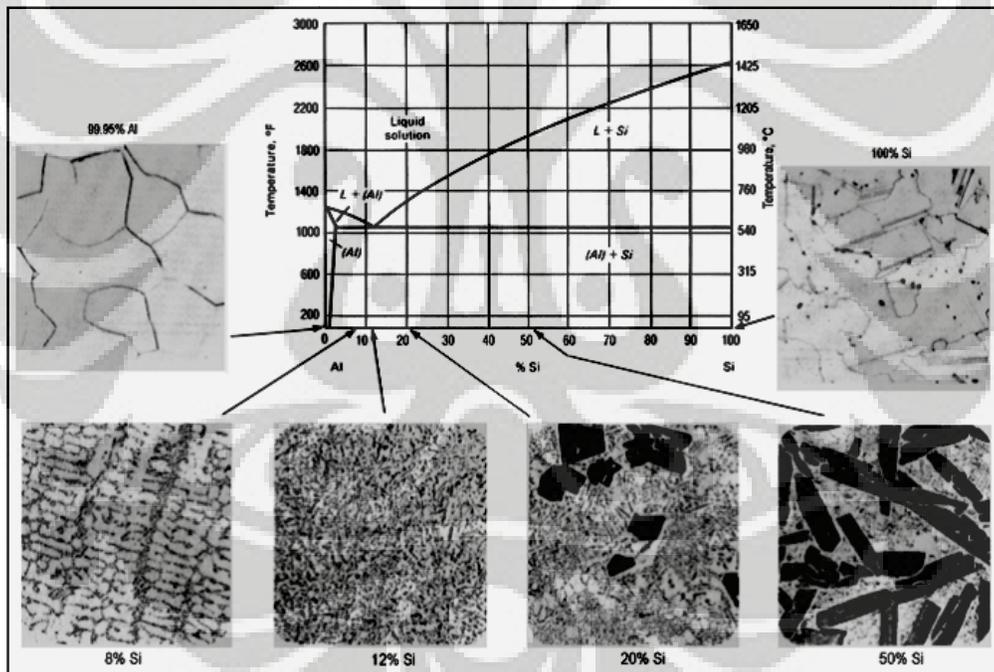
Dendrit merupakan struktur aluminium padat menyerupai pohon yang tumbuh ketika aluminium cair yang *undercooled* membeku<sup>[8]</sup>. Dalam Gambar 2.6 diperlihatkan bagaimana dendrit terus menjalar diikuti dengan pertumbuhan lengan dendrit (*dendrite arms*). Panjang lengan dendrit utama dinamakan *dendrite arm spacing* (DAS), sedangkan jarak antara dua buah lengan dendrit dari lengan utamanya dinamakan *secondary dendrite arm spacing* (SDAS)<sup>[9]</sup>. Nantinya, dendrit dapat dikenali sebagai butir-butir aluminium pada mikrostruktur akhir.

Pertumbuhan dendrit berhenti ketika aluminium cair sudah mencapai temperatur T3. Pada temperatur tersebut, semua aluminium cair yang belum membeku akan berubah menjadi fasa eutektik aluminium–silikon. Sama halnya seperti pembekuan pada T2, awal pembekuan eutektik juga harus terjadi di bawah temperatur T3 (*undercooling*) untuk membentuk inti awal. Namun, tidak seperti pembentukan silikon primer, pembentukan fasa eutektik aluminium–silikon terjadi pada temperatur yang konstan. Hasilnya berupa struktur lamelar antara silikon dan aluminium. Dibawah temperatur T3, fasa-fasa yang terjadi karena adanya penambahan unsur lain seperti Cu dan Mg biasanya mulai terbentuk tergantung komposisi paduannya.

## 2.2.PADUAN ALUMINIUM SILIKON

Aluminium dengan silikon sebagai unsur paduan utama merupakan paduan aluminium tuang yang paling penting. Hal ini dikarenakan paduan Al-Si memiliki fluiditas tinggi oleh adanya volume yang besar dari Al-Si eutektik. Kelebihan lainnya dari paduan aluminium silikon ini yaitu memiliki ketahanan korosi yang tinggi, sifat mampu las yang baik serta memiliki koefisien ekspansi termal rendah karena adanya silikon. Akan tetapi, kehadiran partikel silikon yang keras dalam mikrostrukturnya, membuat paduan aluminium silikon ini susah dalam proses permesinannya<sup>[10]</sup>.

Paduan aluminium silikon berdasarkan kadar silikon yang terkandung didalamnya terbagi menjadi hipoeutektik, eutektik dan hipereutektik. Untuk keperluan komersial, paduan aluminium hipereutektik jarang dipergunakan.



Gambar 2.7 Diagram Fasa Al-Si<sup>[11]</sup>

Paduan aluminium silikon hipoeutektik mengandung kurang dari 12% Si dan memiliki mikrostruktur yang terdiri dari dendrit aluminium dalam eutektik. Paduan aluminium silikon ini memiliki kekuatan tarik yang relatif tinggi dan keuletan yang baik. Akan tetapi, ketahanan aus untuk paduan ini relatif rendah

sehingga tidak digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan ketahanan aus tinggi.

Paduan aluminium silikon hipereutektik, mengandung silikon lebih dari 12%. Mikrostruktur paduan ini terdiri dari endapan partikel silikon primer dalam matriks eutektik. Karena adanya endapan partikel silikon, maka paduan aluminium silikon hipereutektik memiliki ketahanan aus yang sangat baik <sup>[12]</sup>. Akan tetapi kekuatan tarik dan keuletannya lebih rendah dibandingkan dengan aluminium silikon hipoeutektik. Selain itu, adanya endapan partikel silikon ini membuat masalah pada proses pemesinannya.

Sedangkan paduan Al-Si eutektik, memiliki kadar silikon sebesar 12-12.7%. Eutektik terbentuk antara larutan padat aluminium yang mengandung sedikit silikon dan silikon murni sebagai fasa kedua. Komposisi eutektik telah menjadi perdebatan sejak lama, akan tetapi sekarang secara umum telah disepakati sebesar 12.7% Si<sup>[10]</sup>. Pembekuan yang lambat dari paduan Al-Si menghasilkan mikrostruktur yang sangat kasar dimana eutektik terdiri dari *large plates* atau jarum-jarum silikon dalam matriks aluminium yang kontinyu.

### **2.2.1 Pengaruh Struktur Mikro terhadap Sifat Mekanis Paduan Al-Si**

Struktur mikro dari paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi, kecepatan pembekuan serta perlakuan panas. Komponen dari struktur mikro yang mempengaruhi sifat mekanis aluminium tuang adalah<sup>[5]</sup> :

- Ukuran, bentuk dan distribusi fasa intermetalik
- Dendrit arm spacing
- Ukuran dan bentuk butir
- Modifikasi eutektik dan penghalusan fasa primer

#### **2.2.1.1 Fasa Intermetalik**

Fasa intermetalik merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro pada paduan aluminium yang terbentuk akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Keberadaan fasa ini dipengaruhi oleh komposisi dan mekanisme pembekuan yang terjadi. Laju pembekuan yang rendah akan menghasilkan fasa intermetalik dan konsentrasi fasa kedua yang kasar pada batas

butir. Pembentukan fasa merupakan pengontrolan difusi sehingga semakin cepat solidifikasi dan semakin cepat pendinginan menuju temperatur ruang dari temperatur pembekuan akan menghasilkan tingkat *solid solution* yang tinggi dan dispersi partikel yang lebih halus.

Seperti tertulis pada bagian sebelumnya mengenai pengaruh paduan terhadap sifat mekanis, jenis paduan Fe dan Mn memegang peranan penting dalam meningkatkan sifat mekanis yang didasarkan pada struktur mikro. Keberadaan Fe dapat membentuk fasa  $Al_5FeSi$  yang getas, sehingga keberadaan fasa ini menurunkan keuletan. Fasa  $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$  yang berasal dari paduan Mn juga memiliki sifat yang getas dan keras seperti yang dihasilkan oleh Fe. Kedua fasa ini menyebabkan sulitnya proses *machining*. Demikian juga halnya dengan fasa terlarut  $Mg_2Si$ ,  $Al_2Cu$  dan  $Al_2CuMg$ .

#### 2.2.1.2 Penghalusan Fasa Primer

Tujuan penghalusan silikon primer pada paduan aluminium silikon hipereutektik adalah untuk menghilangkan/mengeliminasi kristal silikon primer kasar dan besar yang merugikan dalam pengecoran dan *machining*. Silikon primer merupakan bentuk *pre-eutectic* silikon dalam paduan aluminium silikon hipereutektik yang akan memberikan ketahanan aus pada paduan hipereutektik<sup>[13]</sup>. Silikon primer cenderung mempunyai bentuk morfologi yang berbeda – beda seperti kristal yang besar berbentuk seperti bintang atau dendritik, silikon kompleks yang teratur, poligonal dsb. Untuk mendapatkan ketahanan aus optimum dan *machinability* yang baik dibutuhkan partikel silikon primer yang halus dan terdistribusi merata. Penambahan fosfor dalam bentuk fosfor metalik atau fosfor yang mengandung senyawa seperti fosfor-tembaga dan fosfor pentaklorida, akan memberikan pengaruh pada distribusi dan pembentukan fasa silikon primer.

### 2.3. MODIFIKASI PADUAN ALUMINIUM SILIKON<sup>[7]</sup>

Tujuan penambahan MODIFIER pada paduan Aluminium-Silikon:

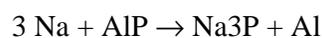
- Mengontrol bentuk silikon
- Meningkatkan sifat mekanik

- Mempermudah machinability
- Mengurangi efek hot tearing
- Mengurangi waktu pada saat proses perlakuan panas
- Mengontrol distribusi porositas
- Menekan pembentukan silikon primer
- Mengurangi efek soldering

### 2.3.1. Prinsip penambahan modifier

Modifikasi pada aluminium biasanya dilakukan dengan cara melakukan penambahan sejumlah unsur tertentu ke dalam paduan aluminium cair pada saat pengecoran. Unsur tersebut dinamakan modifier yang berfungsi mengontrol morfologi partikel silikon dan *filling and feeding characteristic* dari *casting*. Modifier yang digunakan ada berbagai jenis. Untuk paduan aluminium-silikon hipoeutektik, modifier yang digunakan misalnya seperti natrium (Na), stonsium (Sr), kalsium (Ca) dan antimoni (Sb). Sedangkan untuk paduan aluminium-silikon hipereutektik, modifier yang digunakan misalnya seperti fosfor (P).

Na ditambahkan sebagai logam dasar yang biasanya dibungkus dalam tabung kecil yang terbuat dari Al. Penambahan Na berkisar antara 80 sampai 100 ppm tergantung dari kadar fosfor yang terkandung dalam paduan dan juga jenis cetaknya. Sedangkan Sr ditambahkan dalam bentuk ingot yang terdiri dari paduan Sr atau Sr-Si-Al, sebanyak 200 – 300 ppm Sr (dari berat tuangan). Diantara Na dan Sr terdapat perbedaan karakteristik dalam pemakaiannya. Diantaranya Na memiliki sifat pemudaran yang lebih cepat dibandingkan Sr, sehingga di dalam penggunaannya Sr mempunyai efek modifikasi yang lebih lama. Perlu juga diperhatikan, penambahan Sr dan Na jangan sampai melampaui batas yang diperkenankan karena akan terjadi overmodifikasi sehingga akan menurunkan sifat – sifat mekanisnya. Disamping itu pada paduan hipereutektik, penambahan Na harus dihindari karena dapat mengurangi atau menetralkan kemampuan pengintian dari AIP, seperti reaksi berikut :



Dengan antimony (Sb) struktur mikro Al-Si akan berubah menjadi bentuk lamelar dengan keuntungan yang sama dengan modifikasi konvensional.

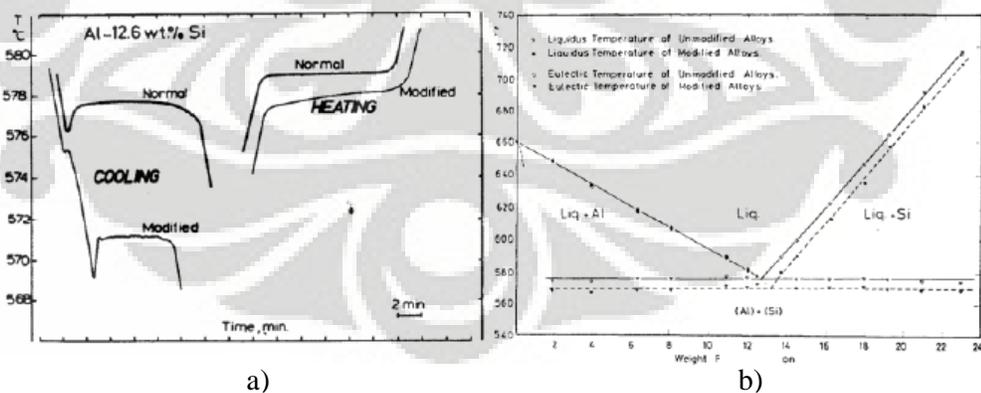
Penggunaan antimon ini pada prakteknya tidak begitu luas mengingat unsur ini termasuk unsur beracun.

Ca dan sejumlah kecil unsur lainnya juga dikenal sebagai unsur modifier paduan Al-Si, walaupun tidak seefektif dibandingkan unsur – unsur yang diuraikan diatas.

### 2.3.2. Pengaruh Modifikasi terhadap Karakteristik Paduan Al-Si

#### 2.3.2.1 Pengaruh Modifikasi terhadap Temperatur Eutektik dan Komposisi

Penambahan modifier seperti stronsium atau natrium akan mengubah temperatur eutektik dan komposisi. Temperatur eutektik akan menurun dan komposisi eutektik akan bergeser menuju ke daerah dengan kadar silikon yang lebih tinggi pada diagram fasa. Besarnya perubahan pada temperatur eutektik dan komposisi tergantung pada kondisi pembekuan yaitu laju pertumbuhan (R) dan gradien temperatur (G). Berdasarkan teori nukleasi dan pertumbuhan konvensional, penurunan temperatur eutektik disebabkan oleh penekanan nukleasi. Sedangkan beberapa ilmuwan percaya bahwa penurunan temperatur eutektik disebabkan karena perubahan pertumbuhan silikon primer. Dalam hal ini modifier berfungsi untuk menekan pertumbuhan silikon primer yang akan mengakibatkan penurunan garis liquidus silikon<sup>[14]</sup>.



**Gambar 2.8** (a) Analisis termal paduan eutektik normal dan termodifikasi selama pemanasan dan pendinginan; (b) Pergeseran liquidus silikon dan penurunan temperatur eutektik pada penambahan natrium<sup>[14]</sup>.

### 2.3.2.2 Pengaruh Modifikasi terhadap Porositas

Modifikasi selalu dihubungkan dengan perubahan porositas dari coran. Coran yang tidak termodifikasi biasanya mempunyai poros makro dan *shrinkage* yang besar. Dengan modifikasi, poros makro yang besar akan berganti dengan porositas yang halus dan terdistribusi merata. Beberapa pendapat menyebutkan bahwa nukleasi poros semakin mudah dalam lelehan logam yang termodifikasi dikarenakan penurunan tegangan permukaan. Jika poros lebih mudah terbentuk, maka poros akan terbentuk lebih dahulu selama pendinginan, sehingga jumlahnya lebih banyak, lebih kecil dan terdispersi lebih baik dalam produk coran. Perbedaan distribusi porositas antara paduan yang termodifikasi dan tanpa modifikasi dikarenakan oleh beberapa alasan yaitu<sup>[14]</sup>:

- Perbedaan kelarutan gas hidrogen dalam paduan aluminium padat dan cair yang cukup besar menyebabkan gas hidrogen terperangkap dalam padatan, membentuk poros. Adanya modifier akan meningkatkan kelarutan hidrogen dalam lelehan logam sehingga menyebabkan poros.
- *Feedability* yang rendah dalam pengecoran menyebabkan adanya zona yang tidak terisi dalam daerah interdendritik sehingga menyebabkan pembentukan poros. *Feedability* dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti range pembekuan, energi *interface liquid-solid*, *feeding path*, nukleasi dan pertumbuhan eutektik, dan fraksi volum serta bentuk fasa intermetalik. Modifier akan mempengaruhi *range* solidifikasi dan energi *interface liquid-solid* pada paduan aluminium sehingga akan mengubah distribusi porositas pada paduan Al-Si yang termodifikasi.
- Adanya inklusi seperti oksida, nukleus poros dan modifier yang berasal dari oksida akan bertindak sebagai nukleus untuk poros hidrogen

## 2.4. MODIFIER FOSFOR

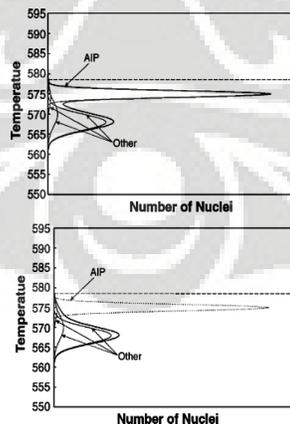
Fosfor merupakan unsur yang efektif untuk menghaluskan butir silikon primer pada paduan Al-Si eutektik dan hipereutektik. Fosfor yang ditambahkan pada paduan Al-Si dapat berupa master alloy yang mengandung P dan flux komersial. Tetapi beberapa paduan Al-Si mempunyai toleransi yang terbatas terhadap konsentrasi tembaga dan besi, karena itulah penggunaan CuP dan FeP

menjadi terbatas. Master alloy NiP tidak digunakan secara luas karena mempunyai harga yang mahal. Sebagian besar flux mengandung red *phosphorus* sebagai *active agent* dan garam – garam lainnya untuk mencegah oksidasi dan pembakaran yang cepat dari unsur fosfor. Tetapi, polusi dan efektifitas yang rendah membatasi penggunaan flux yang mengandung P<sup>[15]</sup>.

Fosfor merupakan unsur yang efektif dimana fosfor akan bereaksi dengan aluminium cair menghasilkan *aluminium phosphide* yang terdispersi halus yang mempunyai struktur kristal yang sangat sama dengan silikon dan titik leleh yang tinggi dan bertindak sebagai *effective heterogenous nuclei* untuk silikon. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa penggunaan master alloy AIP sebagai modifier fosfor lebih efektif dibandingkan dengan bentuk modifier fosfor lainnya<sup>[15]</sup>.

#### 2.4.1 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Karakteristik Paduan Al-Si Eutektik

Pada paduan aluminium silikon eutektik, fosfor berperan dalam proses pengintian silikon eutektik. Dengan adanya fosfor, frekuensi pengintian dari silikon eutektik akan meningkat. Sama seperti pada aluminium silikon hipereutektik, pada aluminium silikon eutektik penambahan fosfor akan membentuk presipitat *aluminium phosphide* (AIP). AIP inilah yang akan berperan dalam proses pengintian pada paduan aluminium silikon.



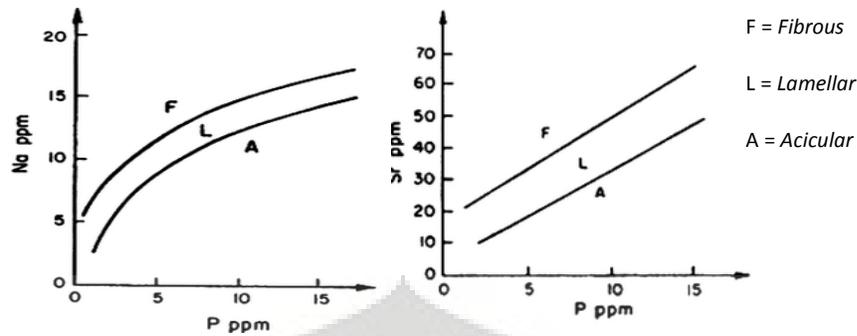
**Gambar 2.9** Jumlah Inti yang Terbentuk (a) Modifikasi Phospor (b) Tanpa Modifikasi<sup>[13]</sup>

Akan tetapi, berbeda dengan paduan aluminium silikon hipereutektik. Pada aluminium silikon eutektik jumlah fosfor yang ditambahkan tidak sama dengan aluminium silikon hipereutektik. Jika pada aluminium silikon hipereutektik jumlah penambahan fosfor yang efektif berada pada rentang 0.0015-0.03% maka pada aluminium silikon eutektik jumlah penambahan fosfor seharusnya berada dibawah rentang tersebut.

Silikon eutektik dapat juga dimodifikasi seperti halnya pada silikon primer. Proses modifikasi tersebut dilakukan dengan penambahan secara bersamaan dan komposisi yang tepat antara fosfor dengan sejumlah kecil stronsium dan natrium (*double refinement*)<sup>[16]</sup>.

Beberapa penelitian mengenai pengaruh penambahan fosfor juga telah dilakukan, khususnya pengaruhnya terhadap silikon eutektik. Pada penelitian yang dilakukan oleh Kim, dkk yang mempelajari pengaruh P terhadap modifikasi paduan eutektik Al-7 Si-0,3 Mg didapatkan hasil bahwa penambahan stronsium pada kandungan fosfor 1.3 ppm, morfologi dari silikon eutektik yang terbentuk adalah jarum-jarum halus dan kemudian ketika kandungan fosfor meningkat hingga 17.5 ppm, silikon eutektik yang terbentuk berubah menjadi bentuk *flake-flake* yang kasar. Kemudian dari penelitian ini juga didapatkan bahwa kekuatan tarik dan elongasi mengalami penurunan seiring dengan peningkatan jumlah kandungan fosfor<sup>[16]</sup>.

Dari penelitian tersebut juga diketahui bahwa penambahan fosfor terhadap paduan aluminium silikon eutektik sangat dipengaruhi oleh adanya interaksi fosfor dengan stronsium atau sodium pada paduan tersebut. Interaksi antara fosfor dengan stronsium atau fosfor dengan natrium memegang peranan penting dalam proses modifikasi dari silikon eutektik, dalam hal ini adalah morfologi dari silikon eutektik yang terbentuk. Pengaruh kandungan fosfor, stronsium dan natrium dengan morfologi struktur silikon yang terbentuk dapat dilihat pada gambar 2.10.



**Gambar 2.10** Interaksi Antara Fosfor dengan Sodium dan Stronsium terhadap Morfologi Silikon Eutektik pada Paduan Al-7%Si (A356)<sup>[13]</sup>

Pada gambar tersebut terlihat bahwa penambahan fosfor hanya dibatasi hingga kurang dari 1 ppm untuk mendapatkan struktur silikon eutektik yang *fibrous*. Akan tetapi, kandungan fosfor maupun stronsium dan natrium untuk membentuk struktur yang *fibrous*, *lamellar* atau *acicular* pada gambar tersebut tidak dapat dijadikan sebagai acuan. Hal ini dikarenakan, jumlah kandungan silikon pada paduan tersebut juga ikut mempengaruhi besarnya jumlah kandungan fosfor atau stronsium yang ditambahkan. Selain itu, kecepatan pembekuan dari paduan juga ikut menentukan morfologi dari struktur silikon eutektik yang terbentuk.

Azonsio-Lazano dalam penelitiannya yang berjudul *Microstructural Effect of Phosphorus on Pressure Die Casting Al-12Si Component*<sup>[17]</sup> menghasilkan perubahan mikrostruktur yang berbeda pada setiap penambahan fosfor dalam bentuk yang berbeda. Penelitian tersebut menghasilkan perbedaan ukuran silikon cuboid pada penambahan fosfor dalam bentuk *red-phosphorus* dan master alloy AlFeP, dimana silikon cuboid yang dihasilkan dari penambahan fosfor dalam bentuk *red-phosphorus* memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan dengan silikon cuboid hasil penambahan fosfor dalam bentuk AlFeP. Hal ini disebabkan karena kecenderungan *red-phosphorus* yang akan membentuk cluster ketika ditambahkan dalam leburan sehingga inti yang dihasilkan semakin berkurang dan ukuran *Si cuboid* menjadi lebih besar.

## 2.4.2 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Karakteristik Paduan Al-Si Hipereutektik

Pada paduan aluminium hipereutektik, mikrostrukturnya mengandung kristal silikon primer dalam matriks eutektik. Sifat mekanik, *machinability* dan ketahanan aus dari paduan ini tergantung dari ukuran, bentuk dan distribusi dari kristal silikon primer yang keras ini<sup>[18]</sup>. Adanya silikon primer ini akan mengurangi sifat mekanis dari Al-Si, diantaranya menurunkan fluiditas dan mengurangi sifat castability-nya.

Pada pertumbuhan silikon primer, jika terdapat sedikit nukleus untuk pembentukan silikon, maka silikon akan membentuk partikel terpisah yang besar yang akan terapung dengan cepat, terpisah menuju bagian atas produk casting<sup>[19]</sup>. Dalam hal ini nukleasi silikon menjadi penting dalam pengontrolan mikrostruktur dan sifat coran. Untuk itulah ditambahkan modifier antimony atau fosfor. Penambahan modifier akan menurunkan temperatur eutektik dan mencegah pembentukan silikon primer, serta mempengaruhi ukuran dan persebaran butir.

Distribusi partikel silikon yang tidak merata dalam produk casting merupakan salah satu permasalahan dalam pengecoran paduan Al-Si hipereutektik. Hal ini disebabkan karena paduan Al-Si mempunyai rentang solidifikasi yang besar/lebar yang akan memperlama waktu solidifikasi dan menekan penyebaran fasa. Penyebaran fasa *solid* dalam daerah "*solid plus liquid*" sangat dipengaruhi oleh densitas *solid* dan karena silikon primer mempunyai densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan *liquid*, maka akan terjadi flotasi silikon primer<sup>[20]</sup>, karena itulah diperlukan penambahan fosfor agar silikon primer menjadi lebih halus dan terdistribusi merata.

Penambahan fosfor sebagai modifier pada paduan aluminium silikon hipereutektik bergantung dari banyak variabel, terutama jumlah kandungan silikon pada paduan aluminium dan kecepatan pembekuannya. Semakin banyak jumlah kandungan silikon pada paduan tersebut maka akan semakin memperbesar ukuran silikon primer yang terdapat pada aluminium silikon hipereutektik. Sebagai contoh, dengan meningkatkan kadar Si dari 12% menjadi 20% maka akan meningkatkan ukuran silikon primer menjadi 4.5 kali lipat semula<sup>[21]</sup>.

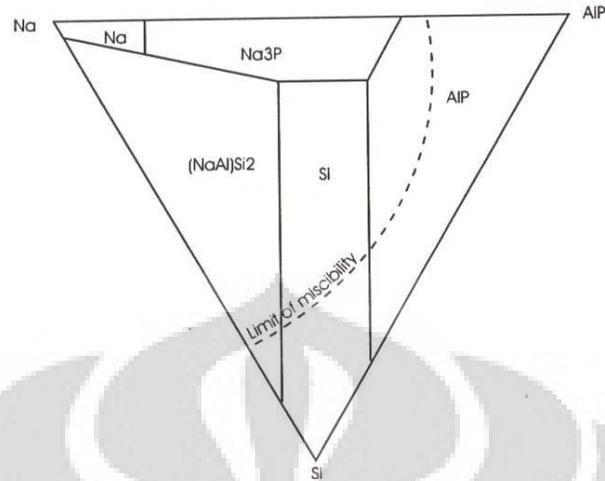
Konsentrasi dari fosfor yang digunakan untuk penghalusan silikon primer biasanya berada pada rentang 0.0015% hingga 0.03%<sup>[22]</sup> bergantung dari kondisi pengecorannya. Ketidaksesuaian dengan rentang diatas biasanya diakibatkan oleh sulitnya pembuatan sampel yang akurat (komposisi) dan juga penganalisaan komposisi phospor yang akurat. Dalam perkembangan baru-baru ini telah digunakan *vacuum stage spectrographic* atau *quantometric analysis* untuk pengukuran kadar phospor yang akurat<sup>[22]</sup>. Dari suatu penelitian didapatkan bahwa pada paduan Al-Si dengan kadar Si 22%, jumlah kadar phosphor yang memberikan hasil optimal berada pada rentang 0.003-0.006%<sup>[21]</sup>. Untuk memaksimalkan penghalusan silikon primer diperlukan perlakuan khusus terhadap logam cair diantaranya adalah<sup>[4]</sup> :

- Temperatur peleburan dan *holding* harus ditahan pada titik minimum
- Paduan tersebut harus melalui proses *fluxing* dengan *chlorine* atau *freon* sebelum proses penghalusan untuk menghilangkan unsur – unsur yang dapat bereaksi dengan fosfor yang akan mengganggu proses penghalusan silikon primer seperti kalsium dan natrium
- Proses *fluxing* yang singkat setelah penambahan fosfor perlu dilakukan untuk menghilangkan hidrogen yang masuk ketika proses penambahan fosfor dan untuk mendistribusikan nukleus aluminium phosphida secara merata dalam logam cair.

#### Mekanisme Penghalusan Silikon Primer

Seperti telah dijelaskan pada bagian sebelumnya bahwa fasa Si primer yang kasar dapat dihaluskan melalui penambahan unsur penghalus ke dalam leburan paduan Al-Si yaitu berupa penambahan fosfor. Adanya penambahan fosfor tersebut akan dihasilkan partikel silikon primer yang lebih halus, terdistribusi merata dan berbentuk bulat (*spherodised*).

Untuk memahami perubahan partikel silikon primer tersebut, terlebih dahulu perlu diketahui sistem Al-Na-P-Si, seperti tampak pada gambar dibawah. Fasa – fasa yang mungkin ada dalam keadaan cair dari diagram Al-Na-P-Si tersebut adalah Al, Si, (NaAl)Si<sub>2</sub>, Na, AlP dan Na<sub>3</sub>P<sup>[23]</sup>.



**Gambar 2.11** Skema kondisi dalam keadaan cair dari diagram Al-Na-P-Si<sup>[23]</sup>

Diketahui bahwa rasio Na:P mempengaruhi fasa – fasa yang terbentuk. Jika rasio Na:P mendekati 2,2 maka fosfor dan natrium bergabung membentuk Na<sub>3</sub>P. Sedangkan dengan rasio yang lebih rendah, dimana kadar fosfor berlebih, maka fasa yang ada adalah AIP (aluminium phosphide). Dan dengan rasio yang lebih tinggi dari 2,2, maka natrium akan membentuk (NaAl)Si<sub>2</sub> serta AIP dan Na<sub>3</sub>P.

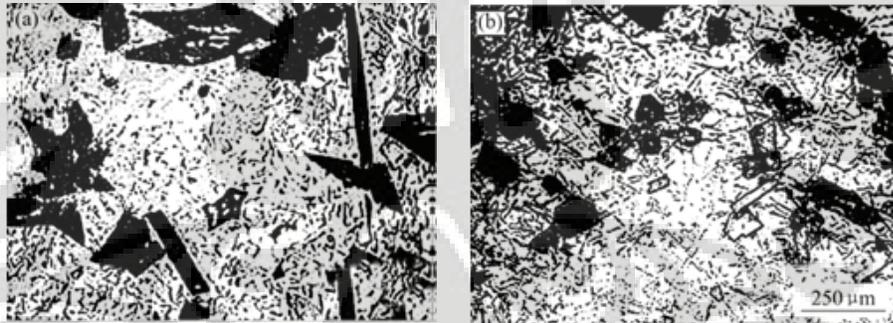
Mekanisme penghalusan silikon primer dengan fosfor berbeda dengan mekanisme silikon eutektik dengan penambahan stronsium dan natrium. Modifier seperti Na dan Sr pada paduan aluminium silikon hipoeutektik cenderung berperan sebagai pengotor (impurity induced twinning) yang akan memberikan pengaruh yang 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<sup>[7]</sup>.

Namun sebaliknya pada penghalusan atau inokulasi fosfor merupakan suatu fenomena pengintian yang hanya mempengaruhi ukuran dan bentuk partikel silikon primer saja. Seperti dijelaskan di atas bahwa fosfor bergabung dengan aluminium di dalam leburan membentuk senyawa padatan aluminium phosphida (AIP) yang kecil dan tak larut. Karena AIP dan silikon memiliki kesamaan sifat kristalografi, dalam hal ini struktur kristal keduanya berbentuk kubik intan (diamond cubic crystal) dengan konstanta kisi (lattice parameter) yang hampir

serupa (Si 5,42 Å, AlP 5,45 Å) , maka AlP akan bertindak sebagai inti (nuclei) pada pertumbuhan silikon primer selama pembekuan<sup>[24]</sup>.

### 2.4.3 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Struktur Mikro

Telah banyak diketahui bahwa penambahan fosfor pada paduan aluminium-silikon hipereutektik akan mengubah morfologi silikon primer. Penambahan fosfor pada paduan Al-Si hipereutektik dapat menghaluskan silikon primer. Penelitian Zhang Ying menyebutkan bahwa terdapat beberapa perubahan mikrostruktur setelah penambahan modifier fosfor. Hasilnya menunjukkan bahwa fosfor dapat mengubah morfologi silikon primer dan mengontrol panjang silikon eutektik yang berbentuk seperti jarum atau dendritik. Setelah modifikasi oleh fosfor, silikon primer yang berbentuk seperti bintang dan pelat yang kasar akan berubah menjadi poligonal dengan sudut yang lebih sedikit (*less cute angles*) dan akan mengalami penurunan ukuran<sup>[24]</sup>.

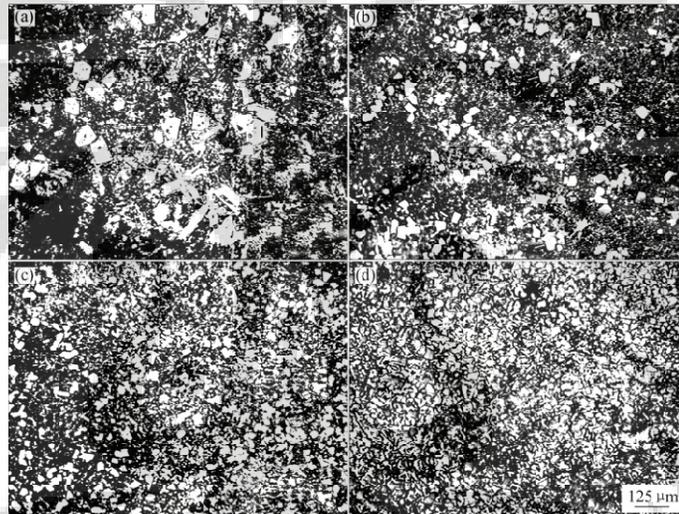


**Gambar 2.12** Morfologi silikon primer pada paduan A390 (a) Unmodified; (b) Modifikasi dengan 0,1% P<sup>[24]</sup>

Gambar 2.12 a menggambarkan bahwa silikon primer pada paduan A390 yang tidak termodifikasi mempunyai bentuk yang bermacam – macam seperti poligonal yang besar, star like, coarse platelet, yang akan menurunkan sifat mekanik. Gambar 2.12 b menggambarkan bahwa penambahan fosfor mengubah bentuk silikon primer menjadi *blocky* dan *faceted shape*. Selain mekanisme modifikasi telah dijelaskan sebelumnya, sebuah analisis termal pada proses

pembekuan paduan Al-Si hipereutektik dibuat oleh GUI. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan fosfor dapat meningkatkan temperatur pengendapan silikon primer secara signifikan. Silikon primer dapat mengendap pada temperatur tinggi dengan tanpa adanya pengelompokan silikon dalam logam cair, sehingga morfologinya berubah menjadi *faceted shape*<sup>[24]</sup>.

Selain itu, dengan semakin banyak penambahan modifier P, maka jumlah silikon primer yang terbentuk juga semakin banyak, tetapi ukurannya semakin menurun. Hal ini disebabkan karena semakin banyak fosfor yang ditambahkan, semakin banyak AlP yang terbentuk yang berarti semakin banyak nukleus Si yang terbentuk, hal ini menyebabkan ukuran silikon primer menjadi lebih kecil.



**Gambar 2.13** Morfologi silikon primer pada paduan Al-Si hipereutektik (a) Modifikasi dengan 0,1% P; (b) Modifikasi dengan 0,2% P; (c) Modifikasi dengan 0,4% P; (d) Modifikasi dengan 0,8% P<sup>[24]</sup>

Zhang Ying juga menyebutkan bahwa selain mempengaruhi morfologi silikon primer, penambahan modifier P juga akan mempengaruhi silikon eutektik. Zhang Ying menyimpulkan bahwa perubahan silikon eutektik ini disebabkan karena silikon ini tumbuh dari ujung sudut silikon primer, karena itu silikon eutektik dipengaruhi oleh morfologi serta ukuran silikon primer. Silikon eutektik tersebut akan berubah dari bentuk jarum atau dendritik menjadi batangan pendek atau titik (*short bar and dots*) dengan panjang rata – rata yang lebih pendek<sup>[24]</sup>.

Berbeda dengan pernyataan di atas, Zhang Henghua menyimpulkan bahwa modifier P tidak mempunyai pengaruh atau hanya memberikan pengaruh modifikasi yang sangat kecil pada silikon eutektik. Hal ini disebabkan oleh transformasi yang cepat dari silikon eutektik pada rentang temperatur yang sangat sempit, sehingga melemahkan fungsi AIP sebagai nukleus untuk silikon eutektik<sup>[25]</sup>. Sependapat dengan Zhang Henghua, J.Cisse juga menyebutkan bahwa penambahan fosfor tidak mempunyai pengaruh terhadap silikon eutektik. Sejumlah kecil natrium biasanya digunakan untuk memodifikasi silikon eutektik, tetapi pengaruhnya lebih kepada perubahan cara pertumbuhan dibandingkan dengan peningkatan frekuensi nukleasi silikon eutektik<sup>[25]</sup>.

Terdapat beberapa hal yang dapat mempengaruhi struktur mikro dari pada paduan Al-Si hipereutektik, sebagai berikut<sup>[23]</sup> :

- Laju Pembekuan

Ukuran silikon primer juga dikontrol oleh laju pembekuan dimana paduan membeku pada temperatur liquidus menuju temperatur eutektik. Proses pengecoran dengan laju pembekuan tinggi atau pada bagian penampang coran yang tipis akan menghasilkan partikel Si-primer yang relatif halus.

- Waktu Tahan di Dalam Leburan

Inokulasi leburan dengan fosfor tidaklah permanen. Lamanya pengaruh perlakuan penghalusan tergantung pada ukuran cairan logam dan tingkat pengadukan yang dilakukan. Berkurangnya pengaruh penghalusan terjadi secara berangsur – angsur. Walaupun juga fosfor berkurang di dalam leburan seiring berjalannya waktu, namun berkurangnya pengaruh penghalusan lebih banyak disebabkan karena aglomerasi dari senyawa padatan AIP sehingga akhirnya mengurangi keefektifan banyaknya jumlah daerah pengintian silikon.

- Agitasi

Banyaknya pengadukan cairan logam juga dapat mempercepat hilangnya efek penghalusan partikel silikon primer.

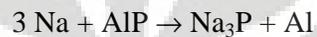
- Jumlah modifier fosfor

Pada umumnya, *modifier* dengan konsentrasi yang lebih tinggi akan menghasilkan struktur mikro yang lebih baik. Apabila terlalu tinggi, maka akan menyebabkan terjadinya overmodifikasi. Kelebihan fosfor akan mengakibatkan

terbentuknya mikrostruktur ketiga yang berbentuk granular yang terdiri dari partikel silikon yang besar yang akan menurunkan sifat mekanis<sup>[10]</sup>. Berdasarkan literatur, jumlah penambahan fosfor yang berlebih pada paduan Al-22%Si akan membuat ukuran silikon primer kembali menjadi besar. Overmodifikasi pada fosfor sering disebut sebagai *over refinement*<sup>[17]</sup>.

- Natrium

Adanya unsur natrium di dalam leburan dapat mempengaruhi pengaruh penghalusan. Hal ini disebabkan Na dapat menetralkan pengaruh pengintian fosfor melalui reaksi sebagai berikut



#### **2.4.4 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Kekuatan Tarik**

Penambahan fosfor pada Al-Si akan meningkatkan kekuatan tarik paduan Al-Si mulai dari 10 hingga 100% bergantung dari konsentrasi silikon pada paduan aluminium tersebut. Semakin tinggi konsentrasi silikon yang diiringi dengan penambahan fosfor, maka semakin tinggi pula kekuatan tarik-nya. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya silikon primer yang dimodifikasi sehingga pengaruhnya semakin terlihat dibandingkan tanpa dimodifikasi<sup>[21]</sup>. Dengan dilakukannya modifikasi, kristal silikon yang awalnya memiliki bentuk yang besar dan kasar serta mempunyai sudut yang tajam yang akan memicu terjadinya tegangan internal dalam struktur mikro menjadi lebih bulat sehingga dapat meningkatkan keuletan dan kekuatan tarik.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Zhang Henghua menunjukkan bahwa penambahan fosfor dari 0 sampai 0,05 wt% akan meningkatkan sifat mekanik produk casting akibat penurunan ukuran silikon primer dan akan mengalami penurunan sifat mekanik apabila kadar fosfor melebihi kadar tersebut<sup>[25]</sup>.

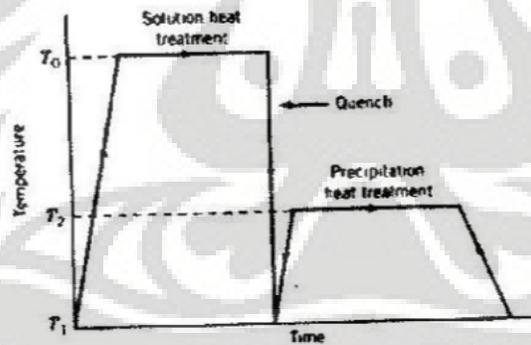
#### 2.4.5 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Kekerasan dan Keausan

Secara umum penambahan fosfor akan meningkatkan ketahanan aus dari paduan Al-Si hipereutektik. Perubahan silikon primer menjadi lebih halus dan terdistribusi merata akan membuat paduan ini memiliki kekerasan yang merata pula, sehingga ketika terabrasif tidak akan mudah pecah (*brittle*).

Sama halnya dengan keausan, penambahan fosfor juga akan mempengaruhi kekerasan paduan Al-Si hipereutektik walaupun tidak secara signifikan. Meningkat atau menurunnya nilai kekerasan umumnya dipengaruhi oleh kadar silikon pada paduan aluminium tersebut. Semakin tinggi kadar silikon maka akan semakin tinggi pula kekerasan yang didapat.

#### 2.5 PERLAKUAN PANAS PADA PADUAN ALUMINIUM SILIKON

Proses perlakuan panas pada paduan aluminium tuang dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik atau menghilangkan tegangan sisa dengan cara mengubah struktur mikro material hasil pengecoran<sup>[26]</sup>. Proses perlakuan panas untuk peningkatan kekuatan paduan aluminium terdiri dari beberapa proses yang ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.14. Grafik keseluruhan proses treatment aluminium paduan<sup>[26]</sup>.

a) Homogenasi atau Solution Heat Treating

Dalam tahapan ini, paduan yang terdiri dari 2 fasa atau lebih dipanaskan sampai temperatur dimana fasa kedua larut dan terbentuk solid solution.

b) Quenching

Paduan kemudian didinginkan dengan cepat untuk mendapatkan *supersaturated solid solution*.

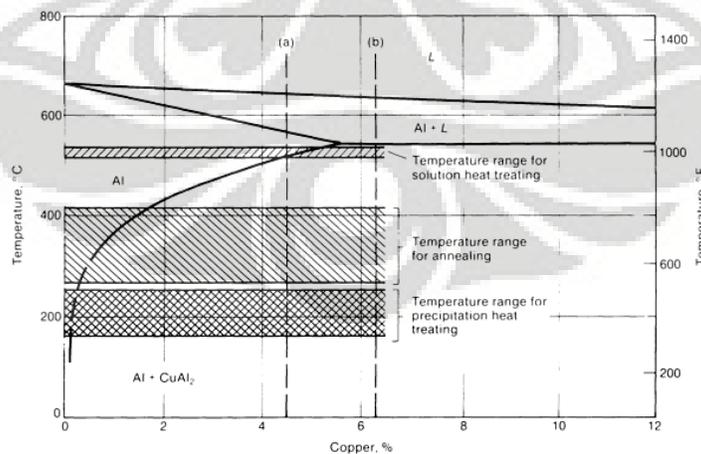
c) Age hardening

Peningkatan kekuatan paduan didapat melalui presipitasi atom-atom terlarut sebagai presipitat yang koheren dimana mekanisme penguatan berasal dari regangan kisi yang dihasilkan dari presipitat yang koheren tersebut. Jika pembentukan presipitat dilakukan pada suhu ruang, disebut natural aging, dan jika dilakukan pada temperatur tinggi disebut artificial aging.

2.5.1. Solution Heat Treating

Tujuan dari proses ini adalah untuk memasukkan sebanyak mungkin unsur penguat yang terdapat didalam paduan menjadi suatu larutan padat (solid solution). Prosesnya meliputi tahapan dimana paduan dipanaskan pada temperatur yang cukup tinggi dalam waktu yang cukup lama sehingga didapat solid solution yang homogen.

Temperatur Solution Heat Treating ditentukan oleh komposisi kimia, dimana pada beberapa paduan, temperatur saat terdapat maksimum unsur yang terlarut berhubungan dengan temperatur eutektik. Oleh karena itu temperatur solution heat treating harus dibatasi pada tingkatan aman dibawah temperatur eutektik untuk menghindari *overheating dan non-equilibrium melting* namun masih terlalu tinggi untuk menghindari *underheating*, karena jika temperatur terlalu rendah, sifat mekanisnya akan tidak optimal<sup>[27]</sup>.



Gambar2.15 Grafik tempratur proses Solution Heat Treating<sup>[27]</sup>.

### 2.6.2. Quenching

Tujuan dilakukannya quenching (pendinginan cepat) adalah:

- a) Menjaga agar solid solution yang terbentuk pada proses solution heat treating tetap terjaga sesaat setelah pendinginan ke suhu ruang.
- b) Mempertahankan jumlah minimum dari kisi-kisi yang kosong untuk membantu terjadinya difusi pada temperatur rendah yang dibutuhkan untuk pembentukan presipitat.
- c) Untuk menciptakan *supersaturated solid solution (SSSS)* pada temperatur ruang yang merupakan kondisi optimum untuk pengerasan presipitat.

### 2.5.3. Precipitation Heat Treating (Age Hardening)

Setelah melalui proses solution treatment dan quenching, proses pengerasan dilakukan pada temperatur kamar (natural aging) atau dengan cara precipitation heat treatment (artificial aging). Pada beberapa paduan, presipitat muncul dalam beberapa hari pada suhu ruang untuk menciptakan kondisi material yang memiliki nilai luluh yang baik<sup>[27]</sup>. Jadi terkadang dibutuhkan proses precipitation heat treatment untuk mendapatkan kekuatan dan kekerasan yang lebih baik pada produk cast atau wrought alloy.

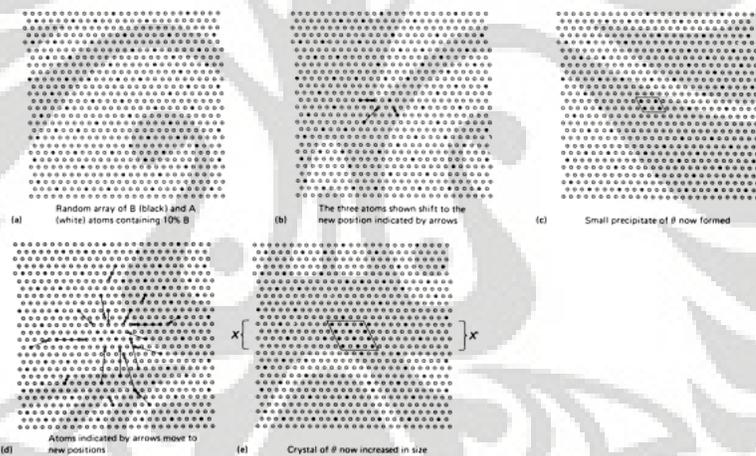
#### 2.5.3.1. Natural aging

Paduan aluminium yang umumnya melalui proses natural aging adalah paduan 6xxx, 7xxx, semua jenis paduan 2xxx selalu melalui solution treatment, dan quenching. Sifat yang dihasilkan umumnya memiliki tensile, yield strength ketahanan fatik dan fracture toughness yang cukup tinggi. Sebagian besar jenis paduan tersebut dilakukan jenis proses temper T3 atau T4. Proses temper T3 dan T4.

Untuk paduan yang melalui proses temper ini secara mikrostruktur akan terbentuk susunan atom yang sangat jenuh dan vacancy yang ada tetap karena proses pendinginan cepat disebabkan karena terbentuknya GP zone yang sangat cepat jadi properties material tersebut akan meningkat kekuatannya dan maksimum tercapai pada hari ke empat atau ke lima<sup>[27]</sup>.



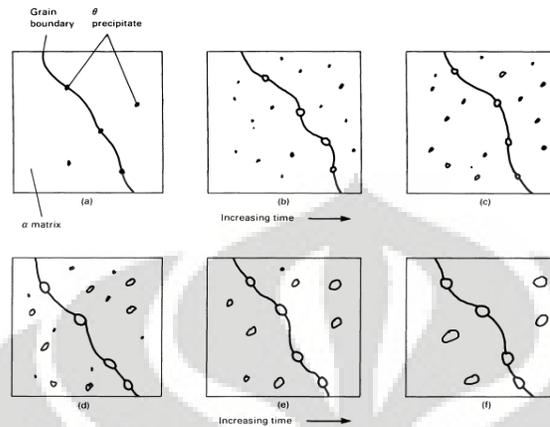
Mekanisme presipitasi dari supersaturated solid solution dapat dijelaskan pada grafik 2.13, dimana terdapat diagram fasa dari sistem A-B. jika paduan dengan komposisi  $C_0$  dipanaskan sampai  $T_0$  hingga diperoleh fasa tunggal  $\alpha$ , kemudian paduan tersebut didinginkan sampai  $T_1$  dimana akan terbentuk campuran antara 2 fasa yaitu  $\alpha$  dan  $\theta$ . Jika laju pendinginan yang terjadi dari  $T_0$  ke  $T_1$  cukup cepat maka setelah pendinginan cepat tersebut tidak akan terjadi perubahan struktur mikro melainkan hanya terjadi penurunan suhu. Sehingga pada saat didinginkan pada temperatur  $T_1$ , fasa yang dihasilkan adalah supersaturated solid solution, karena fasa tersebut mengandung 10% B sedangkan batas solubilitas unsur B didalam matriks  $\alpha$  pada  $T_1$ , hanya sebesar 1% B. Maka dengan berjalannya waktu atom-atom B bereaksi dengan beberapa atom-atom A membentuk partikel  $\theta$ , sehingga kandungan B didalam  $\alpha$  menurun hingga mencapai kesetimbangan<sup>[27]</sup>.



Gambar2.17. Mekanisme presipitasi supersaturated solid solution<sup>[27]</sup>.

Gambar 2.17 menggambarkan ilustrasi pergerakan atom-atom yang terjadi saat terbentuknya partikel  $\theta$  didalam supersaturated solid solution. Pada kenyataannya, pergerakan atom-atom tersebut terjadi melalui pergerakan vacancy. Dari ilustrasi diatas terdapat sejumlah atom yang berkumpul membentuk partikel  $\theta$ . Dengan terbentuknya partikel ini, kandungan B didalam  $\alpha$  berkurang sehingga terjadi perbedaan kandungan B didalam  $\alpha$  pada area yang jauh dari  $\theta$  dan yang

dekat dengan  $\theta$ . Perbedaan ini dapat menggerakkan atom-atom B masuk dan meningkatkan ukuran partikel  $\theta$  [27].



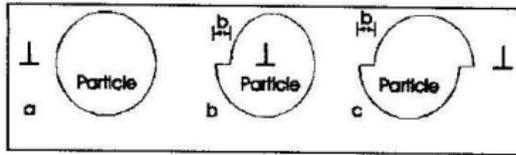
Gambar2.18. Mekanisme presipitat  $\theta$  pada matriks  $\alpha$  (a ke b) dan proses pembentukan presipitat kasar (c ke f) [27].

Jumlah maksimum presipitat yang bisa terbentuk bisa dilihat dari jumlah kesetimbangannya, yang dapat dihitung melalui lever rule (mass balance). Saat kesetimbangan tercapai, perubahan yang terjadi nantinya adalah kemungkinan adanya pengurangan daerah interfacial antara matrix dan presipitat. Seiring bertambahnya waktu saat diberikan pengaruh temperatur aging menyebabkan larutnya partikel kecil, dimana disebabkan terjadinya difusi atom-atom dalam jumlah kecil (solute), akibatnya ukuran presipitat akan membesar.

#### 2.5.5. Mekanisme penguatan

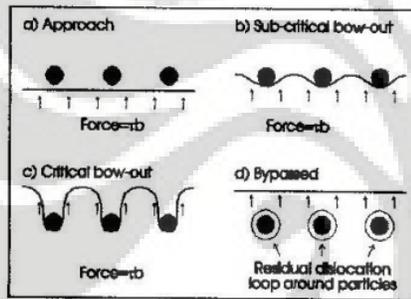
Prinsip dasar mekanisme penguatan suatu paduan adalah menahan pergerakan dislokasi. Mekanisme penguatan dalam pembentukan partikel presipitat terjadi melalui *precipitate shearing* dan *dislocation bypass*. Dalam *precipitate shearing*, dislokasi bergerak melewati presipitat dengan memotong presipitat tersebut. Mekanisme ini umumnya terjadi pada partikel yang mudah terdeformasi yaitu pada presipitat yang berukuran kecil. Sedangkan pada *dislocation bypass*, dislokasi dapat melewati partikel dengan cara melengkung pada ruang diantara presipitat dan meninggalkan *dislocation loop* disekitar

presipitat tersebut. Mekanisme ini umumnya terjadi pada presipitat yang sulit dideformasi dan berukuran besar.



Gambar 2.19. Mekanisme pemotongan presipitat<sup>[26]</sup>.

- a) dislokasi bergerak mendekati presipitat; b) dislokasi bergerak melewati presipitat dengan memotong presipitat; c) dislokasi terus bergerak meninggalkan presipitat dengan interface yang baru



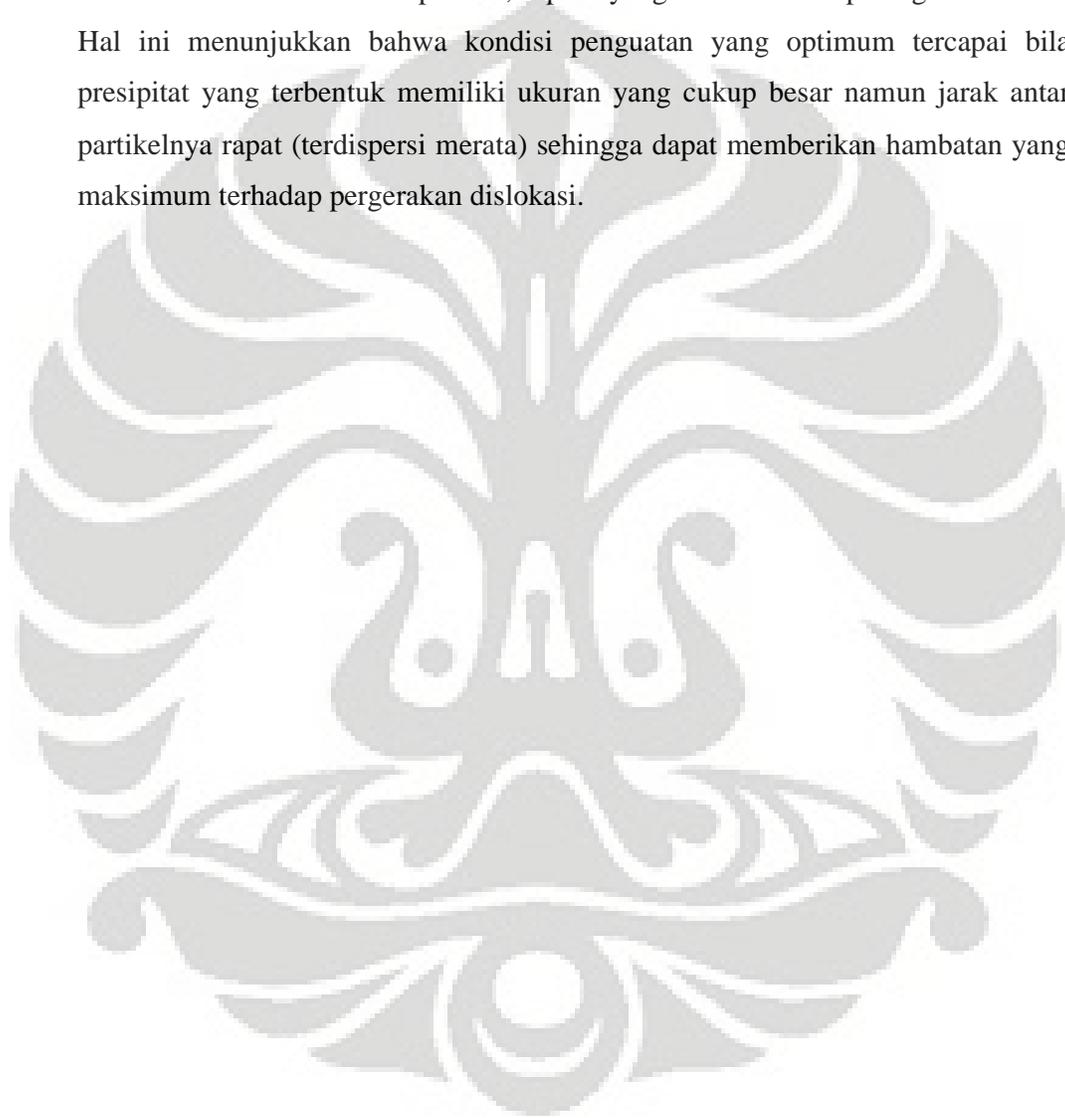
Gambar2.20. Skema proses dislocation bypass (orowan looping)<sup>[26]</sup>.

- a) Dislokasi bergerak mendekati presipitat; b) dislokasi mulai melengkung; c) dislokasi dalam keadaan kritis dimana lengkungannya telah mencapai bentuk setengah lingkaran; d) dislokasi terus bergerak meninggalkan dislocation loop disekitar presipitat.

Mekanisme pengerasan yang dihasilkan oleh presipitat tergantung pada dua faktor yaitu ukuran partikel dan jarak antar partikel. Partikel-partikel kecil yang terdispersi merata pada awal proses pengerasan presipitat, tidak memberikan efek penguatan yang efektif bagi paduan karena partikel tersebut bukan merupakan penghalang yang kuat bagi pergerakan dislokasi. Partikel-partikel besar yang terdispersi secara acak pada waktu pengerasan presipitat yang lama, juga tidak memberikan efek penguatan yang efektif. Hal ini disebabkan karena

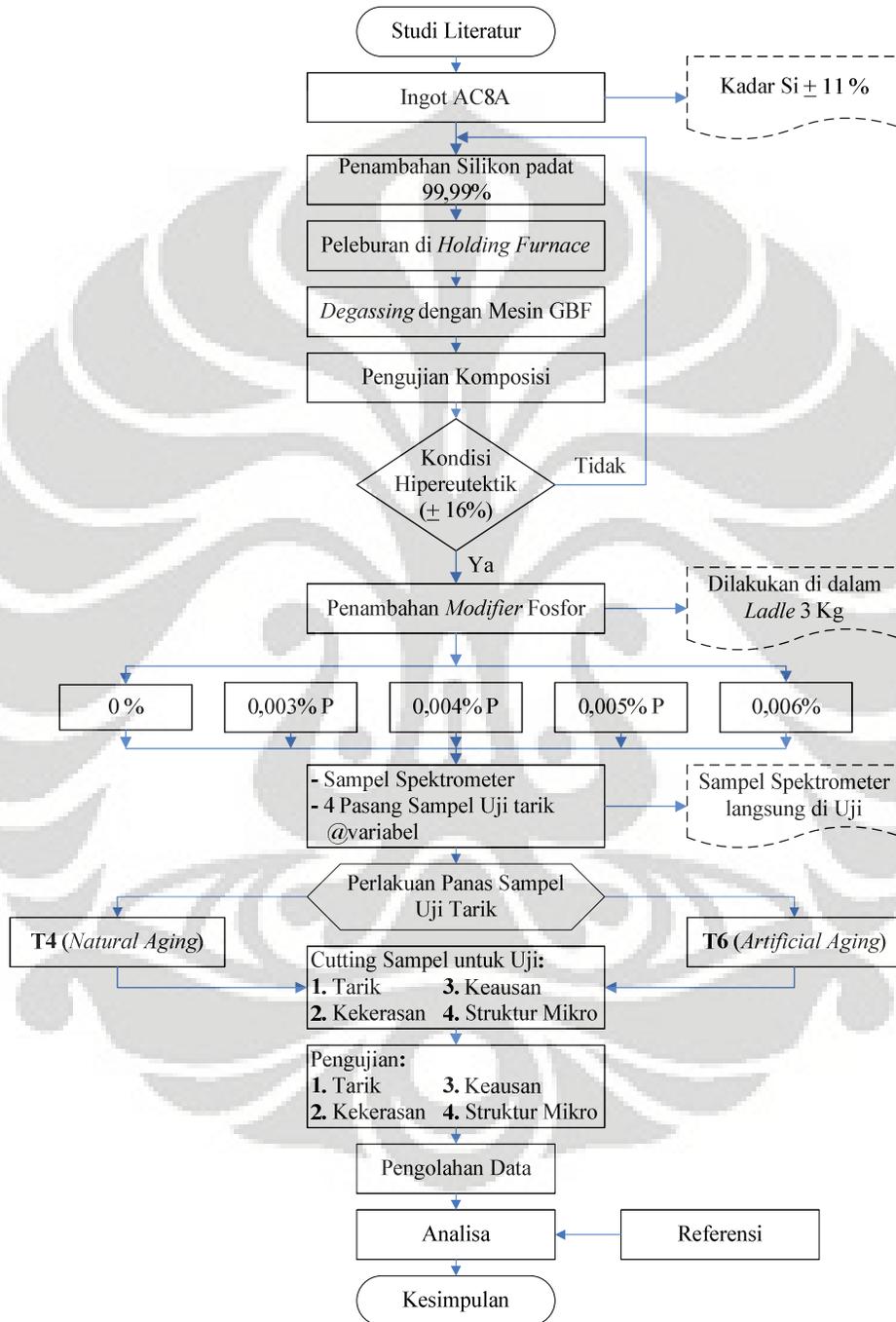
pada partikel besar, jarak antar partikelnya juga besar, sehingga dislokasi dapat dengan mudah bergerak melalui mekanisme orowan looping.

Umumnya kekuatan paduan akan meningkat dengan peningkatan ukuran partikel selama dislokasi dapat memotong partikel. Jika dislokasi dapat melewati partikel melalui dislocation bypass (orowan looping, peningkatan ukuran partikel akan menurunkan kekuatan paduan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.20. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi penguatan yang optimum tercapai bila presipitat yang terbentuk memiliki ukuran yang cukup besar namun jarak antar partikelnya rapat (terdispersi merata) sehingga dapat memberikan hambatan yang maksimum terhadap pergerakan dislokasi.



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian diatas menjelaskan tahapan proses awal, dimulai dari persiapan bahan baku hingga didapatkan informasi sifat mekanis sampel uji melalui pengujian sifat mekanik. Dimulai dari persiapan bahan baku yaitu ingot AC8A dengan kadar silikon sekitar 11,3-12,3%, kemudian silikon murni dengan kadar silikon mencapai 99,99 %. Setelah menyiapkan bahan baku maka dilakukan perhitungan material balance penambahan silikon primer 99,99%. sehingga diharapkan didapatkan kadar silikon dalam lelehan paduan aluminium sekitar 16%. juga dilakukan perhitungan material balance untuk penambahan modifier fosfor dalam ladle 3 kg sehingga didapatkan komposisi yang diinginkan. Setelah itu dilanjutkan dengan meleburkan ingot AC8A dan silikon primer dalam holding furnace menggunakan data perhitungan material balance penambahan ingot aluminium dan silikon primer sehingga dihasilkan kadar silikon sekitar 16%.

Setelah itu dilakukan proses degassing. Proses ini bertujuan untuk mengurangi gas hidrogen yang terdapat pada aluminium cair agar produk yang dihasilkan mempunyai *properties* yang baik. Setelah semua ingot dan silikon melebur dan terjadi *mixing*, dilakukan uji komposisi kimia untuk memastikan bahwa paduan aluminium tersebut sudah berada pada kondisi hipereutektik. Jika paduan aluminium tersebut belum berada pada kondisi hipereutektik (NG = not good), maka sejumlah silikon ditambahkan kembali ke dalam leburan aluminium hingga mencapai hipereutektik. Tahap berikutnya adalah penambahan fosfor. Penambahan fosfor dilakukan di dalam ladle (*ladle treatment*) dengan kadar 0%, 0,003%, 0,004%, 0,005% dan 0,006%.

Setelah semua tahap pembuatan sampel selesai, maka dilakukan beberapa pengujian terhadap sample tersebut untuk mengkarakterisasi material. Pengujian yang dilakukan antara lain pengujian tarik, pengujian kekerasan, pengujian keausan, dan pengujian mikrostruktur. Hasil pengujian tersebut kemudian dianalisa dan ditarik kesimpulan.

Sampel as-cast penambahan modifier yang telah dicetak sebelum dilakukan pengujian mekanik terlebih dahulu dilakukan proses treatment T4 dan T6. Setelah dilakukan proses treatment baik itu T4 maupun T6 maka sampel siap diuji untuk mengkarakterisasi material. Pengujian yang dilakukan antara lain pengujian tarik, pengujian kekerasan, pengujian keausan, dan pengujian

mikrostruktur. Hasil pengujian tersebut kemudian dianalisa dan ditarik kesimpulan.

### **3.2 PERALATAN DAN BAHAN**

#### **Peralatan**

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Holding furnace
2. Ladle 3 kg
3. Mesin *Gas Bubbling Flotation* (GBF)
4. Cetakan sample uji tarik
5. Cetakan sample uji komposisi
6. *Thermocouple*
7. Timbangan digital
8. Mesin bubut
9. Mesin cutting
10. Mesin Grinding dan Polishing
11. *Mounting Press Machine*
12. Mesin Uji Tarik "*Shimadzu AG-1 100 KN*"
13. Mesin Uji Komposisi Kimia (spektrometer) "*Shimadzu OES-5500 IP*"
14. *Hardness Rockwell Tester*
15. Mesin Uji Keausan "*Ogoshi*"
16. Mikroskop Optik Digital "*Keyence*"
17. Lain – lain : plunger, tang penjepit, penggaris, lable, spidol permanen, sarung tangan, dan masker

#### **Bahan**

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut :

1. Ingot AC8A
2. Silikon padat murni 99,99%
3. *Master alloy* Al-P 0,025
4. Kertas amplas, kain poles, zat poles alumina
5. Resin dan hardener
6. Zat etsa HF 0,5%

### 3.3 PROSEDUR PENELITIAN

#### 3.3.1 Persiapan Penelitian

##### 3.3.1.1 Perhitungan Material Balance

Sebelum melakukan proses pengecoran, terlebih dahulu dilakukan perhitungan terhadap jumlah silikon dan fosfor yang akan ditambahkan.

###### a) Perhitungan Jumlah Silikon

Ingot paduan aluminium AC8A yang dilebur pada penelitian ini berjumlah 100 kg. Berdasarkan hasil spektro, kadar silikon pada ingot AC8A berkisar  $\pm 11\%$ . Maka perhitungan penambahan silikon murni padat 99,99% untuk mendapatkan kondisi hipereutektik berdasarkan data tersebut adalah sbb:

Target kandungan silikon pada paduan = 16 %

Penambahan silikon

$$\frac{11}{100} \cdot 100 + \frac{99.99}{100} \cdot x = \frac{16}{100} y$$

Keterangan:

X=massa silikon primer (kg)

Y= massa campuran ingot & Si primer (kg)

$$11 + \frac{99.99}{100} x = \frac{16}{100} y \dots\dots\dots (3.1)$$

$$100 + x = y \dots\dots\dots (3.2)$$

Dengan memasukkan persamaan 3.2 ke 3.1 maka didapatkan jumlah penambahan silikon sekitar 6 kg.

###### b) Perhitungan Jumlah Fosfor

Fosfor yang digunakan pada penelitian ini adalah fosfor berbentuk padatan *master alloy* Al-P dengan kandungan fosfor hanya 0,025%wt. Fosfor ditambahkan pada *ladle (ladle treatment)* dengan kapasitas lelehan aluminium 3 kg. Jumlah fosfor yang ditambahkan pada penelitian ini sebanyak 5 variable yaitu 0%, 0,003%, 0,004%, 0,005% dan 0,006%.

Jumlah kandungan fosfor pada *master alloy* adalah 0,025%wt yang artinya dalam 100 gram *master alloy* mengandung 0,025 gram fosfor.

Berdasarkan nilai – nilai tersebut maka dilakukan perhitungan *material balance* untuk mendapatkan jumlah fosfor yang harus ditambahkan.

**Tabel 3.1** Perhitungan *Material Balance* Penambahan Fosfor

No	Kadar P	Perhitungan	Jumlah P (gr)
1	0%	-	0
2	0,003%	$(0,003/100) \times 3000 \times (100/0,025)$	360 gram
3	0,004%	$(0,004/100) \times 3000 \times (100/0,025)$	480 gram
4	0,005%	$(0,005/100) \times 3000 \times (100/0,025)$	600 gram
5	0,006%	$(0,006/100) \times 3000 \times (100/0,025)$	720 gram

### 3.3.1.2 Persiapan Alat dan Bahan

Sebelum memulai proses peleburan maka diperlukan persiapan alat-alat yang akan digunakan selama proses peleburan dan juga bahan baku pengecoran. Untuk bahan baku sendiri perlu dipersiapkan silikon primer dengan kadar 99,99%, ingot paduan aluminium AC8A, dan juga master alloy fosfor Al-0,025P sesuai perhitungan *material balance*.

Karena silikon primer sudah dalam bentuk bongkahan tidak diperlukan proses penghancuran terlebih dahulu. Sedangkan untuk ingot AC8A yang berada dalam bentuk batangan diperlukan proses *cutting*. Karena berat rata-rata satu batang ingot 5 kg, maka untuk penambahan ingot sebesar 100 kg diperlukan 20 batang ingot AC8A. Sedangkan master alloy fosfor yang juga berbentuk batangan mirip ingot AC8A harus *dicutting* karena bentuk awalnya berbentuk batangan seukuran batangan ingot AC8A yang memiliki berat rata-rata 5 kg sementara penambahan dalam *ladle* (3 kg) hanya sedikit.

Setelah persiapan bahan baku cor telah dipersiapkan, maka langkah selanjutnya alat-alat yang digunakan selama proses pengecoran perlu dipersiapkan. *Ladle* dan cetakan yang akan dipergunakan dalam proses pengecoran sebelumnya dibersihkan dan *dipreheating* terlebih dahulu agar tidak terjadi *shock thermal*. Untuk cetakan, sebelum *dipreheating*, dilakukan *sand*

*blasting* terlebih dahulu agar membersihkan cetakan dari *coating* yang lama. Selanjutnya dilakukan *coating* pada cetakan untuk memperpanjang umur cetakan. Setelah proses *coating* selesai, dilakukan *dies oven / preheating* selama  $\pm 5$  menit dengan temperatur setting  $350^{\circ}\text{C}$  (temperatur aktual  $342,5^{\circ}\text{C}$ ) agar *coating* dapat menempel dengan kuat pada cetakan dan untuk mencegah terjadinya *shock thermal*.

### **3.4 Proses Peleburan**

Proses peleburan dilakukan didalam holding furnace dengan kapasitas maksimal 300 kg. Yang pertama kali dilebur adalah ingot AC8A. Sesuai perhitungan material balance maka ingot AC8A yang ditambahkan adalah 100 kg. Setelah ingot aluminium melebur pada temperatur  $660^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  langsung dimasukkan bongkahan silikon primer (yang sebelumnya dipanaskan di atas holding furnace) kedalam lelehan ingot AC8A.

Setelah terjadi proses mixing antara ingot AC8A dan silikon murni maka dilanjutkan dengan proses degassing menggunakan mesin GBF (Gas Bubbling Flotation) dengan kecepatan pengadukan 370 rpm selama 10 menit. Proses GBF bertujuan untuk mengeluarkan gas hidrogen terlarut dan juga untuk mengeluarkan kotoran yang ada dengan metode penyemprotan gas yang bersifat hampir vakum (gas argon) dan pengadukan (*stirring*). Kotoran yang mengapung ke permukaan aluminium cair kemudian dibersihkan. Setelah dilakukan pembersihan kotoran melalui proses degassing dilanjutkan dengan mencetak sampel uji komposisi kimia untuk memastikan apakah komposisi silikon paduan telah sesuai.

### **3.5 Pengecekan Komposisi**

Sebelum melakukan proses penambahan fosfor maka harus dipastikan apakah kandungan silikon yang ada pada lelehan paduan aluminium telah memperlihatkan nilai yang sesuai dengan perhitungan material balance yaitu 16 % (hipereutektik), untuk itu terlebih dahulu dilakukan tes komposisi kimia.

Hasil pengujian komposisi kimia setelah lelehan paduan aluminium dilakukan proses gas bubble flotation terlihat pada tabel 3.2.

**Tabel 3.2** hasil uji komposisi kimia

	AKTUAL	STANDAR JIS H-5202
Si	15.94	11.0-13.0
Mg	1.070	0.70-1.30
Cu	1.050	0.80-1.30
Zn	0.056	MAX 0.15
Fe	0.322	MAX 0.80
Mn	0.044	MAX 0.15
Ni	1.090	0.80-1.50
Ti	0.031	MAX 0.20
Pb	0.015	MAX 0.05
Sn	0.003	MAX 0.05
Cr	0.089	MAX 0.10

Ternyata setelah diuji kadar silikon presisi dengan perhitungan material balance. Kadar silikon aktual adalah 15.94 % sementara perhitungan material balance adalah 16%. Sementara untuk komposisi unsur-unsur lain dalam paduan AC8A sudah sesuai dengan standar JIS. Artinya proses penambahan pospor sebagai proses lanjut bisa dilakukan.

### **3.6 Penambahan Fosfor**

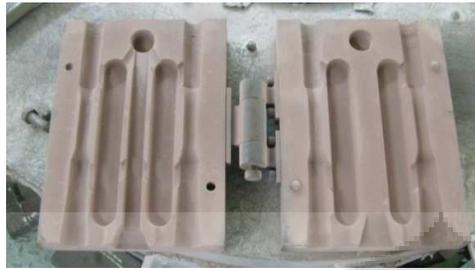
Setelah dipastikan paduan aluminium berada dalam komposisi hipereutektik ( $\pm 16\%$  Si). Maka proses selanjutnya adalah penambahan modifier fosfor yang akan ditambahkan didalam ladle dengan kapasitas 3 kg. Cairan aluminium melting cukup diambil dari dalam holding furnace menggunakan ladle, tetapi jangan terlalu penuh untuk menyesuaikan bentuk hasil cutting master alloy fosfor yang juga relatif besar. Setelah diambil menggunakan ladle ditambahkan potongan master alloy fosfor ke dalam ladle. Kemudian usahakan agar ladle yang telah terisi dengan campuran lelehan paduan aluminium dengan modifier fosfor bersentuhan dengan permukaan lelehan aluminium cair dalam holding furnace agar tidak terjadi penurunan temperatur yang drastis pada aluminium cair yang dapat menyebabkan fosfor tidak larut sempurna dalam aluminium cair. Proses pengadukan dilakukan selama  $\pm 3$  menit dengan posisi ladle tetap dalam holding furnace untuk membantu mempercepat pelarutan fosfor dan agar fosfor tercampur merata dalam aluminium cair.

Karena variabel dalam penelitian ini terdapat perbedaan komposisi penambahan modifier fosfor yaitu 0.003%, 0.004%, 0.005%, dan 0.006%. Dan harus ada 2 jenis sampel yaitu sampel treatment T4 dan sampel treatment T6 maka harus disiapkan penambahan modifier fosfor sebanyak 2 kali, masing-masing untuk treatment yang berbeda.

### **3.7 Penuangan ke cetakan sampel uji**

Lelehan aluminium yang telah bercampur dengan fosfor dalam ladle siap langsung dicetak ke cetakan sampel uji. Penuangan ke cetakan dalam satu ladle berkapasitas 3 kg bisa dilakukan 2 kali ditambah 1 sampel spektro. Cetakan uji tarik yang telah dituang oleh molten metal bisa menghasilkan 1 pasang sampel uji tarik. Jadi dari 2 kali penuangan dari satu ladle akan menghasilkan 2 pasang sampel uji tarik. Sementara dalam penelitian ini juga akan membandingkan bagaimana perbedaan antara paduan aluminium dengan modifier fosfor jika dilakukan perlakuan yang berbeda (T4 & T6), maka untuk tiap komposisi akan dilakukan 2 kali penambahan modifier fosfor. Jadi untuk tiap komposisi akan didapatkan 4 pasang (8) sampel uji tarik, dengan perincian 2 pasang akan melalui proses T4 saja dan 2 pasang lagi akan melalui proses T6. Sementara untuk sampel uji keras, aus, dan mikrostruktur akan diambil dari sampel uji tarik.

Proses penuangan ke cetakan uji tarik dilakukan setelah modifier yang ditambahkan dalam ladle telah larut sempurna, yaitu pada temperatur  $\pm 680^{\circ}\text{C}$  dengan waktu solidifikasi sekitar 1 menit. Logam dituang ke dalam dua cetakan berbeda yang sudah dicoating dan dipreheating terlebih dahulu dengan waktu tuang berkisar antara 6 – 10 detik.



a)



b)

**Gambar 3.2** a) cetakan uji tarik setelah coating; b) cetakan sampel spektro



a)

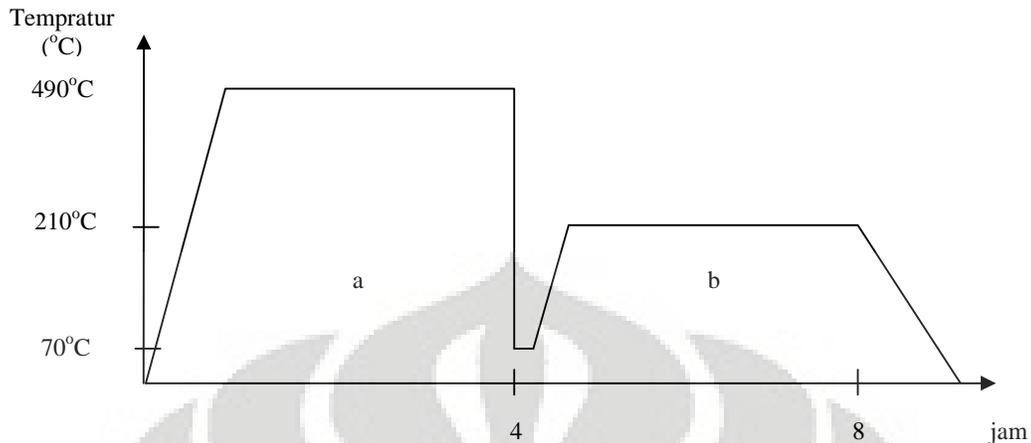


b)

**Gambar 3.3** a) hasil cor sampel uji tarik dan spektro; b) proses penuangan ke cetakan uji tarik

### 3.8 Proses perlakuan panas (T4 & T6)

Setelah semua sampel uji tarik telah dicetak, maka sampel langsung dimasukkan kedalam mesin treatment. Total akan didapatkan 16 pasang sampel uji tarik ditambah 2 pasang sampel paduan aluminium tanpa penambahan modifier yang langsung masuk proses treatment.



**Gambar 3.4** Grafik proses treatment (T4 & T6)

Hasil pengecoran akan dimasukkan kedalam mesin treatment. Temperatur Solution Treatment adalah  $490^{\circ}\text{C}$ . Setelah 4 jam sampel uji dilakukan proses treatment langsung diquenching ke temperatur  $70^{\circ}\text{C}$ . Proses quenching digunakan untuk menghasilkan larutan padat lewat jenuh. Nantinya ada 16 pasang yang akan dikeluarkan setelah quenching. Tujuannya adalah proses natural aging yaitu proses pembentukan presipitat pada temperatur ruang. Sementara 16 pasang sampel uji yang lain akan dilakukan proses pengerasan presipitat (*precipitation hardening*) dengan cara artificial aging, dimana sampel akan dipanaskan lagi hingga mencapai temperatur  $210^{\circ}\text{C}$ , selama kurang lebih 4 jam. Kemudian langsung didinginkan diudara terbuka.

Gambar 3.4 menjelaskan proses perlakuan panas yaitu lewat pengerasan penuaan (*precipitation hardening*) secara keseluruhan. Tujuannya untuk meningkatkan pengerasan dan kekuatan dengan jalan penambahan partikel keras yang tersebar secara merata. Proses treatment dalam grafik keseluruhan melewati 3 proses utama, yaitu

- a. **Solution Treatment**, yaitu pemanasan paduan hingga mencapai daerah fasa tunggal sehingga tercipta kondisi larutan padat yang homogen
- b. **Quenching**, yaitu pendinginan cepat untuk menghasilkan larutan padat lewat jenuh (*supersaturated solid solution*)

- c. **Penuaan (Aging)**, yaitu penuaan pada temperatur dalam jangka waktu tertentu.

### 3.9 Persiapan sampel (proses cutting)

#### 3.9.1. Preparasi Sampel Uji Tarik

Sampel uji tarik didapatkan dengan cara menggunakan proses cutting (dipotong) yaitu memisahkan sampel dari bagian gate-nya



a)

b)

**Gambar 3.5** a) proses cutting sampel uji tarik; b) hasil sampel uji tarik

#### 3.9.2. Preparasi Sampel Uji Kekerasan dan Keausan

Untuk sampel uji keras dan keausan akan diambil dari bagian gate hasil coran uji tarik.



Sampel uji aus

Sampel uji keras

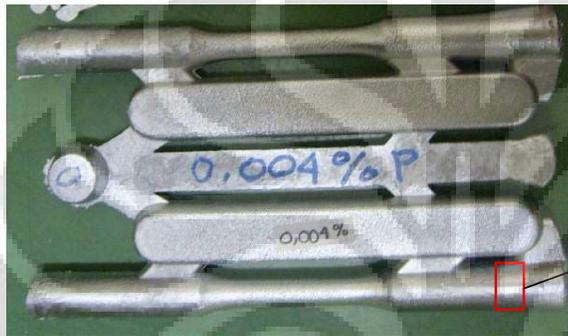
**Gambar 3.6** Penampang sampel uji tarik yang diambil untuk sampel keras dan aus

### 3.9.3. Preparasi Sampel Uji Struktur Mikro

Preparasi sample uji mikrostruktur dan SEM terdiri dari beberapa tahap yaitu :

#### 1. *Cutting* ( pemotongan )

Tahapan yang paling awal dari preparasi sampel uji mikrostruktur dan SEM adalah pemotongan sampel. Sampel uji mikrostruktur diambil dari bagian ujung sampel uji tarik. Pemotongan dilakukan dengan menggunakan mesin *cutting*.



bagian yang diambil untuk sampel mikrostruktur

**Gambar 3.7** Penampang sampel uji tarik yang diambil untuk sampel mikrostruktur *Mounting*

*Mounting* bertujuan untuk menempatkan sampel pada suatu media, untuk memudahkan penanganan sampel yang berukuran kecil dan tidak beraturan tanpa merusak sampel. Proses *mounting* untuk sampel mikrostruktur menggunakan *mounting press machine* dengan bahan dasar bakelit.



(a)



(b)

**Gambar 3.8** (a) *Mounting Press Machine*; (b) Hasil *mounting* sampel struktur mikro

## 2. *Grinding* (Pengamplasan)

Sampel yang baru saja dipotong memiliki permukaan yang kasar. Permukaan yang kasar ini harus diratakan agar pengamatan struktur mudah untuk dilakukan. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang ukuran butir abrasifnya dinyatakan dengan mesh. Pada penelitian ini proses pengamplasan dilakukan mulai dari mesh 400, dilanjutkan dengan mesh 600, 800, 1000, 1200, dan yang terakhir adalah mesh 1500.

Proses pengamplasan dilakukan dengan dialiri air yang berfungsi sebagai pemindah geram hasil pengamplasan sehingga tidak merusak permukaan sampel, memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul akibat gesekan permukaan sample dengan amplas yang dapat merubah struktur mikro sampel serta memperpanjang masa pemakaian kertas amplas. Setiap pergantian kertas amplas dilakukan perubahan arah pengamplasan yaitu  $90^0$  terhadap arah sebelumnya sehingga goresan hasil pengamplasan sebelumnya dapat hilang oleh pengamplasan berikutnya.



(a)



(b)

**Gambar 3.9** (a) Mesin Grinding & Polishing ; (b) Proses pengamplasan

### 3. *Polishing* ( pemolesan )

Setelah proses pengamplasan selesai, maka tahap berikutnya adalah proses pemolesan / *polishing* dengan menggunakan mesin poles dan zat poles alumina. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan permukaan sampel yang halus dan mengkilat seperti kaca tanpa goresan. Mekanisme proses ini tidak jauh berbeda dengan mekanisme pengamplasan, hanya saja pada pemolesan, sampel yang ditempelkan digerak – gerakkan atau diputar – putar secara kontinu pada porosnya untuk menghindari terbentuknya ekor komet.

Setelah selesai pemolesan, sampel dibersihkan dengan air kemudian dikeringkan dengan *hair dryer*. Sebagai parameter yang menandai tahap akhir pemolesan adalah diperolehnya permukaan mengkilat, rata, licin dan bebas goresan. Untuk mengamati apakah masih terdapat goresan – goresan, maka sampel yang telah dipoles diperiksa di bawah mikroskop optik.



**Gambar 3.10** Proses pemolesan

### 4. *Etching* ( etsa )

Setelah proses *polishing*/pemolesan selesai, tahap terakhir pada persiapan sampel adalah etsa. Pada prinsipnya etsa merupakan proses penyerangan atau pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan pencelupan ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak ke permukaan sampel sehingga detail struktur yang akan diamati akan terlihat dengan jelas dan tajam.

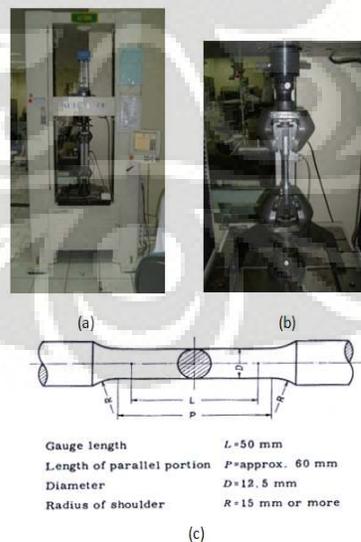
Pengetsaan dilakukan dengan mencelupkan bagian permukaan sample ke dalam zat etsa khusus aluminium HF 0,5% selama 15 detik. Selanjutnya, sample langsung disiram dengan air untuk menghentikan proses etsa dan dikeringkan dengan *hair dryer*. Sample siap diamati di bawah mikroskop optik.

### 3.10 PENGUJIAN

Terdapat sedikitnya 6 pengujian pada penelitian ini yang meliputi pengujian komposisi kimia, pengujian tarik, pengujian kekerasan, pengujian keausan, pengujian struktur mikro dan SEM.

#### 3.10.1 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik Shimadzu (gambar 3.11 a) dengan beban sebesar 200 kg. Prinsip pengujian ini yaitu dengan memberikan tegangan axial berupa tarikan pada kedua ujung benda uji hingga putus. Sebelum dilakukan uji tarik, pada sampel diberi penandaan *gauge length* sepanjang 50 mm sesuai dengan standar ASTM E-8 (gambar 3.11 c). Setelah itu, sampel dipasang pada mesin uji tarik dimana ujung – ujung sample dijepit dengan kuat dengan salah satu ujungnya dihubungkan dengan alat pengukur beban, sedangkan ujung yang satu lagi dengan alat penarik. Kemudian sampel ditarik dengan beban kontinyu sambil diukur pertambahan panjangnya.



**Gambar 3.11** (a) Mesin uji tarik Shimadzu; (b) Peletakan sample pada mesin uji tarik; (c) Standar ASTM sample pengujian tarik

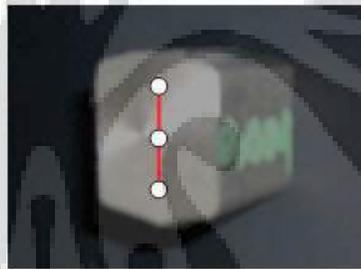
### 3.10.2 Pengujian Kekerasan

Prinsip pengujian kekerasan adalah permukaan material yang rata dilakukan penekanan dengan indentor sesuai dengan parameter (diameter, beban dan waktu). Ada berbagai macam metode pengujian kekerasan, pada penelitian ini metode pengujian kekerasan yang digunakan adalah metode *rockwell* dimana sampel dijejak dengan menggunakan indentor bola baja berdiameter 1/16 inch dengan pembebanan sebesar 100 kg sesuai dengan ASTM E18-03.

Pada pengujian ini dilakukan penjejakan sebanyak 3 kali dimana jarak antara indentasi satu ke indentasi lainnya kira – kira 3 kali diameter indentasi. Alat yang digunakan adalah *hardness rockwell tester* digital yang secara otomatis akan menampilkan nilai kekerasan sampel yang dijejak dalam HRB.



(a)



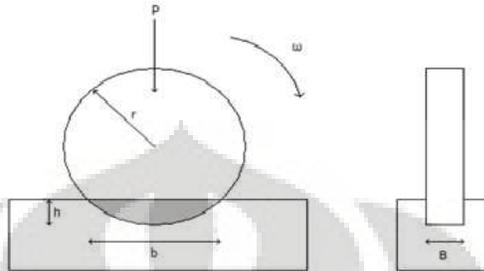
(b)

**Gambar 3.12** (a) Hardness Rockwell Tester; (b) Penjejakan sample

### 3.10.3 Pengujian Keausan

Pengujian keausan pada penelitian ini menggunakan metode Ogoshi dimana benda uji memperoleh beban gesek sebesar 6,32 kg dari cincin yang berputar dengan kecepatan 2,38 m/s. Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antar permukaan yang berulang-ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material pada permukaan sample. Besarnya jejak permukaan dari material tergesek itulah yang dijadikan dasar penentuan tingkat keausan pada material. Setelah pengujian, sample kemudian dilihat dibawah mikroskop ukur untuk mengukur besar jejak permukaan yang terabrasi.

Skema pengujian keausan dengan metode Ogoshi ialah sebagai berikut :



**Gambar 3.13** Skema pengujian keausan metode Ogoshi

Dengan B adalah tebal revolving disc (mm), r jari-jari disc (mm), b lebar celah material yang terabrasi (mm), maka dapat diturunkan besarnya volume material yang terabrasi (W) :

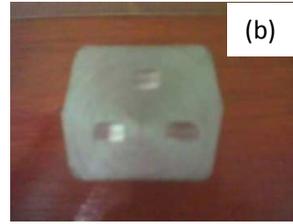
$$W = \frac{B \cdot b^3}{12 r} \quad \dots\dots (3.3)$$

Laju keausan (V) dapat ditentukan sebagai perbandingan volume terabrasi (W) dengan jarak luncur x (setting pada mesin uji):

$$V = \frac{W}{x} = \frac{B \cdot b^3}{12 r \cdot x} \quad \dots\dots(3.4)$$

Keterangan:

- B (Tebal cincin putar) = 3 mm
- r (Jari-jari cincin putar) = 15 mm
- X (Jarak luncur) = 100 m



**Gambar 3.14** (a) Mesin Pengujian Keausan Ogoshi; (b) Sampel yang telah diuji aus

#### 3.10.4 Pengujian Struktur Mikro dengan Mikroskop Optik

Sampel yang telah diuji dengan HF 0,5 % dan telah dikeringkan kemudian dilihat dibawah mikroskop optik digital Keyence dengan perbesaran 450X dan 1000X. Pengujian ini dimaksudkan untuk melihat karakteristik silikon dan fasa – fasa yang terbentuk.



**Gambar 3.15** Pengamatan pada mikroskop optik digital Keyence

## BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 4.1 HASIL DAN ANALISA KOMPOSISI KIMIA

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui bahwa material yang dilakukan untuk penelitian memiliki komposisi kimia yang sesuai. Hasil pengujian komposisi kimia terhadap sampel paduan aluminium hipereutektik yang ditambahkan modifier fosfor ditampilkan pada Tabel 4.1, sedangkan data mentah hasil pengujian terdapat pada lampiran A.

**Tabel 4.1** Hasil pengujian komposisi kimia

UNSUR PADUAN	Variasi Penambahan Modifier P (wt %)				
	0	0,003	0,004	0,005	0,006
Si	15,94	14,88	14,52	14,85	14,52
Mg	1,07	1,06	1,07	1,09	1,05
Cu	1,05	1,36	1,43	1,55	1,635
Zn	0,056	0,050	0,0475	0,046	0,043
Fe	0,332	0,332	0,314	0,322	0,3133
Mn	0,044	0,050	0,0475	0,036	0,034
Ni	1,090	0,900	0,840	0,810	0,714
Ti	0,031	0,0347	0,04	0,046	0,055
Cr	0,089	0,088	0,075	0,074	0,067
P	-	0,00373	0,0037	0,0032	0,0057
Sr	-	0,0006	0,0005	0,0005	0,00037
<b>TARGET P (wt %)</b>	0	0,003	0,004	0,005	0,006

Tabel 4.1 memperlihatkan komposisi aktual unsur-unsur yang ada pada sampel uji paduan aluminium hipereutektik. Pada penelitian digunakan kadar silikon yang tinggi hingga mencapai 16%, dan ternyata kondisi aktual silikon bisa mencapai angka 15,94% silikon. Kadar silikon yang berlebih digunakan untuk menghasilkan sifat ekspansi termal yang rendah serta meningkatkan ketahanan aus (kekerasannya meningkat) karena mempunyai fasa silikon primer yang keras sehingga cocok untuk aplikasi temperatur tinggi seperti piston<sup>[4][5]</sup>.

Pada penelitian ini, bahan baku paduan aluminium hipereutektik berupa ingot AC8A. Setelah dilakukan uji komposisi ternyata unsur Cu menyimpang dari standar komposisi AC8A (JIS H 5202) pada sampel uji yang telah ditambahkan modifier fosfor. Standar komposisi Cu dalam paduan AC8A ada dalam range 0,8-1,3 wt%. Peningkatan unsur Cu pada sampel yang telah ditambahkan modifier fosfor disebabkan karena master alloy fosfor yang digunakan mempunyai kadar Cu sebesar 3,12 wt%. Komposisi unsur-unsur pada master alloy dapat dilihat pada lembar lampiran. Cu (tembaga) pada paduan aluminium berkontribusi dalam pembentukan  $\text{CuAl}_2$  yang akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan dalam kondisi *as-cast* atau *heat treatment*. Paduan yang mengandung 4 – 5,5% Cu memberikan respon yang paling baik terhadap *thermal treatment* dan menunjukkan peningkatan *casting properties*. Tembaga akan mengurangi ketahanan *hot tear* dan meningkatkan potensial terjadinya *interdendritic shrinkage*. Tembaga juga akan menurunkan fluiditas dan ketangguhan<sup>[4],[5]</sup>.

Penyimpangan juga terjadi pada unsur Nikel yang tidak sesuai standar paduan aluminium hipereutektik AC8A (JIS H 5202) yang mengharuskan bahwa range unsur nikel sekitar 1,0 - 2,5. Penambahan unsur nikel berguna dalam pembentukan fasa intermetalik. Fasa intermetalik ini biasanya berkombinasi dengan unsur besi menghasilkan  $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ . Pada aluminium murni, kadar nikel hingga 2% dapat meningkatkan kekuatan tetapi akan menurunkan keuletan. Nikel biasa ditambahkan pada paduan aluminium – silikon untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada aplikasi temperatur tinggi dan untuk mengurangi koefisien ekspansi<sup>[4],[5]</sup>.

Untuk penambahan modifier fosfor ternyata juga terdapat penyimpangan. Kadar fosfor aktual untuk komposisi target 0,004% dan 0,005% tidak sesuai. Pada komposisi target 0,003% dan 0,004% memiliki komposisi aktual yang sama, jadi dalam penelitian ini data yang digunakan hanya pada komposisi aktual 0,0032%, 0,00373%, dan 0,0057%.

Perbedaan jumlah fosfor yang ditambahkan dengan hasil yang didapat disebabkan oleh proses *mixing* yang kurang sempurna. Karena fosfor yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk batangan ingot AC8A dan ditambahkan dalam jumlah yang cukup banyak hingga mencapai ratusan gram, sehingga ketika

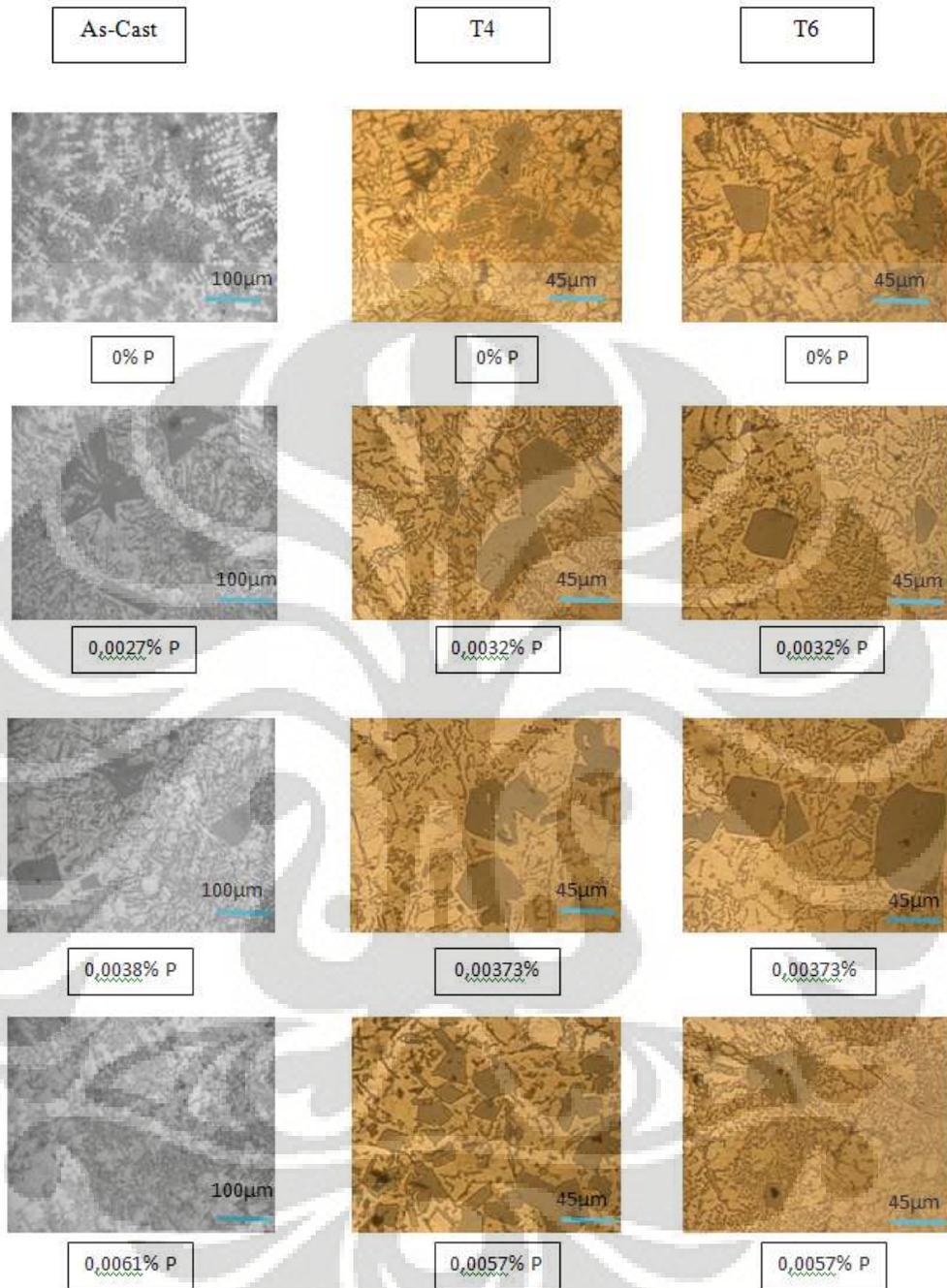
proses penambahan dikhawatirkan fosfor tersebut belum larut sempurna dan tidak bercampur secara keseluruhan. Fosfor merupakan unsur yang efektif dimana fosfor akan bereaksi dengan aluminium cair menghasilkan *aluminium phosphide* yang terdispersi halus yang mempunyai struktur kristal yang sangat sama dengan silikon dan titik leleh yang tinggi dan bertindak sebagai *effective heterogenous nuclei* untuk silikon.

#### 4.2 HASIL DAN ANALISA PENGAMATAN MIKROSTRUKTUR

Mikrostruktur paduan aluminium akan mengalami perubahan jika ditambahkan unsur fosfor yang berfungsi merubah ukuran silikon primer yang sebelumnya berbentuk poligonal (besar dan bersudut) menjadi partikel silikon primer yang lebih halus, terdistribusi merata dan berbentuk bulat (*spherodised*). Karena ukuran silikon primer menjadi lebih bulat dan distribusinya baik, didapatkan sifat mekanik (kuat tarik, kekerasan) yang baik.

Sementara pengaruh solution treatment akan melarutkan semua fasa intermetalik yang ada pada paduan aluminium hipereutektik. Terutama untuk unsur Cu, pada temperatur 500°C akan melarutkan hingga komposisi 4%. Sedangkan untuk unsur Mg akan larut hingga komposisi 0,25% pada temperatur 500°C. Sedangkan silikon bisa larut hingga komposisi 1,3%. Tetapi sangat penting untuk melarutkan unsur Mg sebanyak-banyaknya karena kemampukerasan unsur ini sangat baik bahkan pada konsentrasi yang kecil<sup>[29]</sup>. Unsur-unsur tersebut bisa memicu terbentuknya presipitat yang sangat keras yaitu diantaranya fase Al<sub>2</sub>Cu ( $\theta$ ), Mg<sub>2</sub>Si ( $\beta$ ), Al<sub>5</sub>Mg<sub>8</sub>Cu<sub>2</sub>Si<sub>6</sub> (Q) dan Al<sub>8</sub>FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub> ( $\pi$ )<sup>[29]</sup>. Kelarutan unsur-unsur tersebut dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya adalah variabel selama proses solution treatment dan lamanya waktu solution treatment. Tetapi lama saja tidak cukup, sebab jika terlalu lama justru akan menghasilkan fasa intermetalik yang kasar.

Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan mengambil 3 daerah berbeda untuk perbesaran yang sama. Hal ini dilakukan untuk dapat membandingkan dan mendapatkan hasil yang lebih representatif apakah modifier fosfor bekerja dalam mendistribusikan penyebaran silikon primer. Perbesaran yang digunakan dalam penelitian adalah 100X, 200X, dan 500X.



**Gambar 4.1** Perbandingan mikrostruktur paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan fosfor; a) as-cast, perbesaran 450X<sup>[30]</sup>; b) T4, perbesaran 200X; c) T6, perbesaran 200X.

#### 4.2.1. Pengaruh Penambahan Fosfor terhadap Morfologi Silikon Primer dan Eutektik Al-Si.

Gambar 4.1 memperlihatkan perbandingan antara mikrostruktur paduan aluminium hipereutektik as-cast dan mikrostruktur setelah treatment (T4 & T6). Data as-cast diambil dari penelitian lain dengan perbandingan komposisi fosfor yang hampir sama dengan komposisi fosfor mikrostruktur hasil treatment T4 dan T6.

Pada material as-cast terjadi penurunan dan penghalusan ukuran silikon primer dari paduan aluminium silikon hipereutektik, saat komposisi fosfor pada paduan ditingkatkan. Perubahan partikel silikon primer ini disebabkan adanya fenomena pengintian heterogen dimana fosfor yang ditambahkan ke dalam leburan paduan aluminium tuang Al-Si membentuk kristal senyawa aluminium phosphida (*aluminium phosphide*, AIP) yang sangat kecil dan tak larut. Adanya senyawa AIP ini memberikan fasilitas “tempat pengintian” (*a nucleation site*) bagi pertumbuhan silikon primer selama pembekuannya. Hal ini bisa terjadi karena senyawa AIP mempunyai struktur kristal *diamond cubic crystal* yang sama dengan silikon serta parameter kisi (*lattice parameter*) keduanya mempunyai ukuran yang hampir serupa yaitu  $a_0 = 5,42$  untuk AIP dan  $a_0 = 5,45$  untuk Si primer<sup>[24]</sup>.

Hal yang sama juga terjadi pada sampel uji penambahan fosfor dengan perlakuan panas (T4 & T6). Saat komposisi fosfor meningkat maka bentuk silikon primer yang sebelumnya berbentuk poligonal (besar dan mempunyai sudut) menjadi lebih bulat (daerah bersudut berkurang), tetapi yang paling mempengaruhi sifat mekanik adalah setelah komposisi fosfor meningkat maka penyebaran silikon primer menjadi merata karena dengan semakin banyak jumlah fosfor yang ditambahkan, maka semakin banyak AIP yang terbentuk yang berfungsi sebagai nukleasi bagi silikon primer, yang berarti semakin banyak pula silikon primer yang terbentuk.

Pengaruh perlakuan panas (T4 & T6) secara garis besar tidak terlalu mempengaruhi perubahan morfologi silikon primer begitu pula dengan eutektik Al-Si. Karena pada dasarnya proses perlakuan panas hanya berpengaruh terhadap

penyebaran fasa intermetalik (presipitat) yang keberadaannya hanya bisa dideteksi oleh pengujian SEM dan EDS.

Tetapi hasil pengujian komposisi ternyata terdapat unsur stronsium, yang secara teori jika berinteraksi dengan unsur fosfor atau natrium bisa mengubah morfologi eutektik Al-Si<sup>[13]</sup>. Tetapi karena komposisi unsur stronsium yang hanya 0,0006% dan natrium hanya 0,0001% sangat kecil, maka sulit kemungkinan bisa mengubah morfologi eutektik Al-Si.

#### **4.3 PENGARUH FOSFOR TERHADAP KEKUATAN TARIK PADUAN AI - Si HIPEREUTEKTIK**

Untuk pengujian kuat tarik, digunakan 3 sampel uji tarik untuk tiap variabel penambahan fosfor dan proses treatment (T4 & T6) yang berbeda, kecuali untuk sampel tanpa penambahan fosfor untuk T6 yang digunakan hanya 2 sampel. Dari data hasil pengujian tarik akan dihasilkan nilai UTS (Ultimate Tensile Test) yaitu sifat mekanik yang memperlihatkan nilai tegangan maksimum yang dapat diterima material sebelum material mengalami perpatahan. Nilai UTS juga menggambarkan adanya hubungan dengan nilai kekerasan.

$$\sigma(MPa) = 3,45 \times BHN \dots\dots\dots(4.1)$$

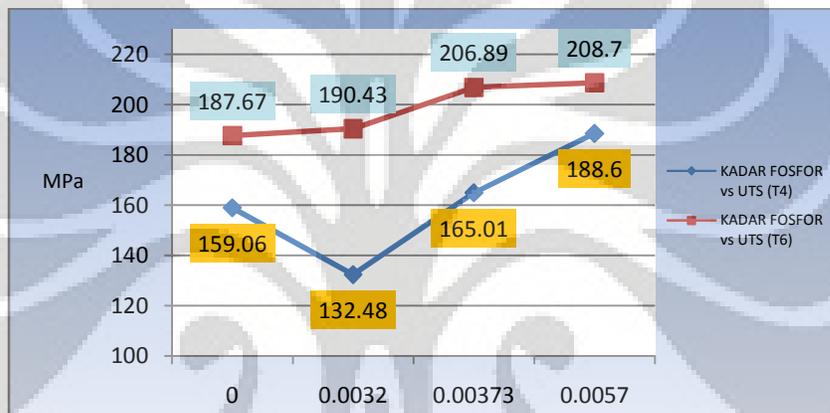
$$\sigma(psi) = 500 \times BHN \dots\dots\dots(4.2)$$

Jadi nilai UTS akan berbanding lurus dengan nilai kekerasan, semakin besar nilai UTS maka makin tinggi kekerasan material tersebut. Satuan UTS yang didapatkan adalah N/mm<sup>2</sup>, jadi diperlukan pengubahan kedalam satuan MPa.

$$1N/mm^2 = 1MPa \dots\dots\dots(4.3)$$

**Tabel 4.2** Tabel data uji tarik paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan modifier P dan treatment (T4 & T6).

No	Kadar P Target (wt %)	Kadar P Aktual (wt %)	AVERAGE STRESS (MPa)	AVERAGE STRESS (MPa)
			T4	T6
1	0	0	159,06	187,67
2	0,003	0,00373	165,01	206,89
3	0,004	0,0037	157,95	197,83
4	0,005	0,0032	132,48	190,43
5	0,006	0,0057	188,6	208,7



**Gambar 4.2** Grafik kekuatan tarik paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan fosfor pada perlakuan yang berbeda.

Pada tabel 4.2 memperlihatkan nilai UTS (Ultimate Tensile Stress) rata-rata dari 3 sampel uji paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan fosfor pada perlakuan panas (T4 & T6) yang berbeda. Setelah dikonversikan kedalam grafik memperlihatkan dengan adanya peningkatan komposisi fosfor pada paduan aluminium hipereutektik akan membuat kekuatannya menjadi lebih tinggi. Tetapi jika dibandingkan antara material dengan perlakuan panas yang berbeda maka paduan aluminium hipereutektik yang dilakukan proses T6 akan lebih tinggi jika dibandingkan T4.

Peningkatan nilai kekuatan tarik pada penambahan fosfor yang terus naik disebabkan karena secara mikrostruktur, terjadi perubahan morfologi silikon primer. Yang tadinya berbentuk poligonal (besar dan bersudut) menjadi lebih halus, terdistribusi merata dan berbentuk bulat (*spherodised*).

Prinsip dasar mekanisme penguatan suatu paduan adalah menahan pergerakan dislokasi. Dan penahan pergerakan dislokasi termasuk adanya presipitat, baik itu dalam bentuk silikon primer ataupun fasa intermetalik. Saat diberikan deformasi maka dislokasi akan bergerak, jika presipitat terlalu kecil maka akan dengan mudah dislokasi melewati presipitat dengan cara memotong presipitat tersebut (precipitate shearing). Sedangkan jika presipitat terlalu besar maka dislokasi akan melewati presipitat dengan jalan dislocation loop. Jadi kondisi penguatan yang optimum tercapai bila presipitat yang terbentuk memiliki ukuran yang cukup besar namun jarak antar partikelnya rapat (terdispersi merata) sehingga dapat memberikan hambatan yang maksimum terhadap pergerakan dislokasi

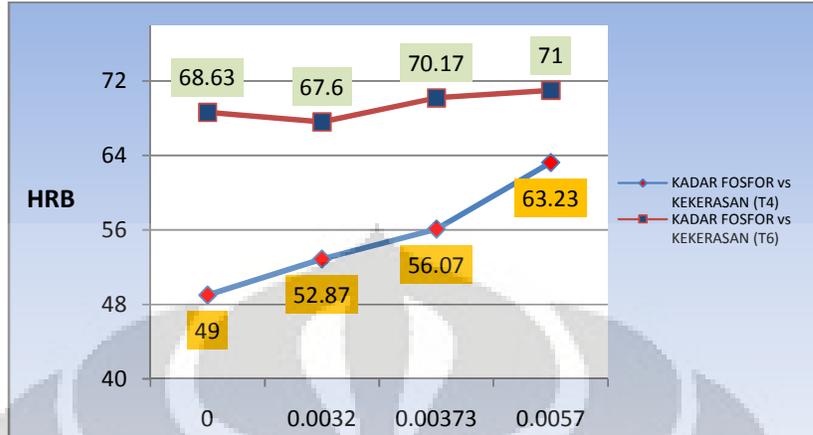
Seperti diperlihatkan pada gambar 4.1, saat peningkatan fosfor dilakukan maka partikel silikon primer menjadi lebih bulat dan menjadi tersebar merata, hal inilah yang menyebabkan kenapa kekuatan tarik paduan aluminium hipereutektik akan meningkat seiring peningkatan modifier fosfor.

#### 4.4 PENGARUH FOSFOR TERHADAP KEKERASAN PADUAN Al - Si

Pengujian kekerasan dilakukan pada 3 titik yang berbeda untuk setiap sampelnya.

**Tabel 4.3** Tabel data nilai kekerasan paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan modifier P dan treatment (T4 & T6).

Kadar P Target (wt %)	Kadar P Aktual (wt %)	Hardness Average (HRB) T4	Hardness Average (HRB) T6
0	0	49	68,63
0,003	0,00373	56,07	70,17
0,004	0,0037	53,83	68,2
0,005	0,0032	52,87	67,6
0,006	0,0057	63,23	71



**Gambar 4.3** Grafik kekerasan paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan fosfor pada perlakuan panas yang berbeda.

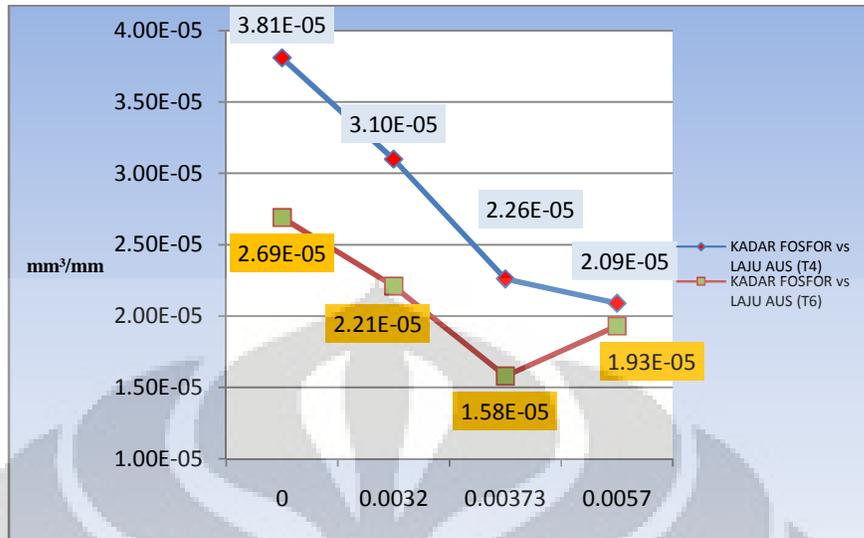
Berdasarkan data yang didapatkan dari pengujian kekerasan, diketahui bahwa semakin besar jumlah fosfor yang ditambahkan, maka besar pula kekerasan paduan Al-Si hipereutektik. Peningkatan nilai kekerasan ini disebabkan oleh perubahan mikrostruktur dari paduan tersebut. Silikon primer yang semula berbentuk poligonal, *star like* ataupun *coarse platelet* yang berukuran besar, berubah menjadi *blocky* dan *faceted shape*, berukuran lebih kecil dan tersebar merata.

Pada grafik nilai kekerasan tertinggi terdapat pada komposisi fosfor terbesar yaitu sebesar 0,0057% dengan mendapatkan nilai kekerasan hingga 63,23 HRB untuk proses T4 dan 71 HRB untuk proses T6. Sementara nilai kekerasan terendah adalah pada komposisi tanpa penambahan modifier fosfor yaitu 49 HRB untuk proses T4 dan 68,63 HRB. Hasil pengujian yang didapatkan ternyata telah sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa kadar phosphor yang memberikan hasil optimal berada pada rentang 0.003-0.006%<sup>[21]</sup>. Terbentuknya fasa intermetalik dominan yaitu presipitat  $\theta$  ( $Al_2Cu$ ) yang larut setelah mekanisme solution treatment juga memberikan kontribusi terhadap meningkatnya kekerasan<sup>[30]</sup>.

Tetapi jika membandingkan antara nilai kekerasan antara hasil treatment T4 dengan T6, maka nilai kekerasan hasil T6 jauh lebih keras dibandingkan hasil T4. Hal tersebut dikarenakan pada proses T6 dilakukan proses artificial aging yaitu pembentukan presipitat pada temperatur relatif tinggi yaitu pada temperatur 210<sup>0</sup>C, sehingga pembentukan nukleasi presipitat yaitu GP-zone lebih aktif saat temperatur ditingkatkan. Sedangkan proses pembentukan presipitat pada T4 dilakukan dengan proses natural aging dimana pembentukan presipitat dilakukan pada suhu ruang yaitu sekitar 27<sup>0</sup>C. sehingga nukleasi presipitat (GP-zone) membutuhkan waktu yang lama dan besar kemungkinan penyebarannya tidak merata atau jarak antar presipitat terlalu jauh sehingga kontribusi dalam peningkatan kekuatan tidak lebih baik jika dibandingkan menggunakan proses artificial aging.

#### **4.5 PENGARUH FOSFOR TERHADAP KEAUSAN PADUAN Al - Si HIPEREUTEKTIK**

Seperti halnya pengujian kekerasan, pengujian keausan juga dilakukan pada 3 titik yang berbeda untuk setiap sampelnya. Data yang didapatkan dari hasil uji keausan ini adalah besar celah terabrasif. Besar celah yang terabrasif (mm) ini digunakan untuk menentukan volume yang terabrasif. Nilai besar celah terabrasif bisa dilihat pada bagian lampiran. Volume celah terabrasif kemudian digunakan untuk menentukan nilai laju keausan material. Besar laju keausan menentukan ketahanan aus material tersebut. Semakin kecil nilai laju keausan material, maka semakin besar ketahanan aus material tersebut. Sebaliknya, semakin besar nilai laju keausan, maka semakin rendah ketahanan aus material tersebut.



**Gambar 4.4** Grafik laju keausan paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan fosfor pada perlakuan panas yang berbeda.

Data hasil pengujian keausan untuk kelima sample ditampilkan pada tabel 4.4 dan gambar 4.4 Sedangkan contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai laju keausan dijelaskan sbb :

contoh perhitungan laju keausan variable penambahan 0 wt % P (T6)

$\frac{V}{W}$   
 $\frac{\pi r^2 b}{\pi r^2 B}$   
 $\frac{V}{W} = \frac{b}{B}$   
 $V = \frac{b}{B} W$

B = tebal revolving disc (mm)  
 r = jari-jari disc (mm)  
 b = lebar celah material yang terabrasi (mm)  
 W = volume material yang terabrasi  
 V = Laju keausan

Perhitungan untuk variable – variable yang lain dilakukan dengan cara yang sama.

**Tabel 4.4** Tabel data laju aus paduan aluminium hipereutektik dengan penambahan modifier P dan proses perlakuan panas yang berbeda.

Kadar P Target (wt %)	Kadar P Aktual (wt %)	T4	T6
		Laju Aus (mm <sup>3</sup> /mm)	Laju Aus (mm <sup>3</sup> /mm)
0	0	0,0000381	0,0000269
0,003	0,00373	0,0000226	0,0000158
0,004	0,0037	0,0000324	0,0000227
0,005	0,0032	0,000031	0,0000221
0,006	0,0057	0,0000209	0,0000193

Pada gambar 4.4 terlihat bahwa seiring dengan peningkatan fosfor maka laju aus akan menurun, kecuali pada sampel hasil uji T4. Saat komposisi fosfor terbesar yaitu 0,0057% memiliki laju aus yang lebih besar daripada saat komposisi fosfor 0,00373. Hal tersebut bisa disebabkan karena porositas sampel dengan komposisi fosfor 0,0057% sangat tinggi. Dari hasil yang telah didapatkan setelah pengujian keausan, diketahui bahwa sesuai literatur, dengan peningkatan komposisi fosfor maka ketahanan terhadap aus pada paduan aluminium hipereutektik akan meningkat, karena terjadi perubahan morfologi silikon primer serta penyebaran silikon primer yang menjadi lebih baik memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan paduan aluminium hipereutektik. Proses pembentukan presipitasi Al<sub>2</sub>Cu dan Mg<sub>2</sub>Si yang umumnya ada dalam paduan juga berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik paduan aluminium hipereutektik.

Mekanisme penguatan dalam pembentukan partikel presipitat terjadi melalui *precipitate shearing* dan *dislocation bypass*. Dalam *precipitate shearing*, dislokasi bergerak melewati presipitat dengan memotong presipitat tersebut. Mekanisme ini umumnya terjadi pada partikel yang mudah terdeformasi yaitu pada presipitat yang berukuran kecil. Sedangkan pada *dislocation bypass*, dislokasi dapat melewati partikel dengan cara melengkung pada ruang diantara presipitat dan meninggalkan *dislocation loop* disekitar presipitat tersebut. Mekanisme ini umumnya terjadi pada presipitat yang sulit dideformasi dan berukuran besar.

Mekanisme pengerasan yang dihasilkan oleh presipitat tergantung pada dua faktor yaitu ukuran partikel dan jarak antar partikel. Partikel-partikel kecil

yang terdispersi merata pada awal proses pengerasan presipitat, tidak memberikan efek penguatan yang efektif bagi paduan karena partikel tersebut bukan merupakan penghalang yang kuat bagi pergerakan dislokasi. Partikel-partikel besar yang terdispersi secara acak pada waktu pengerasan presipitat yang lama, juga tidak memberikan efek penguatan yang efektif. Hal ini disebabkan karena pada partikel besar, jarak antar partikelnya juga besar, sehingga dislokasi dapat dengan mudah bergerak melalui mekanisme orowan looping.

Umumnya kekuatan paduan akan meningkat dengan peningkatan ukuran partikel selama dislokasi dapat memotong partikel. Jika dislokasi dapat melewati partikel melalui dislocation bypass (orowan looping, peningkatan ukuran partikel akan menurunkan kekuatan paduan, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.20. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi penguatan yang optimum tercapai bila presipitat yang terbentuk memiliki ukuran yang cukup besar namun jarak antar partikelnya rapat (terdispersi merata) sehingga dapat memberikan hambatan yang maksimum terhadap pergerakan dislokasi.

Pada dasarnya keausan didefinisikan sebagai kehilangan material secara progresif atau pemindahan sejumlah material dari suatu permukaan sebagai suatu hasil pergerakan relatif antara permukaan tersebut dan permukaan lainnya<sup>[25]</sup>. Sedangkan kekerasan didefinisikan sebagai ketahanan material terhadap gaya penekanan dari material lain yang lebih keras<sup>[25]</sup>. Oleh sebab itu, semakin keras material, maka semakin sulit pula terjadinya kehilangan material sebagai akibat dari pergerakan relatif cincin terhadap material dalam pengujian keausan.

Adanya silikon sebagai unsur paduan dalam paduan aluminium akan meningkatkan ketahanan aus secara signifikan. Nilai ketahanan pada paduan aluminium semakin meningkat dengan penambahan silikon melebihi komposisi eutektik. Literatur mengatakan bahwa, adanya modifier yang mengubah bentuk silikon primer menjadi lebih halus akan mempengaruhi ketahanan aus paduan aluminium silikon. Karena itu dapat disimpulkan bahwa, perubahan morfologi silikon primer dari yang berbentuk polyhedral yang kasar menjadi lebih halus memberikan pengaruh terhadap peningkatan ketahanan aus material paduan aluminium hipereutektik.

Disamping morfologi silikon primer, keausan juga dipengaruhi oleh unsur – unsur paduan yang terdapat dalam paduan Al-Si. Literatur mengatakan<sup>[25]</sup> bahwa terjadi perubahan perilaku keausan (oksidatif menjadi metalik) dan peningkatan ketahanan aus dengan adanya unsur paduan Cu karena unsur paduan ini memberikan kontribusi dalam peningkatan kekerasan dan kekuatan paduan aluminium silikon sehingga akan meningkatkan ketahanan aus paduan tersebut. Adanya unsur Fe yang membentuk fasa intermetalik  $Al_5FeSi$  yang berdasarkan hasil SEM terlihat semakin halus dan terdistribusi merata dengan peningkatan penambahan fosfor, serta adanya unsur Cu yang membentuk  $Al_2Cu$  semakin tersebar merata dalam paduan aluminium ini turut memberikan kontribusi terhadap peningkatan ketahanan aus material paduan. Selain itu terdapat beberapa faktor luar yang mempengaruhi nilai ketahanan aus material seperti lubrikasi dan penggunaan.

## BAB V KESIMPULAN

1. Peningkatan kadar fosfor yang ditambahkan pada paduan aluminium silikon hipereutektik memberikan pengaruh terhadap perubahan bentuk silikon primer dari poligonal (memiliki daerah bersudut) menjadi *blocky/faceted shape* (lebih bulat) serta menghasilkan distribusi silikon primer yang lebih merata.
2. Peningkatan kadar fosfor ternyata tidak terlalu merubah morfologi silikon eutektik.
3. Proses perlakuan panas (T4 & T6) pada paduan aluminium hipereutektik yang ditambahkan fosfor tidak terlalu mempengaruhi morfologi silikon primer dan silikon eutektik. Karena secara teori proses perlakuan panas hanya akan mempengaruhi pembentukan presipitat  $\text{Al}_2\text{Cu}$  ( $\theta$ ) dan  $\text{Mg}_2\text{Si}$  serta tidak merubah morfologi silikon primer atau silikon eutektik.
4. Nilai kekuatan tarik akan meningkat seiring kenaikan kadar fosfor. Untuk peningkatan komposisi fosfor sebesar 0,0032wt%, 0,00373wt%, 0,0057wt% memiliki kuat tarik berturut-turut 132,48MPa, 165,01MPa, 188,6MPa untuk sampel T4. Sedangkan untuk sampel T6 memiliki kuat tarik dari komposisi fosfor terendah hingga tertinggi 190,43MPa, 206,89MPa, 208,7MPa.
5. Nilai kekerasan paduan aluminium hipereutektik akan meningkat seiring dengan peningkatan kadar fosfor sebesar 0,0032wt%, 0,00373wt%, 0,0057wt% memiliki kuat tarik berturut – turut mulai dari 52,87 HRB, 56,07 HRB, dan 63,23 HRB untuk sampel T4. Sedangkan untuk sampel T6 dengan peningkatan yang sama memiliki nilai kekerasan 67,6 HRB, 70,17 HRB, dan 71 HRB.

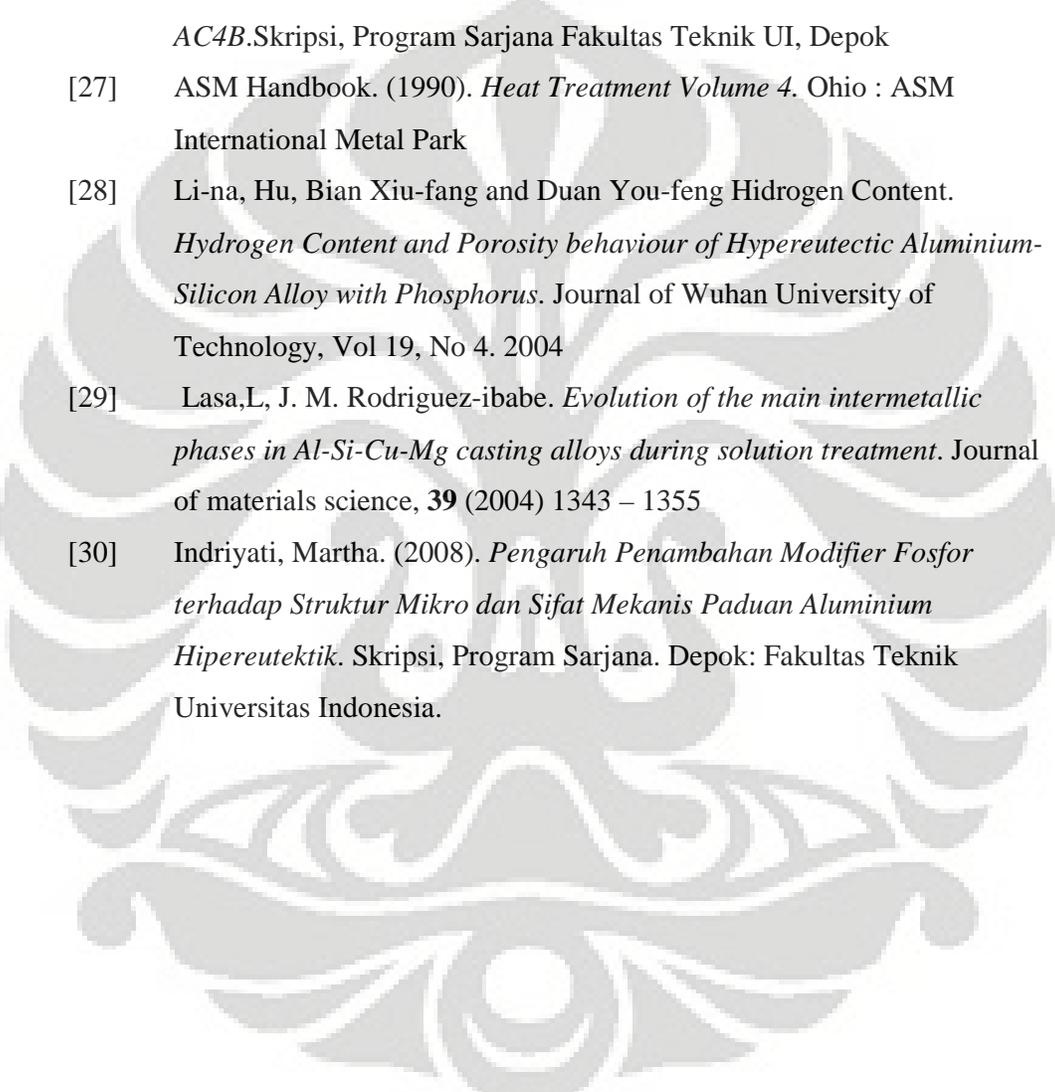
6. Nilai ketahanan aus meningkat seiring dengan peningkatan kadar fosfor sebesar 0,0032wt%, 0,00373wt%, 0,0057wt% yang ditambahkan ke dalam paduan aluminium hipereutektik yaitu secara berturut turut dari komposisi fosfor terendah memiliki laju aus  $3,1 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$ ,  $2,26 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$ ,  $2,09 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$  untuk sampel T4 sedangkan dengan peningkatan komposisi fosfor yang sama untuk sampel T6 memiliki laju aus  $2,21 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$ ,  $1,58 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$ ,  $1,93 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$ .



## DAFTAR REFERENSI

- [1] Wikipedia, Hypereutectic piston. Februari 11, 2009  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Hypereutectic\\_piston](http://en.wikipedia.org/wiki/Hypereutectic_piston)>
- [2] Prof. Altenpohl. (1982). *Aluminium Verlag*. Dusseldorf.
- [3] JIS Handbook. *Non-Ferrous Metals and Metallurgy*. Japanese Standards Association. Tokyo. 1997.
- [4] Hatch, John E. *Aluminium : Properties and Physical Metallurgy*. ASM Metal Park. Ohio. 2001
- [5] Kaufman, J Gilbert and Elwin L Rooy. *Aluminium Alloy Casting: Properties, Processes and Application*. ASM International 2004
- [6] ASM Handbook. (1990). *Metallography and microstruktur Volume 9*. Ohio : ASM International Metal Park
- [7] Metallurg Aluminum. *Modification of Aluminium Silicon Foundry Alloys*. Februari 11, 2009.  
[http://metallurgical.com/Downloads/tech\\_paper\\_pdfs/Guide\\_Modif\\_AISi\\_Alloys.df](http://metallurgical.com/Downloads/tech_paper_pdfs/Guide_Modif_AISi_Alloys.df)
- [8] Askeland, Ronald R. & Phule, Pradeep P. *The Science and Engineering of Materials 4<sup>th</sup> edition: Principles of Solidification*. Februari 11, 2009.  
[http://www.ccm.udel.edu/Personnel/homepage/class\\_web/Lecture%20Notes/2004/AskelandPhuleNotes-CH08Printable.ppt](http://www.ccm.udel.edu/Personnel/homepage/class_web/Lecture%20Notes/2004/AskelandPhuleNotes-CH08Printable.ppt)
- [9] Suharno, Bambang. (2007). *Slide Kuliah: Pengecoran Logam*. Depok. Departemen Metalurgi dan Material UI
- [10] Polmear, I.J. (2006). *Light Alloys : Metallurgy of the Light Metals*
- [11] ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection : Non-Ferrous Alloy and Special Purpose Material Volume 2*. Ohio : ASM International Metal Park
- [12] Isakov, Edmund. (2008, Mei ). *Understanding the Composition of Cast Aluminum Alloys Can Increase Machining Productivity*. Cutting Tool Engineering Magazine Vol.60 Issue 2, Maret, 2009

- [13] Hegde, Sathyapal dan K. Narayan Prabhu. *Modification of eutectic silicon in Al–Si alloys*. Journal of Materials Science. Department of Metallurgical & Materials Engineering, National Institute of Technology Karnataka, India. 2007
- [14] Guthy, Hema V. “*Evolution of Eutectic Microstructure in Chemically Modified and Unmodified Aluminium Silicon Alloy*”. Thesis. Worcester Polytechnic Institute, 2002
- [15] Song, Xigui, et al, ed. “*Effect AlP Master Alloy on Grain Refinement of Primary Silicon in Eutectic Al-Si Alloy*”. Journal of University of Science and Technology Beijing. Volume 11, Number 1, February 2004, Page 81
- [16] K.M, Kim, Kwon I.S., Lee C.H., dan Yoon E.P. *Effect Of Phosphorus on Modification of Eutectic Silicon in Al–7Si–0.3Mg Alloy*. [Materials Science and Technology](#), Vol. 16, No. 3, Maret 2000 , hal. 243-248(6)
- [17] Suárez-Peña, B, et al,ed. *Microstructural Effects of Phosphorus on Pressure Die cas Al-12 Si Components*. Revista De Metalurgia, 2007
- [18] Dwivedi, Dheerendra Kumar, A. Sharma, T.V. Rajan. *Influence of Silicon Morphology and Mechanical properties of Piston Alloy*. Taylor & Francis : Materials and Manufacturing Process. 10 September 2005
- [19] Campbell, John and Richard A. Harding. *The Freezing of Casting*. European Aluminium Association, 1994.
- [20] Donahue, Raymond, William G. Hesterberg, Terrance M. Cleary. *Hypereutectic Aluminium Silicon Alloy Having Refined Primary Silicon and Modified Eutectic*. United States Patent, 1993.
- [21] Gruzlesld, John dan Bernard Closset, *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*. USA : American Foundrymen's Society Inc. 1990
- [22] Modification and Refinement Phosphorus <[www. keysteelmatal.com](http://www.keysteelmatal.com)>
- [23] Ervik Rinaldi. Pengaruh Paduan AC8A, AC9A, AC9B dan Waktu Tahan terhadap Ukuran Partikel Si-Primer dan Kekerasan dengan Penambahan Fosfor pada Pembuatan Piston. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok 1995

- 
- [24] Ying, Zhang. *Transformation of Microstructure After Modification of A390Alloy*. Science Press. 10 Sept 2007
- [25] Cisse, J. *Simultaneous Refinement of Primary and Eutectic Silicon in Hypereutectic Al-Si Alloy*. Metallurgical Transaction B. Volume 6B, March 1975-95
- [26] Juwita, Ratna. ( ). *Perlakuan panas pada paduan aluminium AC4B*. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok
- [27] ASM Handbook. (1990). *Heat Treatment Volume 4*. Ohio : ASM International Metal Park
- [28] Li-na, Hu, Bian Xiu-fang and Duan You-feng Hydrogen Content. *Hydrogen Content and Porosity behaviour of Hypereutectic Aluminium-Silicon Alloy with Phosphorus*. Journal of Wuhan University of Technology, Vol 19, No 4. 2004
- [29] Lasa, L, J. M. Rodriguez-ibabe. *Evolution of the main intermetallic phases in Al-Si-Cu-Mg casting alloys during solution treatment*. Journal of materials science, **39** (2004) 1343 – 1355
- [30] Indriyati, Martha. (2008). *Pengaruh Penambahan Modifier Fosfor terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Paduan Aluminium Hipereutektik*. Skripsi, Program Sarjana. Depok: Fakultas Teknik Universitas Indonesia.



**LAMPIRAN A**  
**HASIL UJI KOMPOSISI KIMIA**

Hasil Uji Komposisi Kimia Variasi Penambahan Fosfor 0,00373 wt %

Program: AI-AC8A		125827/08		03/13/2009 02:33:53 PM				
Comment: SS 336 AC				Channels: Matrix Corr. Concentration				
Single spark(s)								
Sample No: AC8A-0,003 P			Quality: Melting JIS H-5202 (AC8A)					
Sample Id:								
No	Si251_2	Si251_1	Si390_2a	Si390_1	Fe259_2	Fe371_2	Fe371_1	Cu324_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	*11.4316	*14.2914	15.0463	*15.2234	0.3299	*0.3171	*0.2609	>0.4800
2	*11.0462	*14.1597	14.7675	*14.6702	0.3367	*0.3330	*0.2957	>0.4800
3	*11.1918	*14.1233	14.8398	*14.7182	0.3291	*0.3184	*0.2510	>0.4800
No	Cu324_3	Cu510_1	Mn293_2	Mn294_2	Mg279_1	Mg285_2	Mg382_1	Cr267_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	>0.1200	1.3311	*0.0412	0.0381	>0.6000	>0.1440	1.0533	0.0884
2	>0.1200	1.4565	*0.0423	0.0391	>0.6000	>0.1440	1.1175	0.0898
3	>0.1200	1.2941	*0.0404	0.0376	>0.6000	>0.1440	1.0086	0.0862
No	Cr425_3	Ni352_2	Ni352_3	Zn334_2	Zn334_3	Zn334_1	Ti499_2	Ti499_3
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	>0.1200	0.8851	0.7954	*0.0373	0.0491	*0.0178	0.0349	0.1035
2	>0.1200	0.9358	~0.9203	*0.0374	0.0525	*0.0193	0.0346	0.1020
3	>0.1200	0.8808	~0.8324	*0.0361	0.0503	*0.0156	0.0347	0.1033
No	Be313_2	Bi306_2	Bi306_3	Ca396_2	Cd228_2	Ce413_3	Co345_2	Co345_3
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0001	-0.0047	0.0019	0.0088	0.0019	-0.0086	-0.0046	-0.0019
2	0.0001	-0.0046	0.0019	0.0088	0.0016	-0.0087	-0.0045	-0.0016
3	0.0001	-0.0050	0.0020	0.0089	0.0019	-0.0088	-0.0050	-0.0017
No	Ga417_3	Li670_3	Na588_2	Na588_3	P178_3	Pb405_2	Pb405_3	Sb15X_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0109	*0.0001	*0.0001	*0.0001	0.0040	*0.0164	0.0141	-0.0001
2	0.0121	*0.0001	*0.0001	*0.0001	0.0034	*0.0168	0.0160	-0.0002
3	0.0113	*0.0001	*0.0001	*0.0001	0.0038	*0.0155	0.0147	*0.0002
No	Sn317_2	Sn317_3	Sr460_3	V311_2	Zr343_2	Al226_2	Al226_3	Al283_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	-0.0023	0.0038	0.0006	0.0137	0.0013	81.0481	<81.0481	81.0481
2	-0.0027	0.0047	0.0006	0.0137	0.0014	81.0755	<81.0755	81.0755
3	-0.0031	0.0043	0.0005	0.0137	0.0012	81.3418	<81.3418	81.3418
No	Al283_3	Al306_2	Al306_3	Al306_1	Al306_2b	Al669_2	Al669_3	Bg180_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	81.0481	81.0481	81.0481	81.0481	81.0481	81.0481	81.0481	81.0481
2	81.0755	81.0755	81.0755	81.0755	81.0755	81.0755	81.0755	81.0755
3	81.3418	81.3418	81.3418	81.3418	81.3418	81.3418	81.3418	81.3418
No	Bg180_3							
	%							
1	81.0481							
2	81.0755							
3	81.3418							

## Hasil Uji Komposisi Kimia Variasi Penambahan Fosfor 0,0037 wt %

Program: AI-AC8A		125827/08		03/13/2009 02:29:56 PM				
Comment: SS 336 AC				Channels: Matrix Corr. Concentration				
Single spark(s)								
Sample No: AC8A-0,004 P		Quality: Melting JIS H-5202 (AC8A)						
Sample Id:								
No	Si251_2	Si251_1	Si390_2a	Si390_1	Fe259_2	Fe371_2	Fe371_1	Cu324_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	*11.3112	*14.0618	14.7286	*14.3800	0.3130	*0.3162	*0.2426	>0.4800
2	*10.6872	*14.1140	14.6627	*14.7011	0.3115	*0.3098	*0.2648	>0.4800
3	*10.6400	*13.9779	14.1625	*14.6604	0.3183	*0.3079	*0.2486	>0.4800
No	Cu324_3	Cu510_1	Mn293_2	Mn294_2	Mg279_1	Mg285_2	Mg382_1	Cr267_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	>0.1200	1.3760	*0.0392	0.0368	>0.6000	>0.1440	1.0284	0.0764
2	>0.1200	1.4704	*0.0387	0.0364	>0.6000	>0.1440	1.1011	0.0740
3	>0.1200	1.4409	*0.0400	0.0374	>0.6000	>0.1440	1.0777	0.0744
No	Cr425_3	Ni352_2	Ni352_3	Zn334_2	Zn334_3	Zn334_1	Ti499_2	Ti499_3
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	>0.1200	0.8577	0.7717	*0.0361	0.0474	*0.0171	0.0401	0.1184
2	>0.1200	0.8419	0.8165	*0.0339	0.0472	*0.0193	0.0396	0.1175
3	>0.1200	0.8371	0.8137	*0.0336	0.0479	*0.0183	0.0395	0.1176
No	Be313_2	Bi306_2	Bi306_3	Ca396_2	Cd228_2	Ce413_3	Co345_2	Co345_3
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0001	-0.0052	0.0019	0.0083	0.0014	-0.0090	-0.0046	-0.0018
2	0.0001	-0.0055	0.0019	0.0077	0.0015	-0.0103	-0.0052	-0.0020
3	0.0001	-0.0052	0.0016	0.0079	0.0018	-0.0112	-0.0051	-0.0021
No	Ga417_3	Li670_3	Na588_3	Na588_3	P178_3	Pb405_2	Pb405_3	Sb15X_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0113	*0.0001	*0.0001	*0.0000	0.0028	*0.0164	0.0140	*0.0001
2	0.0115	*0.0001	*0.0001	*0.0000	0.0049	*0.0151	0.0142	*0.0006
3	0.0115	*0.0001	*0.0000	*0.0000	0.0034	*0.0150	0.0141	*0.0004
No	Sn317_2	Sn317_3	Sr460_3	V311_2	Zr343_2	Al226_2	Al226_3	Al283_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	-0.0017	0.0045	0.0005	0.0136	0.0014	81.3966	<81.3966	81.3966
2	-0.0025	0.0045	0.0005	0.0135	0.0011	81.3142	81.3142	81.3142
3	-0.0007	0.0049	0.0005	0.0138	0.0010	81.8643	<81.8643	81.8643
No	Al283_3	Al306_2	Al306_3	Al306_1	Al306_2b	Al669_2	Al669_3	Bg180_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	81.3966	81.3966	81.3966	81.3966	81.3966	81.3966	81.3966	81.3966
2	81.3142	81.3142	81.3142	81.3142	81.3142	81.3142	81.3142	81.3142
3	81.8643	81.8643	81.8643	81.8643	81.8643	81.8643	81.8643	81.8643
No	Bg180_3							
	%							
1	81.3966							
2	81.3142							
3	81.8643							

Hasil Uji Komposisi Kimia Variasi Penambahan Fosfor 0,0032 wt %

Program: AI-AC8A		125827/08		03/13/2009 02:23:19 PM				
Comment: SS 336 AC				Channels: Matrix Corr. Concentration				
Single spark(s)								
Sample No: AC8A-0,005 P			Quality: Melting JIS H-5202 (AC8A)					
Sample Id:								
No	Si251_2	Si251_1	Si390_2a	Si390_1	Fe259_2	Fe371_2	Fe371_1	Cu324_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	*10.5632	*13.9079	14.6589	*14.4724	0.3419	*0.3568	*0.2903	>0.4800
2	*10.6277	*13.9207	14.9808	*14.6815	0.3037	*0.3080	*0.2443	>0.4800
3	*10.9113	*14.0427	14.9118	*14.6401	0.3189	*0.3243	*0.2596	>0.4800
No	Cu324_3	Cu510_1	Mn293_2	Mn294_2	Mg279_1	Mg285_2	Mg382_1	Cr267_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	>0.1200	1.6538	*0.0410	0.0383	>0.6000	>0.1440	1.1518	0.0784
2	>0.1200	1.4808	*0.0366	0.0344	>0.6000	>0.1440	1.0449	0.0723
3	>0.1200	1.5218	*0.0371	0.0350	>0.6000	>0.1440	1.0706	0.0726
No	Cr425_3	Ni352_2	Ni352_3	Zn334_2	Zn334_3	Zn334_1	Ti499_2	Ti499_3
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	>0.1200	0.8735	0.7822	*0.0358	0.0471	*0.0186	0.0450	0.1339
2	>0.1200	0.7633	0.7528	*0.0338	0.0463	*0.0173	0.0473	0.1417
3	>0.1200	0.7984	0.7205	*0.0333	0.0451	*0.0181	0.0468	0.1391
No	Be313_2	Bi306_2	Bi306_3	Ca396_2	Cd228_2	Ce413_3	Co345_2	Co345_3
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0001	-0.0057	0.0018	0.0073	0.0017	-0.0087	-0.0045	-0.0016
2	0.0001	-0.0054	0.0018	0.0069	0.0019	-0.0083	-0.0047	-0.0018
3	0.0001	-0.0059	0.0020	0.0073	0.0016	-0.0089	-0.0046	-0.0019
No	Ga417_3	Li670_3	Na588_2	Na588_3	P178_3	Pb405_2	Pb405_3	Sb15X_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0122	*0.0001	*0.0001	*0.0001	0.0030	*0.0172	0.0148	-0.0012
2	0.0116	*0.0001	*0.0001	*0.0001	0.0030	*0.0160	0.0140	*0.0018
3	0.0116	*0.0001	*0.0001	*0.0001	0.0036	*0.0159	0.0138	*0.0002
No	Sn317_2	Sn317_3	Sr460_3	V311_2	Zr343_2	Al226_2	Al226_3	Al283_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	-0.0009	0.0053	0.0005	0.0134	0.0015	80.9900	<80.9900	80.9900
2	-0.0013	0.0051	0.0005	0.0130	0.0012	81.1180	<81.1180	81.1180
3	-0.0021	0.0049	0.0005	0.0131	0.0012	81.0730	<81.0730	81.0730
No	Al283_3	Al306_2	Al306_3	Al306_1	Al306_2b	Al669_2	Al669_3	Bg180_2
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	80.9900	80.9900	80.9900	80.9900	80.9900	80.9900	80.9900	80.9900
2	81.1180	81.1180	81.1180	81.1180	81.1180	81.1180	81.1180	81.1180
3	81.0730	81.0730	81.0730	81.0730	81.0730	81.0730	81.0730	81.0730
No	Bg180_3							
	%							
1	80.9900							
2	81.1180							
3	81.0730							

Hasil Uji Komposisi Kimia Variasi Penambahan Fosfor 0,0057 wt %

Program: AI-AC8A  
 Comment: SS 336 AC  
 Single spark(s)

125827/08  
 Channels: Matrix Corr. Concentration

03/13/2009 02:37:45 PM

Sample No: AC8A-0,006 P  
 Sample Id:  
 Quality: Melting JIS H-5202 (AC8A)

No	Si251_2 %	Si251_1 %	Si390_2a %	Si390_1 %	Fe259_2 %	Fe371_2 %	Fe371_1 %	Cu324_2 %
1	*10.6371	*13.8007	14.5606	*14.3659	0.3100	*0.3066	*0.2443	>0.4800
2	*10.4003	*13.4784	14.5277	*14.2671	0.3198	*0.3200	*0.2561	>0.4800
3	*10.3261	*13.8935	14.4836	*14.3529	0.3101	*0.3145	*0.2455	>0.4800

No	Cu324_3 %	Cu510_1 %	Mn293_2 %	Mn294_2 %	Mg279_1 %	Mg285_2 %	Mg382_1 %	Cr267_2 %
1	>0.1200	1.6227	*0.0343	0.0326	>0.6000	>0.1440	1.0422	0.0672
2	>0.1200	1.6647	*0.0345	0.0327	>0.6000	>0.1440	1.0710	0.0667
3	>0.1200	1.6167	*0.0350	0.0329	>0.6000	>0.1440	1.0359	0.0679

No	Cr425_3 %	Ni352_2 %	Ni352_3 %	Zn334_2 %	Zn334_3 %	Zn334_1 %	Ti499_2 %	Ti499_3 %
1	>0.1200	0.7047	0.6657	*0.0314	0.0438	*0.0158	0.0549	0.1638
2	>0.1200	0.7129	0.6620	*0.0315	0.0436	*0.0167	0.0545	0.1647
3	>0.1200	0.7258	0.6700	*0.0321	0.0427	*0.0156	0.0555	0.1685

No	Be313_2 %	Bi306_2 %	Bi306_3 %	Ca396_2 %	Cd228_2 %	Ce413_3 %	Co345_2 %	Co345_3 %
1	0.0001	-0.0055	0.0022	0.0060	0.0015	-0.0087	-0.0046	-0.0019
2	0.0001	-0.0056	0.0019	0.0062	0.0016	-0.0091	-0.0046	-0.0020
3	0.0001	-0.0057	0.0019	0.0056	0.0015	-0.0095	-0.0047	-0.0018

No	Ga417_3 %	Li670_3 %	Na588_2 %	Na588_3 %	P178_3 %	Pb405_2 %	Pb405_3 %	Sb15X_2 %
1	0.0123	*0.0001	0.0001	0.0001	0.0071	*0.0159	0.0141	*0.0004
2	0.0123	*0.0001	0.0001	*0.0001	0.0050	*0.0157	0.0138	*0.0017
3	0.0122	*0.0001	*0.0001	*0.0001	0.0049	*0.0157	0.0136	*0.0005

No	Sn317_2 %	Sn317_3 %	Sr460_3 %	V311_2 %	Zr343_2 %	Al226_2 %	Al226_3 %	Al283_2 %
1	-0.0008	0.0057	0.0004	0.0127	0.0011	81.4431	<81.4431	81.4431
2	-0.0008	0.0056	0.0004	0.0128	0.0010	81.3885	<81.3885	81.3885
3	-0.0013	0.0058	0.0003	0.0128	0.0011	81.5120	<81.5120	81.5120

No	Al283_3 %	Al306_2 %	Al306_3 %	Al306_1 %	Al306_2b %	Al669_2 %	Al669_3 %	Bg180_2 %
1	81.4431	81.4431	81.4431	81.4431	81.4431	81.4431	81.4431	81.4431
2	81.3885	81.3885	81.3885	81.3885	81.3885	81.3885	81.3885	81.3885
3	81.5120	81.5120	81.5120	81.5120	81.5120	81.5120	81.5120	81.5120

No	Bg180_3 %
1	81.4431
2	81.3885
3	81.5120

Program: AI-AC8A  
 Comment: SS 336 AC  
 Single spark(s)

125827/08  
 Channels: Matrix Corr. Concentration

03/13/2009 02:37:45 PM



**LAMPIRAN B**  
**HASIL UJI KEKERASAN**  
**&**  
**UJI KEAUSAN**

**Data mentah hasil pengujian kekerasan sample aluminium hipereutektik dengan perlakuan panas T4**

Kadar P Target (wt %)	Kadar P Aktual (wt %)	Kekerasan (HRB)			Hardness Average (HRB)
		I	II	III	
0	0	48,8	49,9	48,1	49
0,003	0.00373	55,3	56,8	56,4	56.07
0,004	0.0037	52,6	54,5	54,4	53.83
0,005	0.0032	50,5	54,5	53,6	52.87
0,006	0.0057	63,8	63,7	62,2	63.23

**Data mentah hasil pengujian kekerasan sample aluminium hipereutektik dengan perlakuan panas T6**

Kadar P Target (wt %)	Kadar P Aktual (wt %)	Kekerasan (HRB)			Hardness Average (HRB)
		I	II	III	
0	0	67,5	69,2	69,2	68.63
0,003	0.00373	70,9	70,9	68,7	70.17
0,004	0.0037	68,3	68,6	67,7	68.2
0,005	0.0032	67,1	67,9	67,8	67.6
0,006	0.0057	71,2	70,6	71,2	71

**Data mentah hasil pengujian keausan sample aluminium hipereutektik relatif dengan perlakuan panas T4**

Kadar P Target (wt %)	Kadar P Aktual (wt %)	Lebar Celah Terabrasi b (mm)			Rata - rata b	Volume Terabrasi (mm <sup>3</sup> )	Laju Aus (mm <sup>3</sup> /mm)
		b1	b2	b3			
0	0	5,358	5,378	5,583	5,44	2,69	0.0000269
0,003	0,00373	4,882	4,662	4,136	4,56	1,58	0.0000158
0,004	0,00370	5,736	4,829	4,857	5,14	2,27	0.0000227
0,005	0,00320	5,172	4,910	5,232	5,10	2,21	0.0000221
0,006	0,00570	5,245	4,849	4,506	4,87	1,93	0.0000193

**Data mentah hasil pengujian keausan sample aluminium hipereutektik relatif dengan perlakuan panas T6**

Kadar P Target (wt %)	Kadar P Aktual (wt %)	Lebar Celah Terabrasi b (mm)			Rata - rata b	Volume Terabrasi (mm <sup>3</sup> )	Laju Aus (mm <sup>3</sup> /mm)
		b1	b2	b3			
0	0	6,027	6,163	6,144	6,11	3,81	0.0000381
0,003	0,00373	4,755	5,401	5,271	5,14	2,26	0.0000226
0,004	0,00370	5,614	6,027	5,722	5,79	3,24	0.0000324
0,005	0,00320	5,941	5,71	5,434	5,70	3,10	0.000031
0,006	0,00570	4,937	4,949	5,143	5,00	2,09	0.0000209



**LAMPIRAN C**  
**HASIL PENGUJIAN KEKUATAN**  
**TARIK**

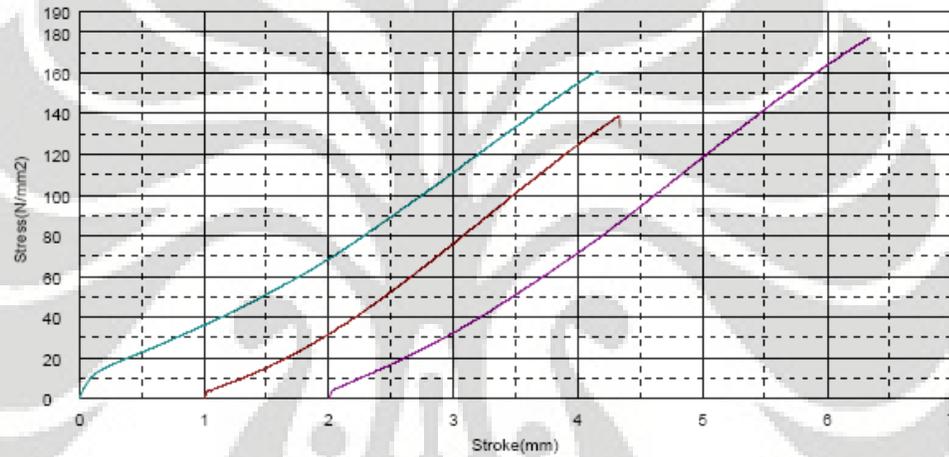
Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor 0 wt % dengan perlakuan panas T4

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0% - T4

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000
3 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm2	%
1 - 1	24792.2	161.053	0.20000
2 - 1	21407.8	139.068	0.10000
3 - 1	27256.3	177.060	0.81667



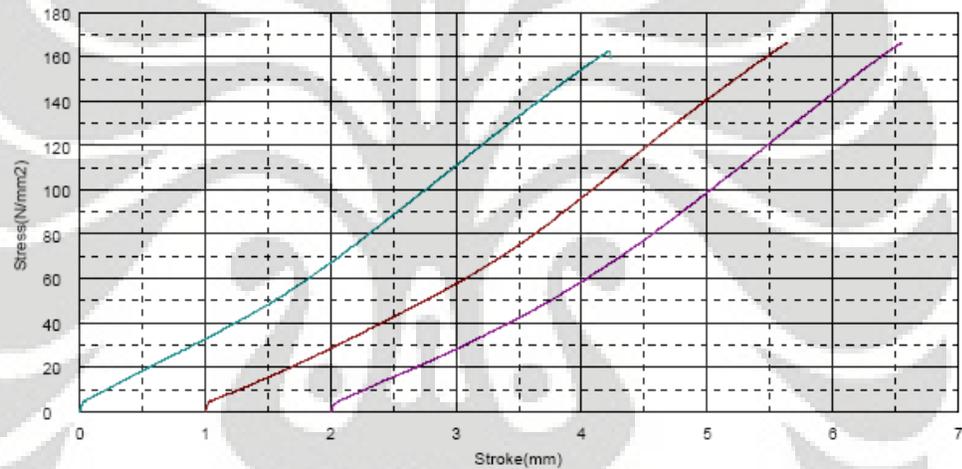
Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor  
 0,003 wt % (aktual 0,00373wt%) dengan perlakuan panas T4

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0.003% P - T4

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000
3 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm <sup>2</sup>	%
1 - 1	25043.8	162.687	1.00000
2 - 1	25554.7	166.006	0.91667
3 - 1	25604.7	166.331	1.30000



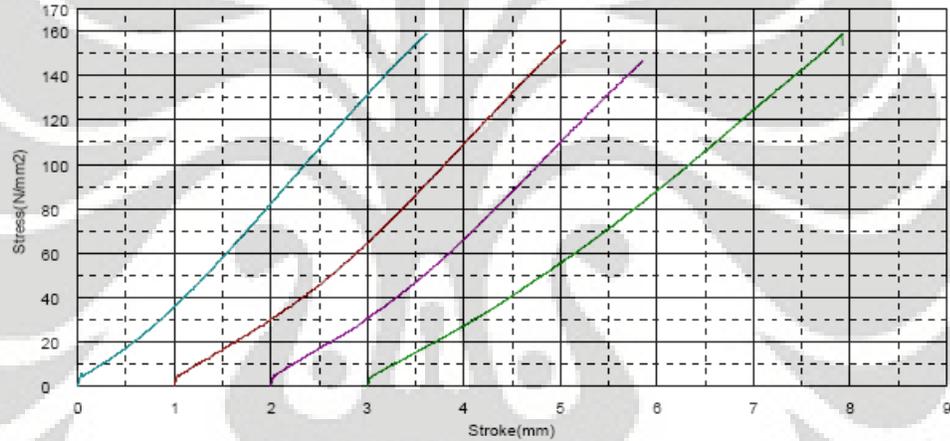
Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor  
 0,004 wt % (aktual 0,0037wt%) dengan perlakuan panas T4

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0.004% P - T4

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000
3 - 1	14.0000	60.0000
4 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm2	%
1 - 1	24460.9	158.901	0.65000
2 - 1	24056.3	156.272	0.50000
3 - 1	22565.6	146.589	0.26333
4 - 1	24428.1	158.688	0.40000



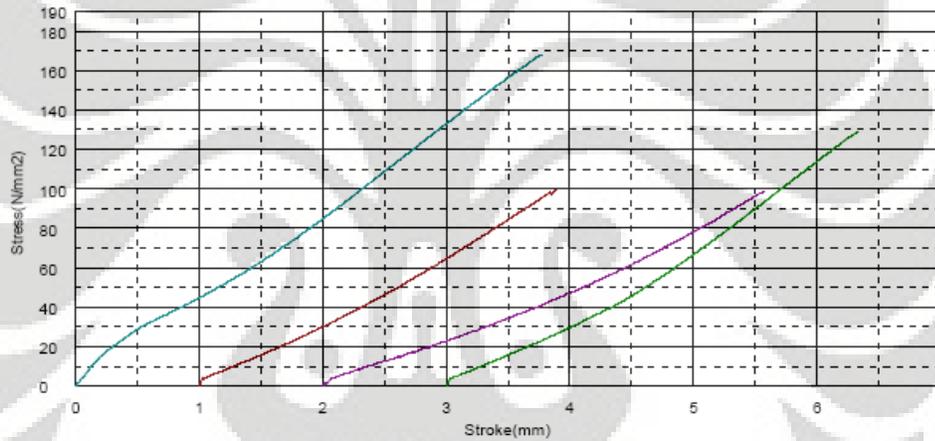
Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor  
 0,005 wt % (aktual 0,0032wt%) dengan perlakuan panas T4

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0.005% P - T4

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000
3 - 1	14.0000	60.0000
4 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max_Force	Max_Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm2	%
1 - 1	25910.9	168.321	0.33333
2 - 1	15382.5	99.9266	0.53333
3 - 1	15236.9	98.9806	0.50000
4 - 1	19889.1	129.202	0.30000



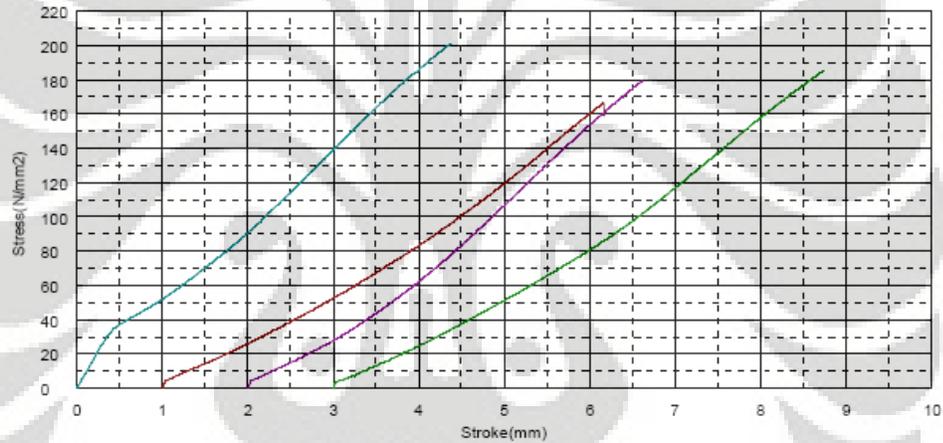
Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor  
 0,006 wt % (aktual 0,0057wt%) dengan perlakuan panas T4

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0.006% P - T4

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000
3 - 1	14.0000	60.0000
4 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max_Force	Max_Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm2	%
1 - 1	30964.1	201.146	1.10000
2 - 1	25626.6	166.473	0.51667
3 - 1	27607.8	179.344	0.50000
4 - 1	28526.6	185.312	0.80000



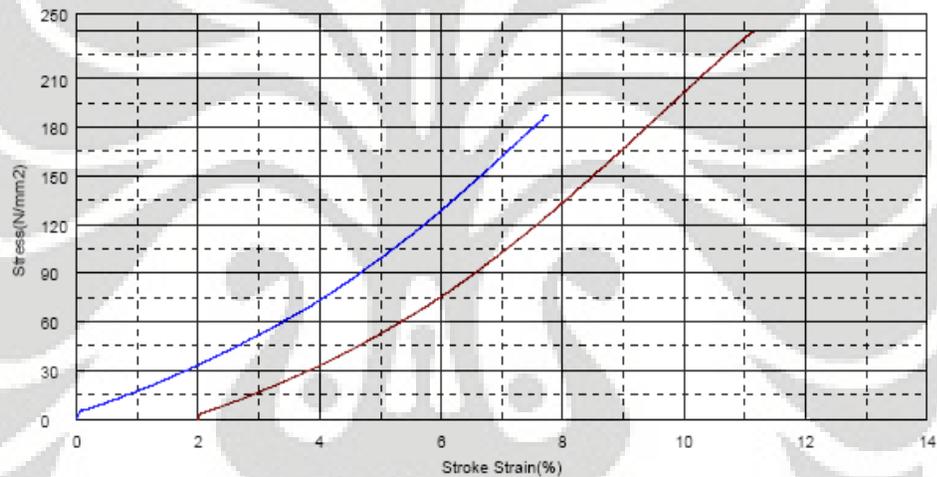
Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor 0 wt % dengan perlakuan panas T6

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0% - T6

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm <sup>2</sup>	%
1 - 1	28971.9	188.205	1.00000
2 - 1	36846.9	239.362	0.96667



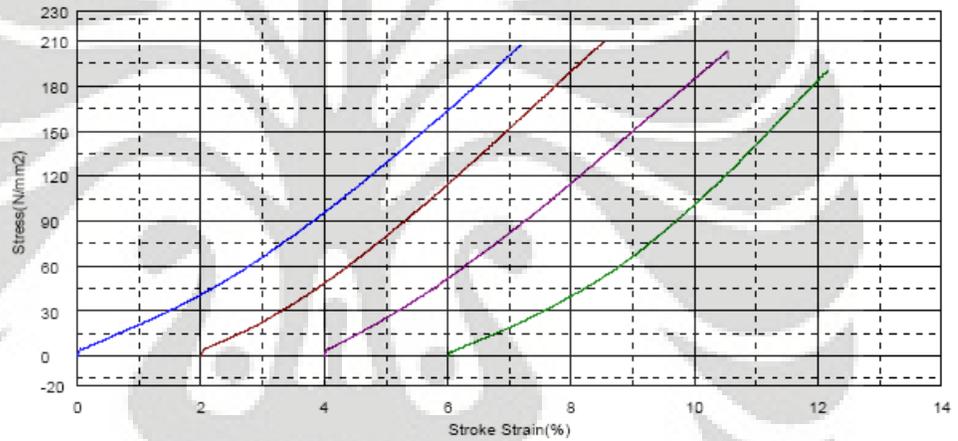
Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor  
 0,003 wt % (aktual 0,00373wt%) dengan perlakuan panas T6

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0.003% P - T6

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000
3 - 1	14.0000	60.0000
4 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max_Force	Max_Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm2	%
1 - 1	31964.1	207.642	1.00000
2 - 1	32234.4	209.398	0.96667
3 - 1	31345.3	203.623	1.63333
4 - 1	29287.5	190.255	0.26667



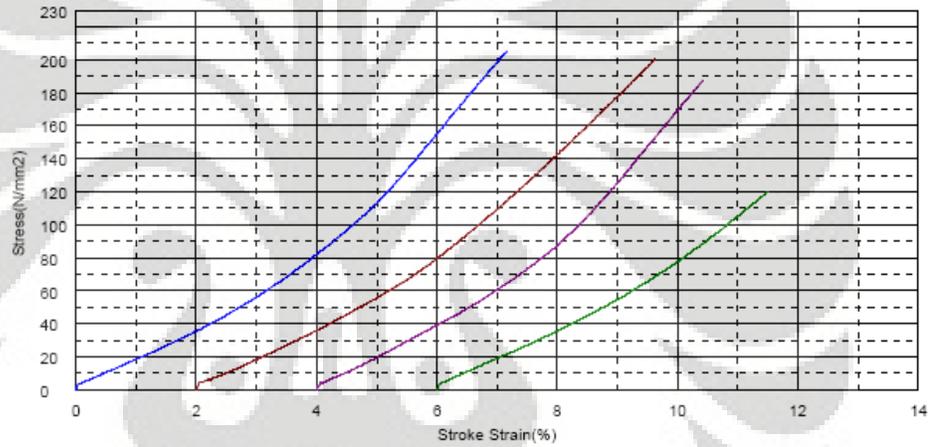
**Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor  
0,004 wt % (aktual 0,0037wt%) dengan perlakuan panas T6**

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0.004% P - T6

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000
3 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max Force	Max Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm2	%
1 - 1	31648.4	205.592	1.00000
2 - 1	30860.9	200.476	0.96687
3 - 1	28851.6	187.423	1.63333



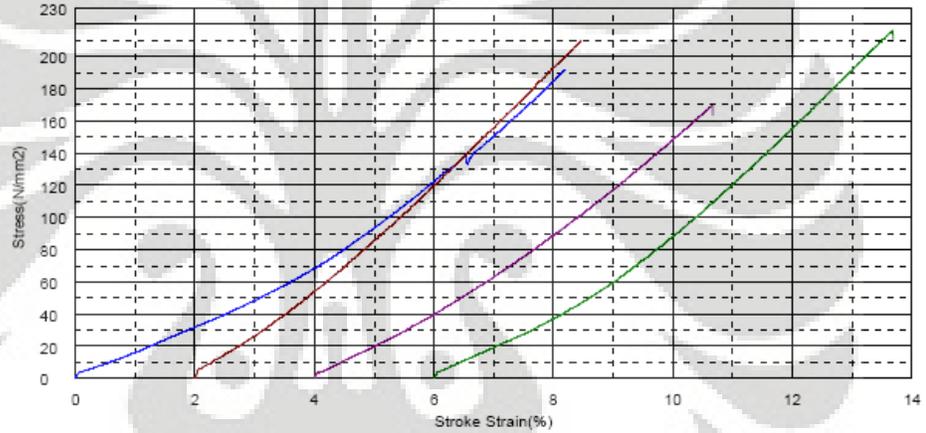
Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor  
 0,005 wt % (aktual 0,0032wt%) dengan perlakuan panas T6

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0.005% Sr - T6

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000
3 - 1	14.0000	60.0000
4 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max. Force	Max. Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm2	%
1 - 1	29509.4	191.696	1.00000
2 - 1	32278.1	209.683	0.96667
3 - 1	26157.8	169.924	1.63333
4 - 1	33303.1	216.341	0.26667



Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor  
 0,006 wt % (aktual 0,0057wt%) dengan perlakuan panas T6

## TENSILE TEST AC8A HYPER - 0.006% P - T6

Shape: Rod

	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	60.0000
2 - 1	14.0000	60.0000
3 - 1	14.0000	60.0000
4 - 1	14.0000	60.0000

Name	Max_Force	Max_Stress	ELONGATION
Units	N	N/mm2	%
1 - 1	35600.0	231.262	1.00000
2 - 1	32778.1	212.931	0.96667
3 - 1	28001.6	181.902	1.63333
4 - 1	16510.0	107.251	0.26667

