



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN *MODIFIER* FOSFOR  
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK  
PADUAN ALUMINIUM AC8A HIPEREUTEKTIK**

SKRIPSI

Martha Indriyati  
0405040465

FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
DESEMBER 200



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN *MODIFIER* FOSFOR  
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK  
PADUAN ALUMINIUM AC8A HIPEREUTEKTIK**

**SKRIPSI**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Martha Indriyati  
0405040465

FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
DESEMBER 2008

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Martha Indriyati**  
**NPM : 0405040465**

**Tanda Tangan : .....**  
**Tanggal : 24 Desember 2008**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Martha Indriyati  
NPM : 0405040465  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan Modifier Fosfor terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Paduan Aluminium AC8A Hipereutektik

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.-Ing.Ir. Bambang Suharno (.....)  
Penguji 1 : Dr.Ir.Sri Harjanto (.....)  
Penguji 2 : Dwi Marta Nurjaya, ST, MT (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Desember 2008

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**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**

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 : Martha Indriyati  
NPM : 0405040465  
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 terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Paduan Aluminium AC8A Hipereutektik**

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 : 24 Desember 2008  
Yang menyatakan

(Martha Indriyati)

## ABSTRAK

Nama : Martha Indriyati  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Pengaruh Penambahan Modifier Fosfor terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Paduan Aluminium AC8A Hipereutektik

Karena sifatnya yang menarik seperti ketahanan aus yang tinggi, koefisien ekspansi termal yang rendah, ketahanan korosi yang baik serta kemampuan cor yang baik, paduan aluminium – silikon hipereutektik telah menjadi suatu kandidat material untuk aplikasi – aplikasi yang membutuhkan sifat mekanis yang baik seperti piston. Walaupun demikian, paduan ini memiliki kekurangan yaitu paduan akan semakin bertambah *brittle* seiring dengan bertambahnya kandungan silikon dikarenakan oleh adanya silikon primer yang kasar. Terdapat berbagai cara untuk meminimalkan ukuran dari fasa silikon salah satunya adalah modifikasi dengan penambahan modifier.

Pada penelitian ini, material AC8A didesain pada kondisi hipereutektik. Modifier fosfor ditambahkan dengan komposisi 0,0025 wt%, 0,0027 wt %, 0,0038 wt %, 0,0046 wt % dan 0,0061 wt % P. Untuk mengetahui sifat mekanis material, dilakukan pengujian kekuatan tarik, kekerasan serta keausan. Pengujian struktur mikro, SEM dan EDAX dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro serta fasa – fasa yang terbentuk dalam paduan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fosfor pada material AC8A hipereutektik akan mengubah morfologi dan ukuran silikon primer dari yang berbentuk poligonal dan kasar menjadi berbentuk *blocky* dan halus. Silikon eutektik juga mengalami perubahan karena pertumbuhannya yang berasal dari ujung silikon primer dan dipengaruhi oleh morfologi dan ukuran silikon primer. Silikon eutektik berubah dari jarum – jarum halus yang panjang menjadi batangan pendek dan seperti titik dengan panjang rata – rata yang lebih pendek. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan, dengan bertambahnya kadar fosfor (0,0025 wt%, 0,0027 wt %, 0,0038 wt %, 0,0046 wt % dan 0,0061 wt %), kekerasan akan meningkat dari 38 HRB menjadi 39 HRB, 40 HRB, 41 HRB dan 42 HRB. Peningkatan juga terjadi pada nilai ketahanan aus material. Sedangkan nilai kekuatan tarik tidak menunjukkan kecenderungan tertentu dikarenakan terdapatnya porositas pada sampel.

Kata kunci : paduan Al-Si hipereutektik, AC8A, modifier P

## ABSTRACT

Name : Martha Indriyati  
Study Program : Metallurgy and Material Engineering  
Judul : Effect of Phosphorus Modifier on Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic AC8A Aluminium Alloys

Because of the interesting properties such as high wear resistance, low thermal expansion coefficient, high resistance to corrosion and castability, hypereutectic Al-Si alloys have become a candidate material for potential applications including piston. Nevertheless, it has a disadvantage which is it becomes more brittle as the ratio of silicon is added because of the presence of coarse primary silicon. There are a lot of ways to minimize silicon phases, one of them is modification using modifier.

In this research, aluminium alloy designed as AC8A was designed in hypereutectic condition. Phosphorus modifier was added to the melt with composition 0,0025 wt%, 0,0027 wt %, 0,0038 wt %, 0,0046 wt % dan 0,0061 wt % P. Tensile strength, hardness and wear were tested in order to know mechanical properties of material. Microstructure testing, SEM and EDAX were conducted to observe microstructure changing and phases formed in alloy.

Results of this research show that phosphorus addition in hypereutectic AC8A alloy changes the morphology and size of primary silicon from coarse polygonal to fine blocky structure. Eutectic silicon is also changed because it grows from the tip of angles on the primary silicon and is influenced by the morphology and size of primary silicon. The eutectic silicon changes from long fine needle-like shape to short bars and dots with less average length. Hardness testing shows that by increasing phosphorus addition (0 wt %, 0,003 wt%, 0,004 wt% , 0,005 wt% dan 0,006 wt%) to the melt, hardness of the material increases from 38 HRB to 39 HRB, 40 HRB, 41 HRB, and 42 HRB. Furthermore, the value of wear resistance also increases. Nevertheless, tensile strength doesn't show any tendency because of porosity.

Keywords : Al-Si hypereutectic alloy, AC8A, modifier P



## 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> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Manfaat Penelitian .....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....	3
1.4.1 Material .....	3
1.4.2 Parameter Penelitian .....	3
1.4.3 Tempat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Piston .....	5
2.1.1 Karakteristik Piston .....	5
2.1.2 Material Piston .....	6
2.1.3 <i>Gravity Die Casting</i> .....	7
2.2 Aluminium dan Paduannya .....	7
2.2.1 Sistem Tata Nama Paduan Aluminium .....	8
2.2.2 Material AC8A .....	9

2.2.3 Pengaruh Unsur pada Paduan Aluminium .....	10
2.2.3.1. Pengaruh Unsur Mayor pada Paduan Aluminium .....	10
2.2.3.2. Pengaruh Unsur Minor pada Paduan Aluminium .....	13
2.3 Paduan Aluminium Silikon .....	14
2.3.1 Pengaruh Struktur Mikro terhadap Sifat Mekanis	
Paduan Al-Si .....	16
2.3.1.1. Fasa Intermetalik .....	16
2.3.1.2. Penghalusan Fasa Primer .....	17
2.4 Modifikasi Paduan Aluminium Silikon .....	18
2.4.1. Modifier .....	19
2.4.2. Pengaruh Modifikasi terhadap Karakteristik Paduan Al-Si ....	20
2.4.2.1. Pengaruh Modifikasi terhadap Temperatur	
Eutektik dan Komposisi .....	20
2.4.2.2. Pengaruh Modifikasi terhadap Porositas .....	20
2.5 Modifier Fosfor .....	21
2.5.1 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Karakteristik Paduan	
Al-Si Eutektik .....	22
2.5.2 Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Karakteristik Paduan	
Al-Si Hipereutektik .....	25
2.5.2.1. Mekanisme Penghalusan Silikon Primer .....	27
2.5.2.2. Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Struktur Mikro..	28
2.5.2.3. Pengaruh Modifier Fosfor terhadap kekuatan Tarik..	32
2.5.2.4. Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Kekerasan	
dan Keausan .....	32
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>33</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	33
3.2 Peralatan dan Bahan .....	34
3.3 Prosedur Penelitian .....	35
3.3.1. Persiapan Penelitian .....	35
3.3.1.1. Perhitungan Material Balance .....	35
3.3.1.2. Persiapan Alat dan Bahan .....	37

3.3.2. Proses Peleburan .....	38
3.3.3. Penambahan Fosfor .....	39
3.3.4. Proses Penuangan .....	41
3.3.5. Preparasi Sampel .....	42
3.3.5.1. Preparasi Sample Uji Tarik dan Uji Komposisi Kimia .....	42
3.3.5.2. Preparasi Sampel Uji Kekerasan dan Keausan .....	42
3.3.5.3. Preparasi Sampel Uji Struktur Mikro dan SEM .....	43
3.4 Pengujian .....	46
3.4.1. Pengujian Komposisi Kimia .....	46
3.4.2. Pengujian Tarik .....	47
3.4.3. Pengujian Kekerasan .....	48
3.4.4. Pengujian Keausan .....	49
3.4.5. Pengujian Struktur Mikro dengan Mikroskop Optik .....	50
3.4.6. Pengujian Struktur Mikro dengan SEM dan EDS .....	51
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>52</b>
4.1 Hasil dan Analisa Komposisi Kimia .....	52
4.2 Hasil dan Analisa Pengamatan Mikrostruktur .....	54
4.2.1. Pengaruh Penambahan Fosfor terhadap Morfologi Silikon Primer .....	56
4.2.2. Pengaruh Penambahan Fosfor terhadap Morfologi Silikon Eutektik .....	57
4.3 Hasil dan Analisa Pengamatan SEM/EDS .....	58
4.3.1. Hasil dan Analisa Fasa yang Terbentuk .....	58
4.3.2. Hasil dan Analisa Persebaran Fasa .....	64
4.4 Pengaruh Fosfor terhadap Kekuatan Tarik Paduan Al-Si Hipereutektik .....	68
4.5 Pengaruh Fosfor terhadap Kekerasan Paduan Al-Si Hipereutektik	71
4.6 Pengaruh Fosfor terhadap Keausan Paduan Al-Si Hipereutektik ....	73

<b>BAB V KESIMPULAN .....</b>	<b>76</b>
<b>DAFTAR ACUAN .....</b>	<b>78</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>81</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>84</b>



## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
<b>Gambar 2.1</b>	Penampang piston dan bagian – bagiannya ..... 5
<b>Gambar 2.2</b>	Diagram fasa dan mikrostruktur paduan Al-Si..... 15
<b>Gambar 2.3</b>	(a) Analisis termal paduan eutektik normal dan termodifikasi selama pemanasan dan pendinginan (b) Pergeseran liquidus silikon dan penurunan temperatur eutektik pada penambahan natrium ..... 20
<b>Gambar 2.4</b>	Jumlah Inti yang Terbentuk ..... 22 (a) Modifikasi Phospor (b) Tanpa Modifikasi
<b>Gambar 2.5</b>	Interaksi Antara Phospor dengan Sodium dan Stronsium terhadap Morfologi Silikon Eutektik pada Paduan Al-7%Si (A356) ..... 24
<b>Gambar 2.6</b>	Solidifikasi paduan Al-Si Hipereutektik ..... 26
<b>Gambar 2.7</b>	Skema kondisi dalam keadaan cair dari diagram Al-Na-P-Si ..... 27
<b>Gambar 2.8</b>	Morfologi silikon primer pada paduan A390 (a) Unmodified; (b) Modifikasi dengan 0,1% P ..... 29
<b>Gambar 2.9</b>	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 ..... 30
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian ..... 32
<b>Gambar 3.2</b>	Bentuk awal master alloy Al-0,0193P ..... 37

<b>Gambar 3.3</b>	(a) Proses <i>coating</i> cetakan; (b) Cetakan yang telah di- <i>coating</i> Laddle .....	37
<b>Gambar 3.4</b>	(a) Ingot AC8A; (b) Silikon Murni Padat 99,99%; (c) <i> Holding Furnace</i> .....	39
<b>Gambar 3.5</b>	Mesin GBF .....	39
<b>Gambar 3.6</b>	Jumlah fosfor yang ditambahkan .....	40
<b>Gambar 3.7</b>	Hasil cor .....	41
<b>Gambar 3.8</b>	(a) Sample uji tarik yang telah dipreparasi; (b)Proses pembubutan sample uji komposisi kimia.....	42
<b>Gambar 3.9</b>	(a) Penampang cetakan uji tarik yang diambil untuk sample uji kekerasan dan aus; (b) Sample uji kekerasan; (c) Sample uji keausan .....	43
<b>Gambar 3.10</b>	Penampang sample uji tarik yang diambil untuk sample mikrostruktur dan SEM .....	43
<b>Gambar 3.11</b>	(a) Mounting Press Machine; (b) Hasil mounting sample struktur mikro; (c) Hasil mounting sample SEM .....	44
<b>Gambar 3.12</b>	(a) Mesin Grinding & Polishing; (b) Proses pengamplasan .....	45
<b>Gambar 3.13</b>	Proses pemolesan .....	46
<b>Gambar 3.14</b>	(a) Mesin Spectrometer Shimadzu; (b) Hasil uji komposisi setelah penembakan .....	46
<b>Gambar 3.15</b>	(a) Mesin uji tarik Shimadzu; (b) Peletakan sample pada mesin uji tarik; (c) Standar ASTM sample pengujian tarik.....	47
<b>Gambar 3.16</b>	(a) Hardness Rockwell Tester (b) Penjejukan sample .....	48
<b>Gambar 3.17</b>	Skema pengujian keausan metode Ogoshi Sampel .....	49
<b>Gambar 3.18</b>	(a) Mesin Pengujian Keausan Ogoshi (b) Sample yang telah diuji aus .....	50
<b>Gambar 3.19</b>	Pengamatan pada mikroskop optik digital Keyence ...	50
<b>Gambar 3.20</b>	SEM/EDAX LEO .....	51

<b>Gambar 4.1</b>	Hasil pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik digital .....	55
<b>Gambar 4.2</b>	<i>Block spots</i> pada silikon primer .....	57
<b>Gambar 4.3</b>	Perubahan morfologi silikon primer.(a) sebelum penambahan fosfor; (b) setelah penambahan fosfor 0,0061 wt % .....	58
<b>Gambar 4.4</b>	Hasil pengamatan SEM as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0025 wt % P, perbesaran 200x .....	59
<b>Gambar 4.5</b>	Hasil pengamatan SEM as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0038 wt % P, perbesaran 400x .....	60
<b>Gambar 4.6</b>	Hasil pengamatan SEM as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0061 wt % P, perbesaran 400x .....	61
<b>Gambar 4.7</b>	Distribusi fasa pada material AC8A variasi penambahan fosfor (a) 0,0027 wt %; (b) 0,0038 wt % dan (c) 0,0061 wt % .....	64
<b>Gambar 4.8</b>	Pembentukan fasa intermetalik dalam sel dendrit	66
<b>Gambar 4.9</b>	Perhitungan fraksi area porositas variable penambahan 0,0038% P dengan menggunakan perangkat lunak <i>PICSARA</i> .....	67
<b>Gambar 4.10</b>	Grafik hasil pengujian tarik paduan aluminium tuang dengan penambahan modifier P .....	69
<b>Gambar 4.11</b>	Porositas yang terdapat pada sampel variasi fosfor (a) 0,0038 wt % ; (b) 0,0046 wt % .....	70
<b>Gambar 4.12</b>	Grafik elongasi paduan aluminium tuang dengan penambahan modifier P .....	71
<b>Gambar 4.13</b>	Grafik data kekerasan paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P .....	72
<b>Gambar 4.14</b>	Grafik laju aus paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P .....	74

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Klasifikasi Aluminium Paduan sesuai Standar AA .....	9
<b>Tabel 2.2</b>	Komposisi kimia material AC8A menurut standar JIS H5202 .....	10
<b>Tabel 2.3</b>	Komposisi kimia paduan aluminium AA 336 .....	10
<b>Tabel 3.1</b>	Perhitungan <i>Material Balance</i> Penambahan Fosfor .....	36
<b>Tabel 3.2</b>	Komposisi Kimia AC8A .....	38
<b>Tabel 3.3</b>	Perbandingan jumlah fosfor hasil perhitungan dengan jumlah fosfor aktual .....	41
<b>Tabel 4.1</b>	Hasil pengujian komposisi kimia .....	52
<b>Tabel 4.2</b>	Hasil analisa komposisi as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0025 wt % P .....	62
<b>Tabel 4.3</b>	Hasil analisa komposisi as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0038 wt % P .....	63
<b>Tabel 4.4</b>	Hasil analisa komposisi as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0061 wt % P .....	64
<b>Tabel 4.5</b>	Tabel data hasil perhitungan fraksi area porositas dengan <i>PICSARA</i> .....	67
<b>Tabel 4.6</b>	Tabel data uji tarik paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P .....	69
<b>Tabel 4.7</b>	Tabel data kekerasan paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P .....	71
<b>Tabel 4.8</b>	Tabel data keausan pada paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P .....	74



## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran A</b>	Hasil Uji Komposisi Kimia .....	81
<b>Lampiran B</b>	Hasil Uji kekerasan dan Uji Keausan .....	84
<b>Lampiran C</b>	Hasil Pengujian Kekuatan Tarik .....	87
<b>Lampiran D</b>	Hasil Pengujian SEM/EDS .....	93



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Pengecoran merupakan suatu proses manufaktur yang menggunakan logam cair dan cetakan untuk menghasilkan *parts* dengan bentuk yang mendekati bentuk geometri produk jadi. Karena keunggulannya yang dapat menghasilkan produk dengan bentuk yang sederhana sampai rumit dengan berat bervariasi, mulai dari satuan gram hingga mencapai ton serta proses *finishing*-nya yang minimum sehingga dapat mengurangi biaya dan waktu proses, proses ini banyak digunakan di dunia industri terutama industri otomotif.

Paduan aluminium merupakan paduan yang banyak digunakan dalam industri pengecoran otomotif. Hal tersebut dikarenakan aluminium mempunyai sifat fluiditas yang tinggi, proses pengecorannya yang mudah, densitasnya yang rendah, ketahanan aus dan korosi yang baik, koefisien ekspansi termal yang rendah serta mempunyai sifat mekanik yang baik<sup>[1]</sup>. Disamping itu, banyaknya penggunaan aluminium di dalam dunia otomotif disebabkan karena sifat aluminium yang ringan sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar kendaraan.

Salah satu contoh produk otomotif yang dihasilkan melalui proses pengecoran paduan aluminium adalah piston. Piston merupakan bagian dari komponen mesin kendaraan bermotor yang bergerak naik turun di dalam silinder untuk melakukan langkah isap, kompresi, pembakaran dan buang. Fungsi utama piston adalah untuk menerima tekanan pembakaran dan meneruskan tekanan tersebut melalui batang torak (*connecting rod*) ke poros engkol<sup>[2]</sup>. Komponen ini menerima temperatur dan tekanan tinggi sehingga dibutuhkan material yang mempunyai daya tahan yang baik.

Material AC8A merupakan paduan aluminium silikon (AlSi12CuNiMg) dengan kandungan silikon berkisar antara 11 – 13%<sup>[3]</sup>. Dengan kandungan silikon yang cukup tinggi tersebut dapat dipastikan bahwa material ini memiliki kekuatan serta ketahanan aus yang baik

Sifat material dengan kekuatan dan ketahanan aus yang tinggi dapat kita dapatkan dengan mengubah komposisi paduan disamping mengubah parameter – parameter penting proses pengecoran. Meningkatkan kadar silikon hingga

mencapai daerah hipereutektik merupakan salah satu cara yang dilakukan untuk mendapatkan ketahanan aus dan kekuatan yang tinggi terutama untuk aplikasi temperatur tinggi. Hal inilah yang kemudian mendasari pengembangan piston hipereutektik.

Piston hipereutektik memiliki beberapa keunggulan. Dengan penambahan silikon pada paduan piston akan mengurangi ekspansi termal piston. Hal ini memungkinkan *engineer* untuk mendesain celah yang lebih rapat antara piston dan *cylinder liner* sehingga didapat tekanan kompresi dan tekanan gas hasil pembakaran yang optimal. Silikon sendiri memiliki daya ekspansi yang lebih kecil daripada aluminium dan juga berfungsi sebagai insulator untuk mencegah aluminium menyerap panas. Efek penambahan silikon juga meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus piston<sup>[4]</sup>.

Walaupun demikian, piston hipereutektik memiliki kelemahan yaitu piston akan semakin bertambah *brittle* seiring dengan bertambahnya kandungan silikon dikarenakan oleh adanya silikon primer yang kasar. Karena itulah penambahan modifier diperlukan untuk memperbaiki sifat mekanis pada kondisi hipereutektik. Modifier merupakan unsur yang ketika ditambahkan akan merubah ukuran serta morfologi silikon sehingga berdampak pada perubahan sifat mekanis material<sup>[1]</sup>.

Unsur P, S, Na, Sr, *rare earth* atau campurannya merupakan modifier yang biasa digunakan untuk memodifikasi paduan aluminium hipereutektik<sup>[5]</sup>. Unsur fosfor merupakan yang sering digunakan. Sudah banyak diketahui bahwa penambahan fosfor akan memodifikasi silikon primer serta mempunyai sedikit pengaruh terhadap silikon eutektik<sup>[5]</sup>. Pada penelitian ini, material AC8A didesain pada kondisi hipereutektik untuk mempelajari transformasi fasa silikon setelah modifikasi P serta pengaruhnya terhadap sifat mekanis material.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui pengaruh penambahan Fosfor (P) terhadap struktur mikro dan sifat mekanis yang meliputi : kekerasan, kekuatan tarik dan keausan paduan AC8A hipereutektik.

2. Mengetahui hubungan antara perubahan struktur mikro dengan perubahan sifat mekanis paduan AC8A hipereutektik akibat penambahan modifier fosfor.

### 1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan suatu alternatif baru pembuatan piston menggunakan material AC8A sebagai pengganti material AC8H pada kondisi hipereutektik yang juga bermanfaat untuk meningkatkan kualitas dari piston. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan tambahan studi literatur bagi pihak lain yang ingin mengetahui mengenai pengaruh penambahan modifier P terhadap karakteristik paduan aluminium tuang Al-Si-Cu-Ni-Mg pada kondisi hipereutektik.

### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

#### 1.4.1 Material

Ingot AC8A dengan komposisi Al, 11-13% Si, 0,8 – 1,3 %Cu, 1 – 2,5% Ni dan 0,7 – 1,3% Mg

#### 1.4.2 Parameter Penelitian

##### Parameter yang Divariabelkan

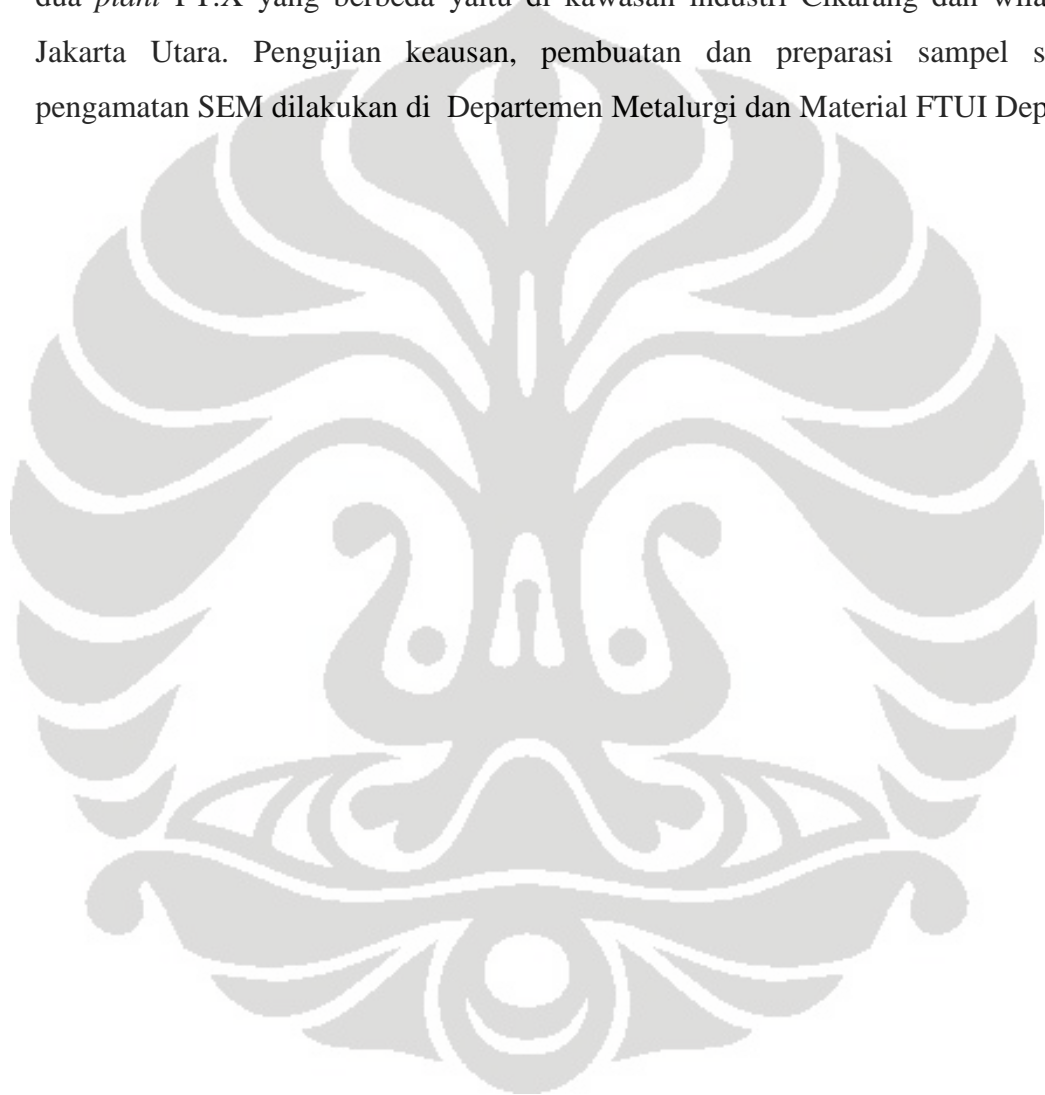
- Komposisi penambahan *modifier* fosfor yaitu komposisi tanpa fosfor (0 wt% P) dan dengan fosfor (0.003% wt P, 0.004% wt P, 0.005% wt P dan 0.006% wt P)

##### Parameter yang Tetap

- Penambahan unsur silikon 99,99% sebanyak 4,4 kg ke dalam paduan sehingga material AC8A menjadi hypereutektik
- Temperatur penambahan *modifier* dan temperatur penuangan
- Kecepatan pembekuan  $\pm 1$  menit
- Pembuatan sampel uji tarik dan uji komposisi dengan temperatur *preheating dies*  $350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$

### 1.4.3 Tempat Penelitian

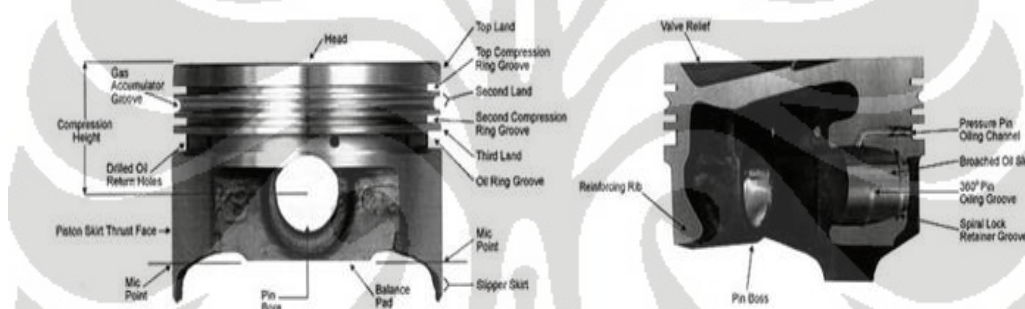
Proses pengecoran serta pembuatan dan preparasi sampel uji tarik dan kekerasan dilakukan di PT. X kawasan industri Cikarang. Pengujian komposisi kimia dilakukan, pengujian kekerasan, tarik dan pengamatan struktur mikro dilakukan di PT. X wilayah Jakarta Utara. Sedangkan pembuatan dan preparasi sampel untuk pengamatan struktur mikro serta pengujian kekerasan dilakukan di dua *plant* PT.X yang berbeda yaitu di kawasan industri Cikarang dan wilayah Jakarta Utara. Pengujian keausan, pembuatan dan preparasi sampel serta pengamatan SEM dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material FTUI Depok



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. PISTON

Piston dalam bahasa Indonesia juga dikenal dengan istilah torak adalah komponen dari mesin pembakaran yang berfungsi sebagai penekan udara masuk dan penerima hentakan pembakaran pada ruang bakar silinder liner. Komponen mesin ini dipegang oleh setang piston yang mendapatkan gerakan turun naik dari gerakan berputar *crankshaft*. Fungsi utama piston adalah menerima tekanan pembakaran dan meneruskan tekanan pembakaran dalam silinder menuju ke *crankshaft* melalui *piston rod/connecting rod*<sup>[5]</sup>.



Gambar 2.1 Penampang piston dan bagian – bagiannya<sup>[6]</sup>

#### 2.1.1. Karakteristik Piston

Dalam aplikasinya, piston menerima tekanan serta temperatur yang tinggi sehingga material piston haruslah mempunyai daya tahan yang baik. Piston biasanya terbuat dari paduan aluminium tuang karena paduan ini ringan dan memiliki konduktivitas panas yang sangat baik sehingga mampu meradiasikan panas secara efisien<sup>[7]</sup>.

Syarat – syarat utama material untuk pembuatan piston antara lain<sup>[8]</sup> :

- Ringan, material yang ringan dapat mengurangi beban inersia yang akan dialami piston
- Kekuatan pada temperatur tinggi, dengan material yang memiliki kekuatan pada temperatur tinggi tentunya material tersebut akan tahan terhadap

temperatur yang tinggi sekitar 300<sup>0</sup>C dalam ruang bakar sehingga tidak mudah rusak

- Ketahanan aus dan ketahanan korosi, syarat ini diperlukan karena aplikasi piston berada dalam lingkungan ruang bakar dan juga gerakan piston yang bergerak naik turun secara terus menerus
- Mudah dalam pengecoran dan permesinan, sebagai hasil coran tentunya material ini harus memiliki mampu cor dan juga mampu mesin yang baik.
- Stabilitas dimensi tinggi dan koefisien muai rendah

### 2.1.2. Material Piston

Umumnya material dasar coran untuk pembuatan piston adalah paduan Al-Si. Hal ini disebabkan karena karakteristik paduan tersebut dapat memenuhi persyaratan yang ditetapkan untuk material pembuatan piston. Paduan Al-Si-Cu-Ni-Mg merupakan salah satu paduan Al-Si yang memenuhi persyaratan material piston. Sifat – sifat yang dimiliki paduan Al-Si tersebut adalah :

- Ringan
- Memiliki ketahanan aus yang baik
- Memiliki ketahanan korosi yang baik
- Ekspansi panas yang rendah
- Kekuatan yang cukup baik serta memiliki mampu cor yang cukup baik

Temperatur tinggi merupakan kondisi piston pada pengaplikasiannya, karena itu, material piston harus memiliki koefisien ekspansi *thermal* yang rendah. Hal itulah yang mendorong pengembangan piston hipereutektik. Dengan menambah jumlah silikon pada paduan piston, maka pemuaian piston dapat dikurangi. Silikon sendiri mempunyai daya muai yang lebih kecil daripada aluminium. Silikon juga berfungsi sebagai insulator untuk mencegah aluminium menyerap panas selama beroperasi. Selain itu keuntungan yang akan didapat dengan penambahan silikon adalah piston akan menjadi lebih keras dan lebih tahan terhadap gesekan<sup>[4]</sup>.

Satu kelemahan terbesar penambahan silikon pada piston adalah piston akan semakin bertambah *brittle* seiring dengan bertambahnya kandungan silikon. Karena itulah penambahan *modifier* diperlukan untuk memperbaiki sifat mekanis

pada kondisi hipereutektik. Peningkatan sifat mekanis tentunya membuat *lifetime* dari piston akan semakin lama.

### 2.1.3. Gravity Die Casting

*Gravity Die Casting* merupakan proses pengecoran menggunakan cetakan logam dimana logam cair masuk ke cetakan dengan gaya gravitasi. Umumnya dikenal dengan nama *permanent mold casting*. Cetakan *gravity casting* adalah cetakan logam yang umumnya terdiri atas beberapa bagian yang dapat dibuka dan ditutup secara mekanik.

Proses ini digunakan untuk pembuatan piston karena memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah kecepatan produksi tinggi, keakuratan dimensi baik, kekuatan *part* yang dihasilkan baik, serta meminimalkan proses *finishing*.

Proses *gravity die casting* memiliki beberapa keunggulan<sup>[8]</sup>, diantaranya adalah proses ini menghasilkan komponen coran yang hampir merupakan *finished product*, kecepatan produksi yang tinggi serta die lebih tahan lama. Produk coran yang dihasilkan yang mempunyai permukaan yang halus, toleransi dimensi yang baik serta sifat mekanis yang tinggi. Proses ini dapat digunakan untuk mengecor benda yang sederhana hingga rumit serta mampu mengecor bagian yang tipis. Pengecoran aluminium umumnya menggunakan proses *gravity die casting* karena terdapat banyak paduan aluminium yang dapat dicor dengan proses ini.

Disamping beberapa keunggulan, proses ini juga memiliki beberapa kekurangan, diantaranya<sup>[9]</sup> :

- Tidak dapat digunakan untuk semua jenis logam
- Biaya *tooling* tinggi, harus produksi massal
- Membutuhkan *coating* untuk melindungi cetakan

## 2.2. ALUMINIUM DAN PADUANNYA

Aluminium merupakan logam terbanyak di dunia dan merupakan unsur ketiga terbanyak di bumi setelah oksigen dan silikon dengan kandungan sebanyak 8% dari kulit bumi. Aluminium pertama kali ditemukan sebagai unsur oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1807.



Kombinasi sifat yang unik dari aluminium menjadikan material ini menjadi material yang banyak digunakan untuk aplikasi keteknikan. Sifat aluminium yang ringan dengan titik lebur yang rendah ( $660^{\circ}\text{C}$ ), *high strength to weight ratio*, ketahanan korosi yang baik, serta mudah dibentuk menjadikan material ini banyak digunakan untuk aplikasi mekanik terutama dalam industri otomotif dunia. Selain itu, material ini juga banyak digunakan untuk aplikasi elektrik karena material ini mempunyai konduktivitas listrik yang baik dan bersifat non – magnetik. Ketahanan korosi yang baik dari aluminium disebabkan karena aluminium mempunyai sifat *self protecting* dengan membentuk lapisan oksida tipis yang akan melindungi aluminium ketika terkena udara. Aluminium mudah untuk dibentuk dengan berbagai proses *forming*, mulai dari ekstrusi, *rolling*, *casting* hingga dibentuk menjadi lapisan yang sangat tipis (*foil*). Di samping itu aluminium mempunyai *machinability* yang baik. Aluminium merupakan logam yang rapat jenisnya rendah, sehingga dapat dipadu dengan logam lain menghasilkan material yang memiliki kekuatan mekanis yang lebih baik. Penambahan paduan pada aluminium dapat meningkatkan kekuatan, keuletan dan kemampuan untuk dicor<sup>[10]</sup>.

### 2.2.1. Sistem Tata Nama Paduan Aluminium

Berdasarkan sistem tata nama yang dikeluarkan oleh *Aluminium Association* (AA), kelas – kelas pada aluminium dibagi berdasarkan jenis paduan yang digunakan. Tata nama ini menggunakan sistem 4 digit angka dengan sebuah titik diantara digit ketiga dan keempat. Arti empat digit tersebut adalah<sup>[11]</sup> :

- Angka pertama : unsur paduan utama
- Angka kedua & ketiga : spesifikasi komposisi aluminium paduan
- Angka keempat : bentuk produk ( 0 untuk spesifikasi coran; 1 untuk ingot dan 2 untuk spesifikasi ingot yang lebih sempit )

**Tabel 2.1** Klasifikasi Aluminium Paduan sesuai Standar AA<sup>[11]</sup>

<b>Seri</b>	<b>Unsur Paduan Utama</b>
1XX.X	Aluminium murni (99.00% atau lebih)
2XX.X	Tembaga (Cu)
3XX.X	Si +Cu dan/ atau Mg
4XX.X	Silikon (Si)
5XX.X	Magnesium (Mg)
6XX.X	Tidak dipergunakan
7XX.X	Seng (Zn)
8XX.X	Timah (Sn)
9XX.X	Unsur – unsur lain

### 2.2.2. Material AC8A

Material AC8A merupakan material paduan aluminium dengan komposisi utama Al,Si,Cu,Mg dan Ni. Material ini memiliki kekuatan yang baik, ketahanan aus yang baik, koefisien ekspansi linier panas yang rendah serta densitas yang relatif ringan. Oleh karena itulah, material ini banyak dimanfaatkan untuk pembuatan piston pada industri manufaktur. Selain itu, material AC8A memiliki kemampuan cor yang baik sehingga sangat baik untuk proses pengecoran piston yang memiliki bentuk yang rumit.

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 Association*).

**Tabel 2.2** Komposisi kimia material AC8A menurut standar JIS H5202<sup>[12]</sup>

Komposisi Kimia %										
Kelas	Simbol	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Al
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	sisa
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	sisa
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	sisa
Kelas 3A	AC 3A	0.2 max	10.0-13.0	0.1 max	0.3 max	0.8 max	0.3 max	-	-	sisa
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	sisa
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	sisa
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	sisa
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	sisa
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	sisa
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	sisa
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	sisa
<b>Kelas 8A</b>	<b>AC 8A</b>	<b>0.8-1.3</b>	<b>11.0-13.0</b>	<b>0.7-1.3</b>	<b>0.1 max</b>	<b>0.8 max</b>	<b>0.1 max</b>	<b>1.0-2.5</b>	<b>0.2 max</b>	<b>sisa</b>
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	sisa
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	sisa

**Tabel 2.3** Komposisi kimia paduan aluminium AA 336<sup>[13]</sup>

AA number	Cu	Si	Mg	Zn	Other
336.0	0.5 – 1.5	11.0 – 13.0	0.7 – 1.3	0.35	Ni 2.0-3.0, Fe 1.2

### 2.2.3. Pengaruh Unsur pada Paduan Aluminium

Unsur – unsur paduan yang ditambahkan bertujuan untuk meningkatkan sifat – sifat mekanis dari paduan aluminium seperti kekuatan, keuletan, mampu permesinan dan lain – lain sesuai dengan kebutuhan

#### 2.2.3.1. Pengaruh Unsur Mayor pada Paduan Aluminium

##### 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  $Mg_2Si$ , dengan besi dan unsur lainnya akan membentuk fasa kompleks yang tidak terlarut<sup>[11],[14]</sup>.

## 2. Tembaga (Cu)

Tembaga dalam aluminium akan membentuk  $CuAl_2$  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>[11],[14]</sup>.

## 3. Magnesium (Mg)

Magnesium memiliki kelarutan 17,4 % pada 450°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  $Mg_2Si$ . Dengan adanya persenyawaan  $Mg_2Si$  di dalam paduan Al-Si, maka sifat mekanis dapat ditingkatkan. Dalam pemuatan di pengecoran pada umumnya memiliki rentang dari 4 sampai 10%<sup>[11],[14]</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  $MgZn_2$  yang akan meningkatkan sifat kekerasan dan kekuatan. Meningkatkan penambahan seng dan magnesium akan menurunkan ketahanan korosi aluminium<sup>[11],[14]</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>[11],[14]</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>[11],[14]</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>[11],[14]</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>[11],[14]</sup>.

### 2.2.3.1. 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>[11],[14]</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 sendirian sebagai penghalus butir (0,005 – 0,1%) selama pembekuan, tetapi akan semakin efektif jika digunakan bersama dengan titanium<sup>[11],[14]</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>[11],[14]</sup>.

#### 4. Bismuth (Bi)

Bismuth digunakan untuk meningkatkan *machinability* dari paduan aluminium tuang pada konsentrasi tidak lebih dari 0,1%<sup>[11],[14]</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>[11],[14]</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>[11],[14]</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>[11],[14]</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>[11],[14]</sup>.

#### 9. Cobalt (Co)

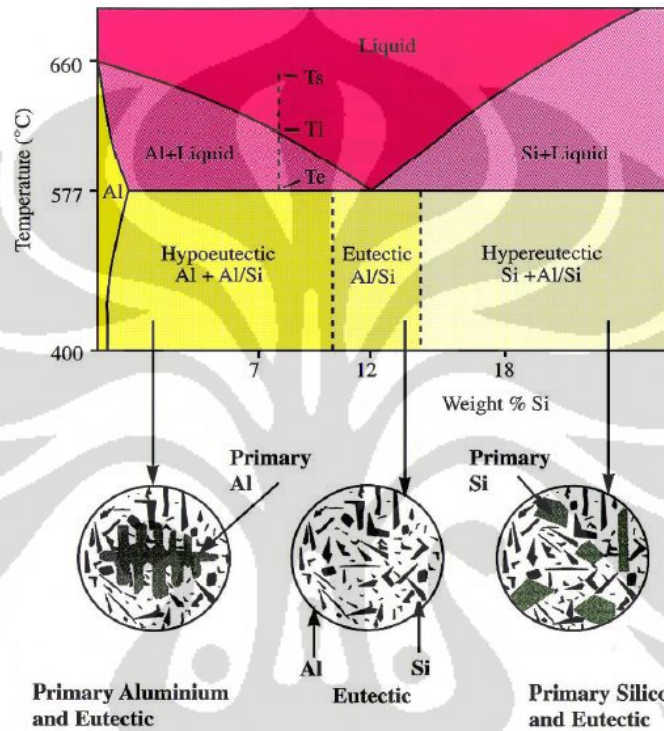
Kobalt jarang ditambahkan pada paduan aluminium. Penambahan kobalt pada paduan aluminium-silikon yang mengandung besi akan mengubah *acicular*  $\beta$  (Al-Fe-Si) menjadi fasa Al-Co-Si yang lebih bulat, sehingga akan meningkatkan kekuatan dan elongasi<sup>[11],[14]</sup>.

### 2.3. PADUAN ALUMINIUM – SILIKON

Paduan aluminium silikon merupakan paduan yang paling banyak digunakan dalam pengecoran karena mempunyai fluiditas yang tinggi, mudah

dicor dan sifat mekanik yang dapat dikontrol. Berdasarkan kadar silikonnya, paduan ini diklasifikasikan menjadi 3 bagian yaitu<sup>[1]</sup> :

- Hipoeutektik ( $\text{Si} < 11\%$ )
- Eutektik ( $\text{Si} = 11 - 13\%$ )
- Hipereutektik ( $\text{Si} > 13\%$ )



**Gambar 2.2** Diagram fasa dan mikrostruktur paduan Al-Si<sup>[1]</sup>

Struktur utama dari ketiga komposisi paduan ini adalah berupa fasa  $\alpha$ -Al yang sangat kaya akan kandungan aluminium. Struktur ini akan tetap muncul walaupun pada komposisi hipereutektik karena bentuk struktur ini akan selalu terpisah pada fasa padatnya baik dalam paduan hipoeutektik, eutektik, maupun hipereutektik. Selain fasa  $\alpha$ -Al, juga terdapat fasa yang merupakan partikel – partikel kristal silikon yang tidak larut dalam fasa  $\alpha$ -Al. Pada paduan hipereutektik, fasa tersebut menghasilkan silikon primer yang bentuknya kasar<sup>[15]</sup>.

Pada daerah hipoeutektik, kandungan Si kurang dari 11 %. Dapat dipastikan Si terlarut semua. Keuntungan dari aluminium yang memiliki kondisi hipoeutektik adalah: *machinability* lebih baik dan ketangguhan lebih baik.



Sedangkan kerugiannya adalah kekuatan dan kekerasan lebih rendah. Sehingga bila diaplikasikan dalam industri manufaktur piston, produk akhir akan memiliki kekerasan yang tidak optimal (cenderung tidak keras).

Kondisi eutektik pada proses casting sangat diinginkan karena 2 hal, yaitu:

1. Kondisi eutektik menghindari fasa lumpur, sehingga pada saat solidifikasi tidak ada material yang membeku terlebih dahulu, sehingga kita dapat menghindari misrun dan memiliki fluiditas yang baik.
2. Kondisi eutektik memiliki titik lebur yang terendah, jika kita mengacu pada diagram fasa Al- Si, hal ini menguntungkan karena efisien dalam bahan bakar.

Pada daerah hipereutektik, kandungan Si lebih dari 13%. Adanya silikon primer dan silikon bebas yang tidak terlarut dalam fasa ini akan menambah ketahanan aus dan menjadikannya cocok untuk aplikasi pada temperatur tinggi karena memiliki ekspansi *thermal* yang rendah. Paduan aluminium silikon hipereutektik memiliki beberapa keuntungan yaitu ketahanan aus lebih baik, *flowability* tinggi, kekuatan meningkat, kekerasan meningkat, ketahanan *hot tears* (retak panas) meningkat, ekspansi termal rendah. Sedangkan kelemahannya adalah paduan aluminium-silikon hipereutektik memiliki *machinability* yang kurang baik akibat terbentuknya kristal Si sehingga membatasi penggunaannya sebagai *casting alloy*.

### 2.3.1. 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>[11]</sup> :

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

#### 2.3.2.1. 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  $Al_2CuMg$ .

#### 2.3.2.2. 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>[18]</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.

#### 2.4. MODIFIKASI PADUAN ALUMINIUM SILIKON

Modifikasi merupakan proses yang bertujuan untuk memperbaiki sifat fasa paduan aluminium silikon dengan cara menghambat pertumbuhan kristal – kristal silikon dalam paduan aluminium – silikon yang awalnya berstruktur lamelar/jarum menjadi berstruktur fibrous. Kristal silikon yang tidak termodifikasi memiliki ukuran besar dan kasar (bentuk jarum), struktur seperti ini akan mengakibatkan meningkatnya sifat getas dan menurunkan keuletan paduan aluminium – silikon. Sifat getas ini timbul karena kristal silikon yang berbentuk serpihan (jarum) dan kasar berlaku sebagai pemicu terjadinya tegangan internal dalam struktur mikro, dan ini menyebabkan kerentanan terhadap terjadinya retak dan akhirnya mengarah kepada perpatahan (*fracture*). Untuk itu modifikasi diperlukan dalam paduan aluminium – silikon karena modifikasi kristal silikon menjadi bentuk lebih bulat dapat meningkatkan keuletan serta kekuatan tarik.

Terdapat 3 cara modifikasi<sup>[15]</sup> yaitu

- *Quench modification*

Merupakan proses modifikasi dengan laju pendinginan dan laju transformasi yang tinggi dengan laju pertumbuhan melebihi 1 mm/s sehingga didapatkan struktur silikon yang halus.

- *Chemical Modification*

Merupakan proses modifikasi yang dilakukan dengan menambahkan sejumlah unsur tertentu. Unsur – unsur seperti stronsium, natrium atau antimony merupakan unsur *modifier* yang biasa digunakan di industri. Penambahan unsur alkali, alkali tanah atau logam *rare earth* juga dapat menghaluskan mikrostruktur eutektik pada laju pendinginan rendah dan menghasilkan morfologi silikon yang sama seperti yang didapatkan dengan laju pendinginan yang tinggi.

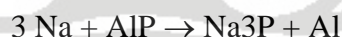
- *Superheating the melt*

Pada metode ini, cairan logam dipanaskan pada range temperatur 850 – 900<sup>0</sup>C dan ditahan selama 15 – 30 menit, kemudian didinginkan secara cepat menuju temperatur tuang. Adanya unsur magnesium pada paduan akan menjadikan metode ini semakin efektif.

### 2.4.1. *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), stronsium (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 :



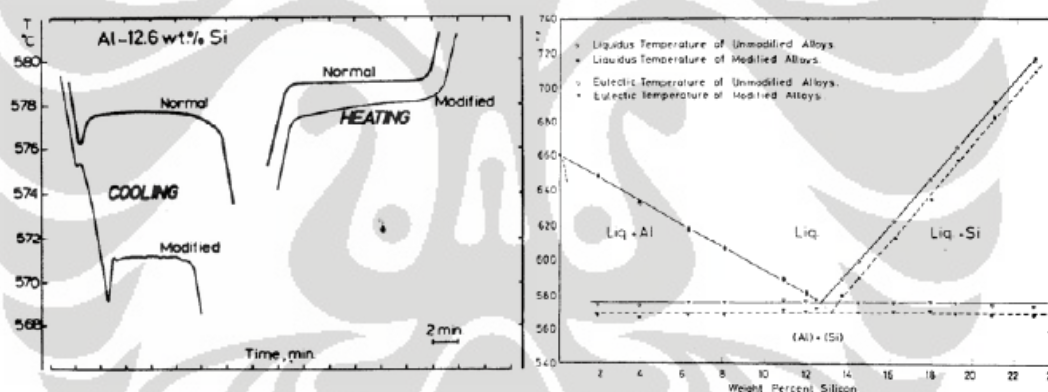
Dengan antimon (Sb) astruktur mikro Al-Si akan berubah menjadi bentuk lamelar dengan keuntungan yang sama dengan modifikasi konvensional. Penggunaan antimon ini pada prakteknya tidak begitu luas mengingat unsur ini termasuk unsur beracun.

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

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

### 2.4.2.1. 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. Dalam hal ini *modifier* berfungsi untuk menekan pertumbuhan silikon primer yang akan mengakibatkan penurunan liquidus silikon<sup>[16]</sup>.



**Gambar 2.3** (a) Analisis termal paduan eutektik normal dan termodifikasi selama pemanasan dan pendinginan; (b) Pergeseran liquidus silikon dan penurunan temperatur eutektik pada penambahan natrium<sup>[16]</sup>

### 2.4.2.2. 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>[16]</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

## 2.5. MODIFIER FOSFOR

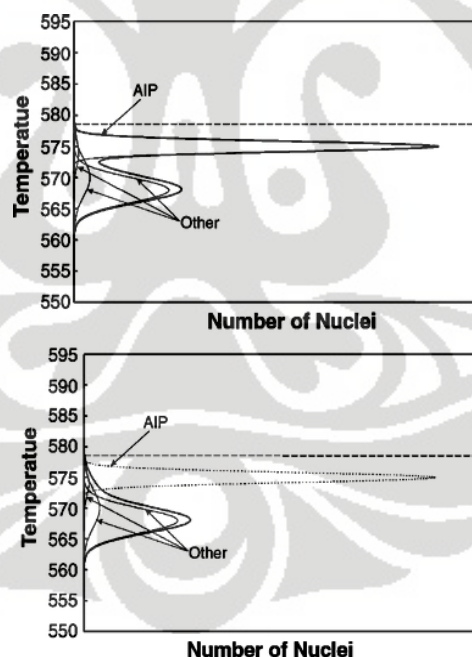
Fosfor merupakan unsur yang efektif untuk menghaluskan butir silikon pada paduan Al-Si eutektik dan hipereutektik. Fosfor yang ditambahkan pada paduan Al-Si dapat berupa master alloy yang mengandung P dan flux komersial. Tetapi beberapa paduan Al-Si mempunyai toleransi yang terbatas terhadap konsentrasi 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>[17]</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>[17]</sup>.

### 2.5.1. 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 silikon 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 2.4** Jumlah Inti yang Terbentuk (a) Modifikasi Phospor (b) Tanpa Modifikasi<sup>[18]</sup>

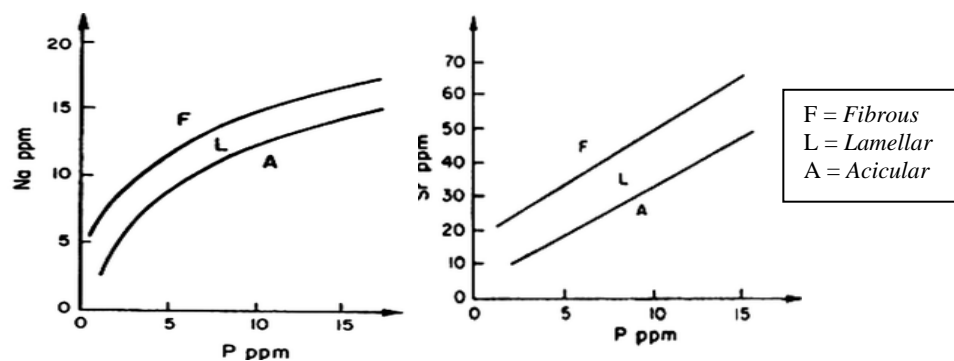
Akan tetapi, berbeda dengan paduan aluminium silikon hipereutektik. Pada aluminium silikon eutektik jumlah fosfor yang ditambahkan tidak sama dengan aluminium silikon hipereutektik. Jika pada aluminium silikon hipereutektik jumlah penambahan fosfor yang efektif berada pada rentang 0.0015-0.03% maka pada 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 bersama-sama dan komposisi yang tepat antara fosfor dengan sejumlah kecil stronsium dan natrium (*double refinement*)<sup>[19]</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>[19]</sup>.

Berdasarkan penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa penambahan fosfor terhadap paduan aluminium silikon eutektik sangat dipengaruhi oleh kandungan 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 2.5.





**Gambar 2.5** Interaksi antara fosfor dengan natrium dan stronsium terhadap morfologi silikon eutektik pada paduan Al-7%Si (A356)<sup>[18]</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>[20]</sup> menghasilkan perubahan mikrostruktur yang berbeda pada setiap penambahan fosfor dalam bentuk yang berbeda. Penelitian tersebut menghasilkan perbedaan ukuran *silicon cuboid* pada penambahan fosfor dalam bentuk *red-phosphorus* dan master alloy AlFeP, dimana *silicon cuboid* yang dihasilkan dari penambahan fosfor dalam bentuk *red-phosphorus* memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan dengan *silicon 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.

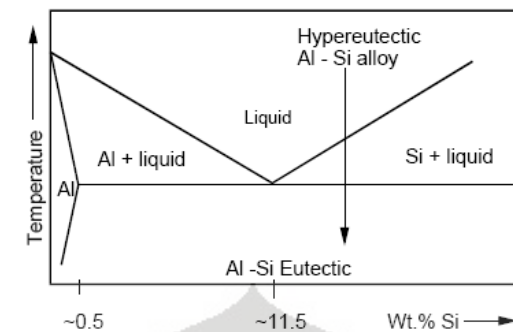
### 2.5.2. Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Karakteristik Paduan Al-Si Hipereutektik

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>[21]</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>[22]</sup>. Dalam hal ini nukleasi silikon menjadi penting dalam pengontrolan mikrostruktur dan sifat coran. Untuk itulah ditambahkan *modifer* 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>[23]</sup>, karena itulah diperlukan penambahan fosfor agar silikon primer menjadi lebih halus dan terdistribusi merata.

### Solidification of Hypereutectic Al-Si Alloy



- ❑ In hypereutectic alloys, large crystals of pure Si form first and float.
- ❑ Overcome by adding phosphorus to form  $\text{AlP}_3$  nuclei.
- ❑ Note that sodium or strontium neutralise phosphorus and vice versa.

**Gambar 2.6** Solidifikasi paduan Al-Si Hipereutektik<sup>[22]</sup>

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 ukuran semula<sup>[24]</sup>.

Konsentrasi dari fosfor yang digunakan untuk penghalusan silikon primer biasanya berada pada rentang 0.0015% hingga 0.03%<sup>[25]</sup> bergantung dari kondisi pengecorannya. Ketidaksiuaian dengan rentang diatas biasanya diakibatkan oleh sulitnya pembuatan sampel yang akurat (komposisi) dan juga penganalisaan komposisi fosfor yang akurat. Dalam perkembangan baru-baru ini telah digunakan *vacuum stage spectrographic* atau *quantometric analysis* untuk pengukuran kadar fosfor yang akurat<sup>[25]</sup>. Dari suatu penelitian didapatkan bahwa pada paduan Al-Si dengan kadar Si 22%, jumlah kadar fosfor yang memberikan hasil optimal berada pada rentang 0.003-0.006%<sup>[24]</sup>. Untuk memaksimalkan penghalusan silikon primer diperlukan perlakuan khusus terhadap logam cair diantaranya adalah<sup>[14]</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

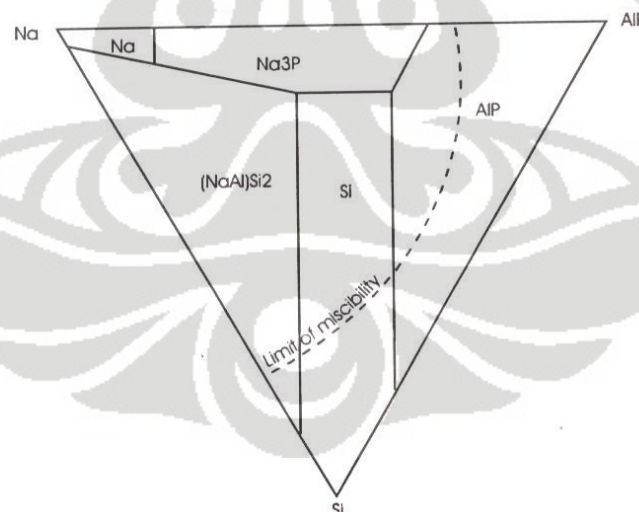
dapat bereaksi dengan fosfor yang akan mengganggu proses penghalusan silikon primer seperti kalsium dan natrium

- 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.

#### 2.5.2.1. 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>[26]</sup>.



**Gambar 2.7** Skema kondisi dalam keadaan cair dari diagram Al-Na-P-Si<sup>[26]</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,

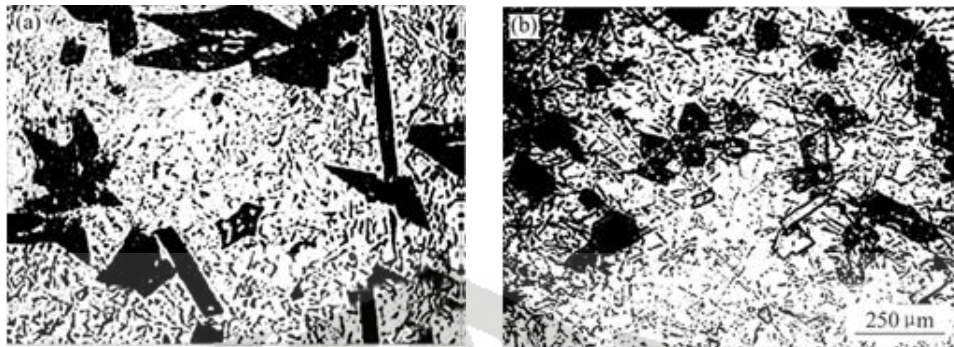
maka fasa yang ada adalah AIP (aluminium phosphide). Dan dengan rasio yang lebih tinggi dari 2,2, maka natrium akan membentuk  $(\text{NaAl})\text{Si}_2$  serta AIP dan  $\text{Na}_3\text{P}$ .

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>[1]</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, AIP 5,45 Å), maka AIP akan bertindak sebagai inti (*nuclei*) pada pertumbuhan silikon primer selama pembekuan<sup>[27]</sup>.

#### 2.5.2.2. Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Struktur Mikro

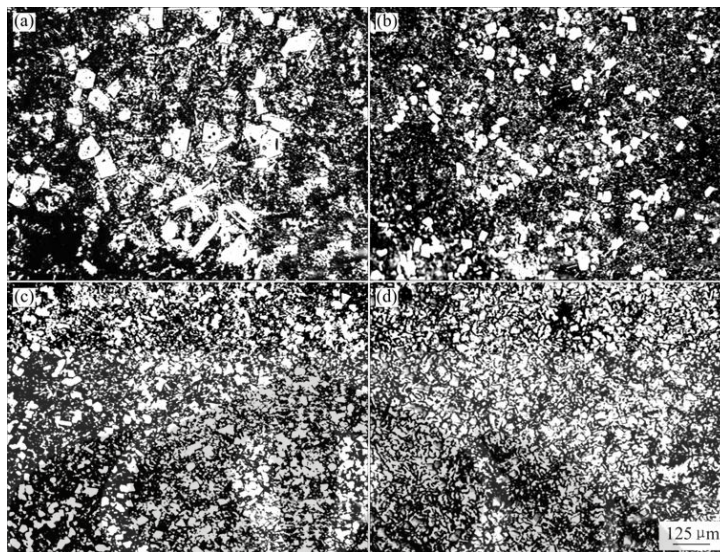
Telah banyak diketahui bahwa penambahan fosfor pada paduan aluminium-silikon hipereutektik akan mengubah morfologi silikon primer. Penambahan fosfor pada paduan Al-Si hipereutektik dapat menghaluskan silikon primer. Penelitian Zhang Ying menyebutkan bahwa terdapat beberapa perubahan mikrostruktur setelah 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>[27]</sup>.



**Gambar 2.8** Morfologi silikon primer pada paduan A390 (a) *Unmodified*; (b) Modifikasi dengan 0,1% P<sup>[27]</sup>

Gambar 2.8 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 2.8 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>[27]</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 2.9** 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>[27]</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>[27]</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>[28]</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>[29]</sup>.

Terdapat beberapa hal yang dapat mempengaruhi struktur mikro dari pada paduan Al-Si hipereutektik, sebagai berikut<sup>[26]</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

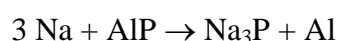
Banyaknya pengadukan cairan logam juga dapat mempercepat hilangnya efek penghalusan partikel silikon primer.

- 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>[30]</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>[20]</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





### 2.5.2.3. 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>[24]</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>[29]</sup>.

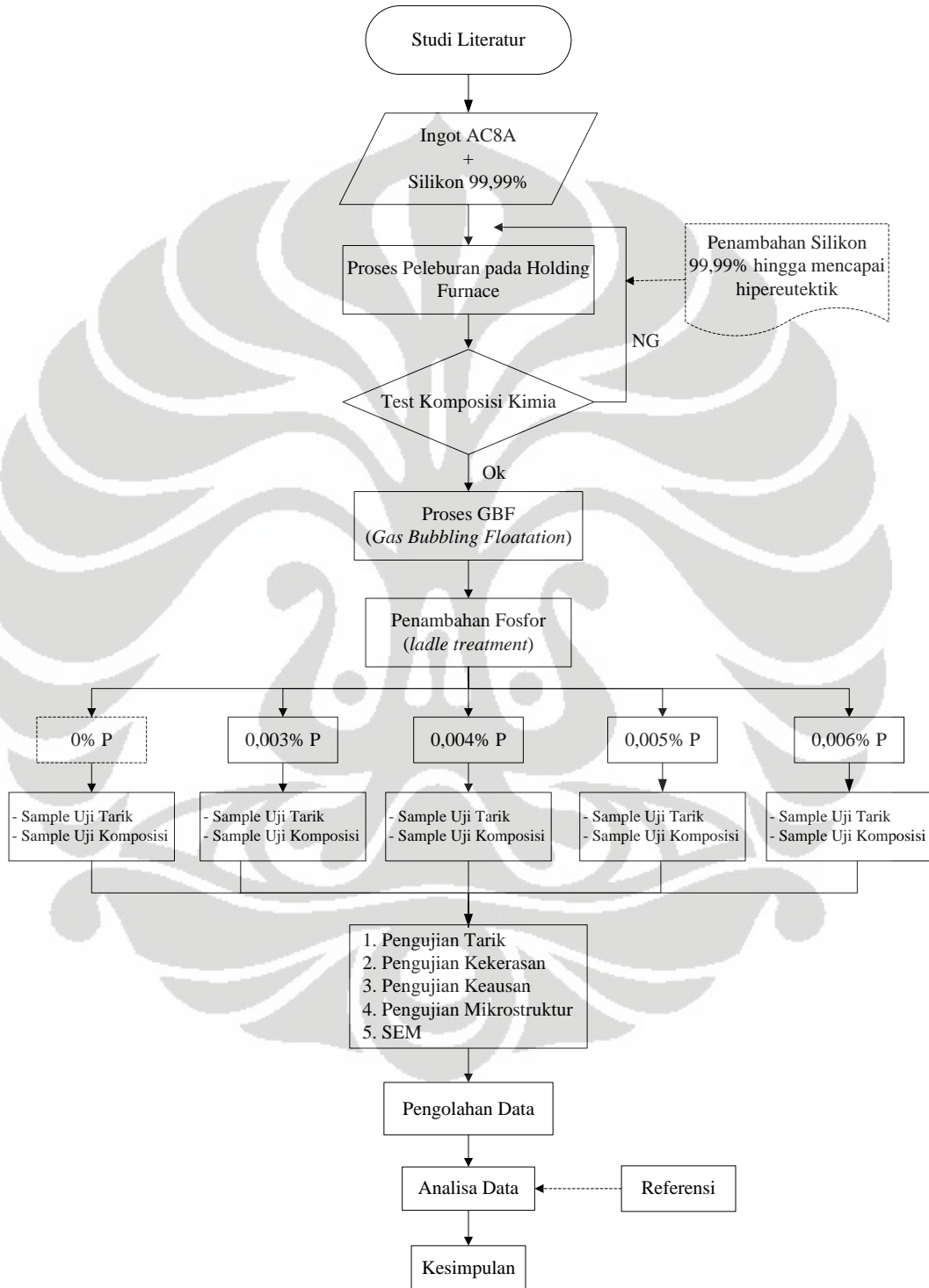
### 2.5.2.4. Pengaruh Modifier Fosfor terhadap Kekerasan dan Keausan

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.

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1. DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram di atas menggambarkan alur proses penelitian. Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur terhadap topik yang akan diteliti. Hal ini bertujuan agar tidak terjadi kekeliruan dalam penelitian. Setelah segala sesuatunya siap, maka dilakukan persiapan material yaitu berupa ingot AC8A dan silikon murni padat 99,99%. Sejumlah ingot AC8A beserta silikon murni padat 99,99% kemudian dilebur di dalam *holding furnace* dengan temperatur *setting* sebesar 660°C. 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.

Jika komposisi paduan tersebut sudah berada pada kondisi hipereutektik, maka langkah selanjutnya adalah proses *degassing*. Proses ini bertujuan untuk mengurangi gas hidrogen yang terdapat pada aluminium cair agar produk yang dihasilkan mempunyai *properties* yang baik. 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, pengujian mikrostruktur dan SEM. 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 II*”
14. *Hardness Rockwell Tester*
15. Mesin Uji Keausan “*Ogoshi*”
16. Mikroskop Optik Digital “*Keyence*”
17. SEM/EDAX “*LEO*”
18. 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 0,0193*
4. Kertas amplas, kain poles, zat poles alumina
5. Resin dan hardener
6. Zat etsa HF 0,5%

### **3.3. PROSEDUR PENELITIAN**

#### **3.3.5. 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 144 kg. Berdasarkan hasil spektro, kadar silikon pada ingot AC8A

berkisar  $\pm 11,6\%$ . Maka perhitungan penambahan silikon murni padat 99,99% untuk mendapatkan kondisi hipereutektik berdasarkan data tersebut adalah sbb:

Target kandungan silikon pada paduan = 14,7%

$$\begin{aligned} \text{Penambahan silikon} &= \left[ \left( \frac{14,7}{100} \right) \times 144 \text{ kg} \right] - \left[ \left( \frac{11,6}{100} \right) \times 144 \text{ kg} \right] \\ &= 4,46 \text{ kg} \approx 4,4 \text{ kg} \end{aligned}$$

b) Perhitungan Jumlah Fosfor

Fosfor yang digunakan pada penelitian ini adalah fosfor berbentuk padatan *master alloy* Al-P dengan kandungan fosfor hanya 0,0193%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 0,0193%wt yang artinya dalam 100 gram *master alloy* mengandung 0,0193 gram fosfor. Berdasarkan nilai – nilai tersebut maka dilakukan perhitungan *material balance* untuk mendapatkan jumlah fosfor yang harus ditambahkan. Perhitungan material balance diuraikan secara rinci pada tabel 3.1

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

No	Kadar P	Perhitungan	Jumlah P (gr)
1	0%	-	0
2	0,003%	$(0,003/100) \times 3000 \times (100/0,0193)$	466,32
3	0,004%	$(0,004/100) \times 3000 \times (100/0,0193)$	621,76
4	0,005%	$(0,005/100) \times 3000 \times (100/0,0193)$	777,2
5	0,006%	$(0,006/100) \times 3000 \times (100/0,0193)$	932,64

### 3.3.1.2. Persiapan Alat dan Bahan

Setelah proses perhitungan *material balance* untuk menentukan massa ingot AC8A serta massa silikon dan *master alloy* Al-0,0193P yang akan ditambahkan, maka langkah selanjutnya adalah menimbang material – material tersebut sesuai dengan hasil perhitungan.

Bentuk awal silikon adalah berupa bongkahan besar. Tidak ada perlakuan khusus kepada silikon ini seperti penggerusan dsb, karena silikon ini dilebur bersamaan dengan ingot AC8A. Tetapi untuk *master alloy* Al-0,0193P yang bentuk awalnya berupa batangan seperti ingot AC8A, terlebih dahulu dilakukan pemotongan menjadi batangan – batangan kecil agar material tersebut dapat larut sempurna dalam aluminium cair.



**Gambar 3.2** Bentuk awal master alloy Al-0,0193P

*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*.



**Gambar 3.3** (a) Proses *coating* cetakan; (b) Cetakan yang telah di-*coating*

### 3.3.5. Proses Peleburan

Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah paduan aluminium AC8A dalam bentuk ingot dengan komposisi kimia sbb :

**Tabel 3.2** Komposisi Kimia AC8A

Unsur	% Berat
Si	10,5 – 13,5
Fe	0,7 max
Cu	0,8 – 1,5
Mn	0,35 max
Mg	0,8 – 1,5
Ni	0,7 – 1,3
Zn	0,35 max
Ti	0,25 max

Proses peleburan ingot aluminium paduan AC8A dilakukan di PT.X kawasan industri Cikarang dengan menggunakan *holding furnace* berkapasitas 300 kg. Pada penelitian ini 144 kg ingot paduan aluminium AC8A dilebur bersamaan dengan 4,4 kg silikon murni padat 99,99% untuk mendapatkan kondisi hipereutektik. Setelah ingot aluminium dan silikon melebur pada temperatur  $660^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  dan terjadi proses *mixing*, dilakukan uji komposisi kimia untuk memastikan bahwa paduan aluminium tersebut sudah berada pada kondisi hipereutektik.





**Gambar 3.4** (a) Ingot AC8A; (b) Silikon Murni Padat 99,99%; (c)  *Holding Furnace*

Setelah didapatkan kondisi hipereutektik, dilakukan proses *degassing* menggunakan mesin GBF dengan kecepatan pengadukan 370 rpm selama 10 menit. Proses GBF (*Gas Bubbling Flotation*) 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 dibersihkan dengan menggunakan ciduk khusus.



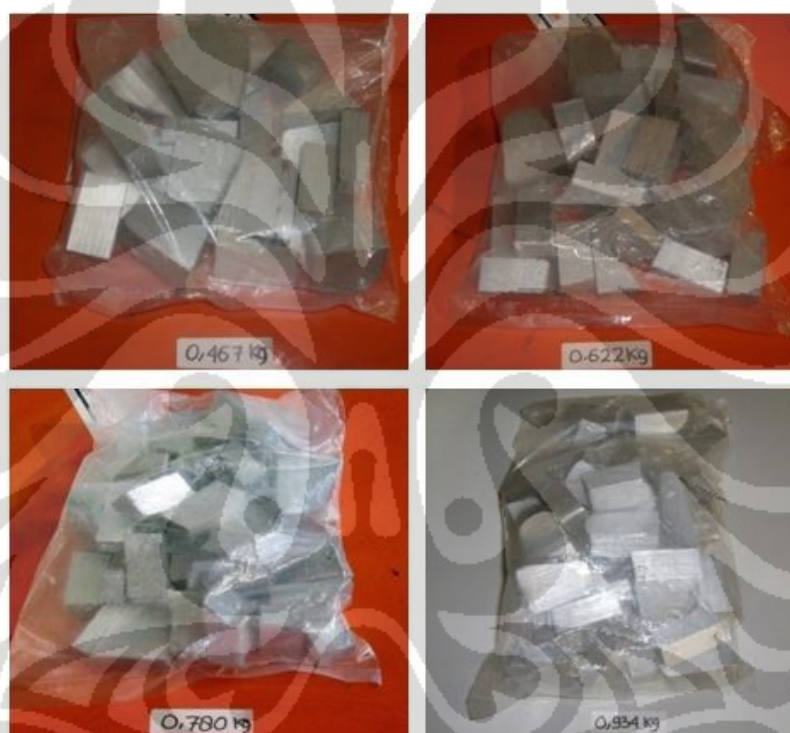
**Gambar 3.5** Mesin GBF

### 3.3.5. Penambahan Fosfor

Setelah proses GBF selesai, proses selanjutnya yang tak kalah penting adalah proses penambahan fosfor. Fosfor yang telah dipotong menjadi batangan – batangan kecil ditambahkan ke dalam *ladle* berkapasitas 3 kg yang telah terisi



dengan aluminium cair dengan posisi *ladle* yang tetap berada dalam *holding furnace*. Hal ini bertujuan agar tidak terjadi penurunan temperatur yang drastis pada aluminium cair yang dapat menyebabkan fosfor tidak larut sempurna dalam aluminium cair. Karena jumlah fosfor yang ditambahkan cukup banyak, maka fosfor ditambahkan sedikit demi sedikit. 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.



**Gambar 3.6** Jumlah fosfor yang ditambahkan

Terdapat sedikit perbedaan jumlah penambahan fosfor aktual dengan perhitungan dikarenakan tingkat ketelitian timbangan yang terbatas. Perbandingan antara jumlah fosfor yang ditambahkan dengan hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel dibawah.

**Tabel 3.3** Perbandingan jumlah fosfor hasil perhitungan dengan jumlah fosfor aktual

Kadar P	Jumlah P Hasil Perhitungan (gr)	Jumlah P yang Ditambahkan (kg)
0%	0	0
0,003%	466,32	0,467
0,004%	621,76	0,622
0,005%	777,2	0,78
0,006%	932,64	0,934

#### 3.3.4. Proses Penuangan

Setelah fosfor yang ditambahkan larut sempurna dan telah tercampur merata dalam aluminium cair, tahap selanjutnya adalah penuangan logam cair ke dalam cetakan. Proses penuangan logam ke cetakan berlangsung pada temperatur  $\pm 0^{\circ}\text{C}$  dengan waktu solidifikasi  $\pm 1$  menit. Logam dituang ke dalam dua cetakan berbeda yang sudah *dicoating* dan *dipreheating* terlebih dahulu dengan waktu tuang berkisar antara 6 – 10 detik. Kedua cetakan tersebut adalah cetakan uji tarik dan cetakan spektrometer. Penuangan ke dalam cetakan uji tarik dilakukan dua kali dimana dalam sekali tuang menghasilkan satu pasang sample uji tarik sehingga menghasilkan lima sampel yaitu dua pasang sampel uji tarik dan satu sampel uji spektro.

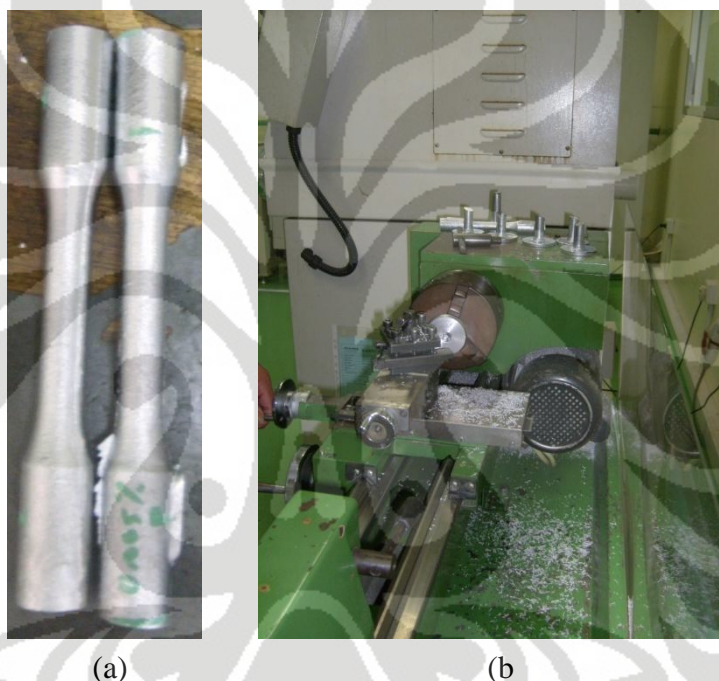


**Gambar 3.7** Hasil cor

### 3.3.5. Preparasi Sampel

#### 3.3.5.1. Preparasi Sampel Uji Tarik dan Uji Komposisi Kimia

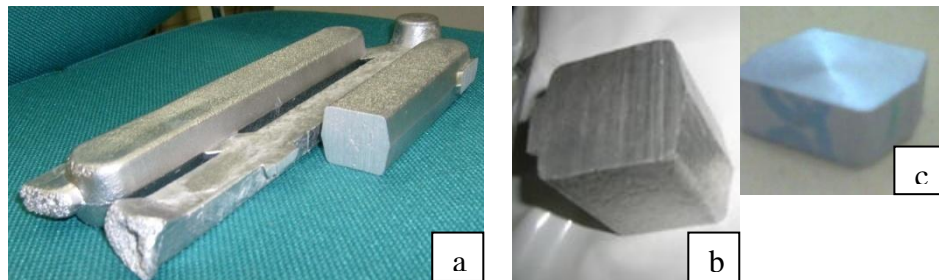
Untuk sampel uji tarik hanya dilakukan proses *cutting* untuk memisahkan sampel dari *gate*-nya. Sedangkan untuk sampel uji komposisi kimia, selain dilakukan proses *cutting* pada bagian atas sampel, juga dilakukan proses pembubutan pada permukaan bawah sampel yang akan diuji untuk menghasilkan permukaan yang rata dan membersihkan dari kotoran – kotoran yang dapat mempengaruhi hasil uji komposisi kimia.



**Gambar 3.8** (a) Sampel uji tarik yang telah dipreparasi; (b) Proses pembubutan sampel uji komposisi kimia

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

Sampel uji kekerasan dan uji keausan diambil dari cetakan uji tarik. Sampel yang diambil dari cetakan uji tarik diambil pada lokasi yang sama. Khusus sampel uji keausan, sampel dipotong dengan ukuran ketebalan 1,5 cm. Setelah selesai pemotongan, sampel kemudian dibubut sehingga didapatkan permukaan sampel yang rata.



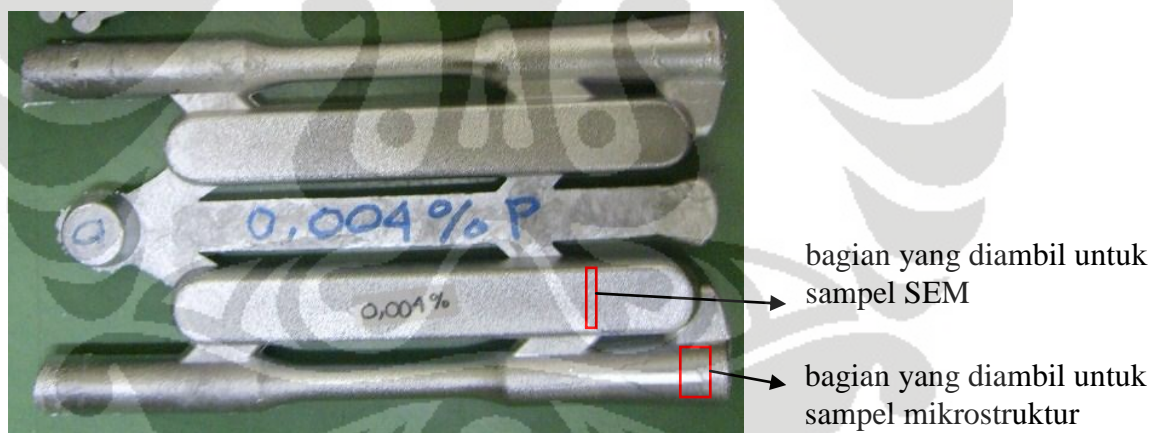
**Gambar 3.9** (a) Penampang cetakan uji tarik yang diambil untuk sampel uji kekerasan dan aus; (b) Sampel uji kekerasan; (c) Sampel uji keausan

### 3.3.5.3. Preparasi Sampel Uji Struktur Mikro dan SEM

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, sedangkan sample SEM diambil dari bagian cetakan uji tarik. Pemotongan dilakukan dengan menggunakan mesin *cutting*.

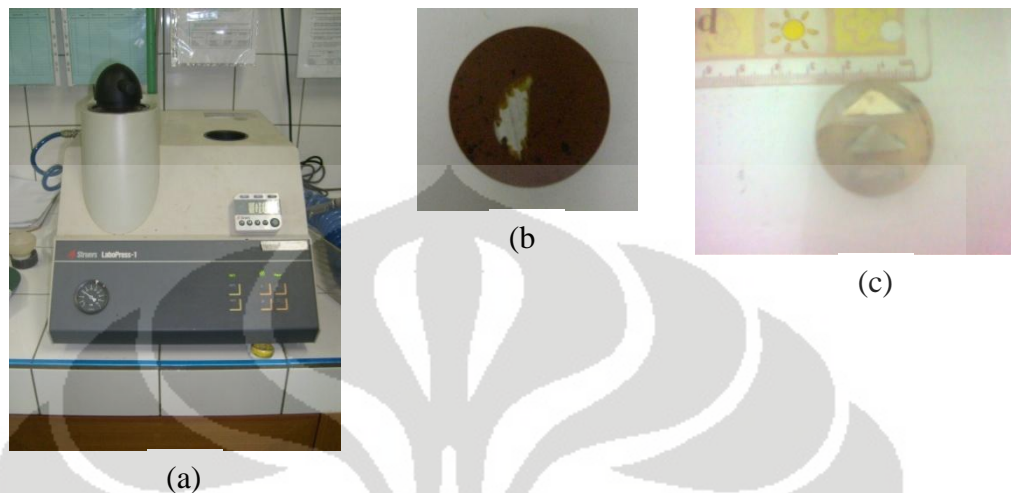


**Gambar 3.10** Penampang sampel uji tarik yang diambil untuk sampel mikrostruktur dan SEM

#### 2. *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. Sedangkan untuk sampel

SEM jenis mounting yang digunakan adalah *castable mounting* dengan bahan dasar resin dan *hardener*.



**Gambar 3.11** (a) *Mounting Press Machine*; (b) Hasil *mounting* sampel struktur mikro; (c) Hasil *mounting* sampel SEM

### 3. *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)  
**Gambar 3.12** (a) Mesin *Grinding & Polishing* ; (b) Proses pengamplasan

#### 4. *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 3.13** Proses pemolesan

#### 5. *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.

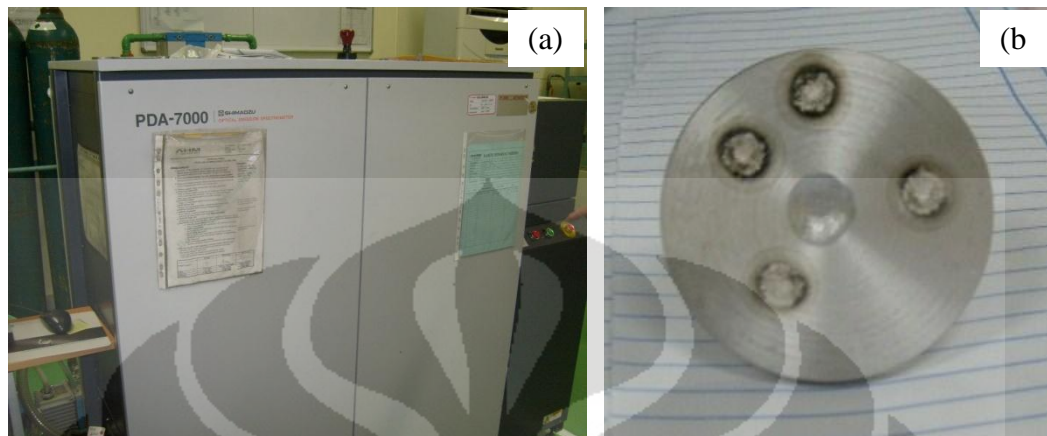
### 3.4. PENGUJIAN

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

#### 3.4.1. Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan mesin *spectrometer* Shimadzu yang memanfaatkan panjang gelombang dan spektrum warna dengan cara mengeksitasi warna dan panjang gelombang dari atom – atom dalam unsur - unsur yang terkandung dalam suatu material. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah komposisi kimia (kandungan fosfor) aktual

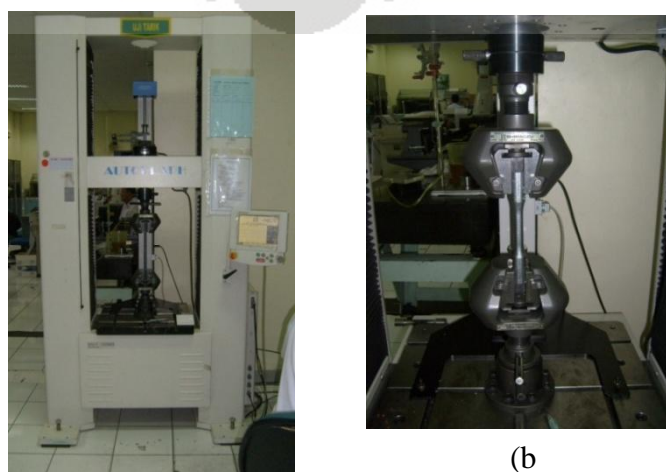
sample sama seperti komposisi kimia target. Pada penelitian ini dilakukan tiga sampai empat penembakan di tempat yang berbeda untuk setiap sampelnya.



**Gambar 3.14** (a) Mesin Spectrometer Shimadzu; (b) Hasil uji komposisi setelah penembakan

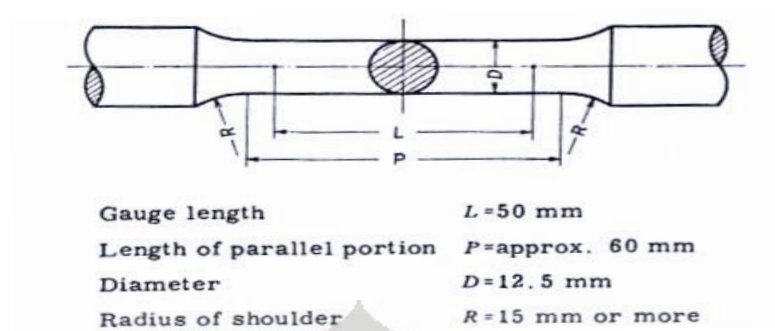
### 3.4.2. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik Shimadzu (gambar 3. 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. 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.



(a) Pengaruh penambahan..., Martha Indriyati, FTUI, 2008





(c)

**Gambar 3.15** (a) Mesin uji tarik Shimadzu; (b) Peletakan sample pada mesin uji tarik; (c) Standar ASTM sample pengujian tarik

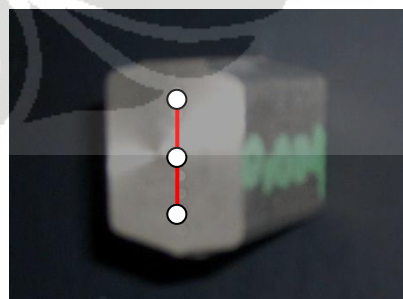
### 3.4.3. Pengujian Kekerasan

Prinsip pengujian kekerasan adalah permukaan material yang rata dilakukan penekanan dengan indenter 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 indenter 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)



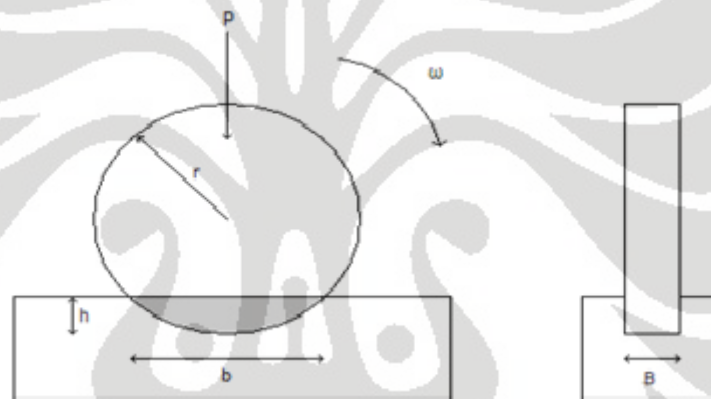
(b)

**Gambar 3.16** (a) Hardness Rockwell Tester; (b) Penjejakan sample

### 3.4.4. 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 3.17** 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 ( $W$ ) :

$$W = \frac{B \cdot b^3}{12 r} \dots\dots\dots (1)$$

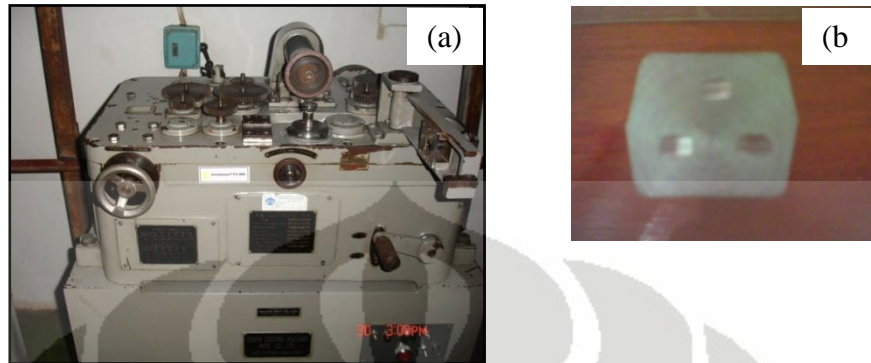
Laju keausan ( $V$ ) dapat ditentukan sebagai perbandingan volume terabrasi ( $W$ ) dengan jarak luncur  $x$  (setting pada mesin uji):

$$V = \frac{W}{x} = \frac{B \cdot b^3}{12 r \cdot x} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

$B$  (Tebal cincin putar) = 3 mm

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



**Gambar 3.18** (a) Mesin Pengujian Keausan Ogoshi; (b) Sampel yang telah diuji aus

#### 3.4.5. Pengujian Struktur Mikro dengan Mikroskop Optik

Sampel yang telah dietsa 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.



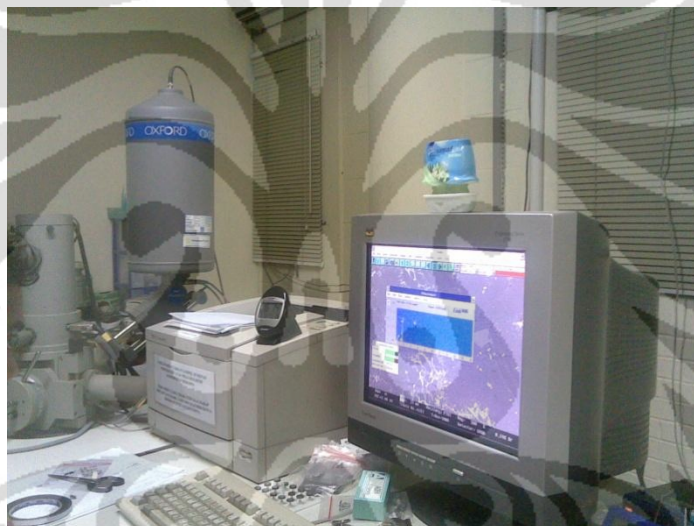
**Gambar 3.19** Pengamatan pada mikroskop optik digital Keyence

#### 3.4.6. Pengujian Struktur Mikro dengan SEM dan EDS

Pengujian ini dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material FTUI dengan menggunakan SEM/EDAX LEO. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk dan komposisi fasa yang ada. Prinsip pengujian ini adalah

dengan menggunakan elektron yang ditembakkan pada sampel. Hamburan elektron dari hasil tumbukan dengan sampel akan ditangkap oleh detektor – detektor pada SEM yang kemudian dapat menghasilkan gambar mikrostruktur pada monitor.

Sebelum pengamatan SEM dimulai, sampel di-*coating* terlebih dahulu dengan Au-Pd, hal ini bertujuan agar sampel dapat menghantarkan elektron dengan baik, mencegah terjadinya *charging* berlebih ketika ditembakkan elektron serta untuk meningkatkan kontras warna pada gambar. Selanjutnya sampel dimasukkan ke dalam alat pengujian SEM dan di vakum selama lebih kurang 15 menit, dan kemudian sampel ditembakkan dengan *probe level* tertentu.



**Gambar 3.20 SEM/EDAX LEO**

## 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 material AC8A yang telah dikondisikan pada keadaan hipereutektik dan ditambahkan fosfor yang digunakan dalam penelitian ditampilkan pada Tabel 4.1, sedangkan data mentah hasil pengujian terdapat pada lampiran A.

**Tabel 4.1** Hasil pengujian komposisi kimia

UNSUR PADUAN	Standar Komposisi AC8A (JIS H 5202)	Variasi Penambahan Modifier P (wt %)				
		0	0,003	0,004	0,005	0,006
Si	11 - 13	14,08	13,91	13,27	13,61	13,26
Mg	0,7 - 1,3	1,006	1,004	1,025	1,052	1,024
Cu	0,8 - 1,3	1,09	1,091	1,59	1,46	1,56
Zn	0,1 max	0,08	0,079	0,064	0,072	0,066
Fe	0,8 max	0,36	0,38	0,35	0,41	0,38
Mn	0,1 max	0,06	0,065	0,060	0,071	0,063
Ni	1,0 - 2,5	0,76	0,79	0,59	0,75	0,64
Ti	0,2 max	0,15	0,15	0,16	0,16	0,19
Cr	-	0,015	0,015	0,014	0,015	0,015
P	-	0,0025	0,0027	0,0038	0,0046	0,0061
Sr	-	0,00027	0,00025	0,0002	0,00024	0,0001
<b>TARGET P (wt %)</b>		0	0,003	0,004	0,005	0,006

Pada tabel 4.1 di atas dapat dilihat komposisi dari paduan dengan penambahan 0%, 0,003%, 0,004%, 0,005% dan 0,006% P. Data pengujian yang dilakukan dibandingkan dengan literatur yang ada, dalam hal ini adalah standar komposisi JIS H5202. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa terdapat sedikit penyimpangan terhadap standar acuan pada komposisi paduan aluminium yang digunakan.

Karena komposisi paduan AC8A masih berada pada daerah eutektik dengan kadar Si sebesar 11 – 13% dan hasil pengujian spektro sebelum penambahan silikon menunjukkan kadar Si yang hanya 11,6 %, maka pada penelitian ini ditambahkan silikon l 52 h sehingga komposisi paduan yang digunakan berada pada daerah hipereutektik dengan kandungan Si > 13%. Dari data di atas, dapat dilihat bahwa kandungan silikon pada material AC8A yang digunakan dalam penelitian berada pada nilai antara 13,26 – 14,08% yang berarti bahwa komposisi paduan tersebut berada pada kondisi hipereutektik.

Dari data di atas terlihat bahwa terdapat sedikit penyimpangan pada kandungan fosfor aktual terhadap target kandungan fosfor yang ingin dicapai. Kandungan fosfor yang didapat adalah 0,0025wt % untuk penambahan 0% P, 0,0027 wt % untuk penambahan 0,003% P, 0,0038 wt % untuk penambahan 0,004% P, 0,0046 wt % untuk penambahan 0,005% P dan 0,0061 wt % untuk penambahan 0,006% P. 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. Selain itu, pada sampel tanpa penambahan fosfor ternyata pada sample itu sendiri sudah terdapat kandungan fosfor sebesar 0,0025 wt %. Terdapatnya sejumlah fosfor pada *master alloy* ini bisa saja terjadi, hal ini dapat diakibatkan oleh kontaminasi dari binder fosfat dan mortar yang terdapat pada refraktori *furnace* dan juga sisa-sisa *scrap* yang menempel pada refraktori<sup>[27]</sup>.

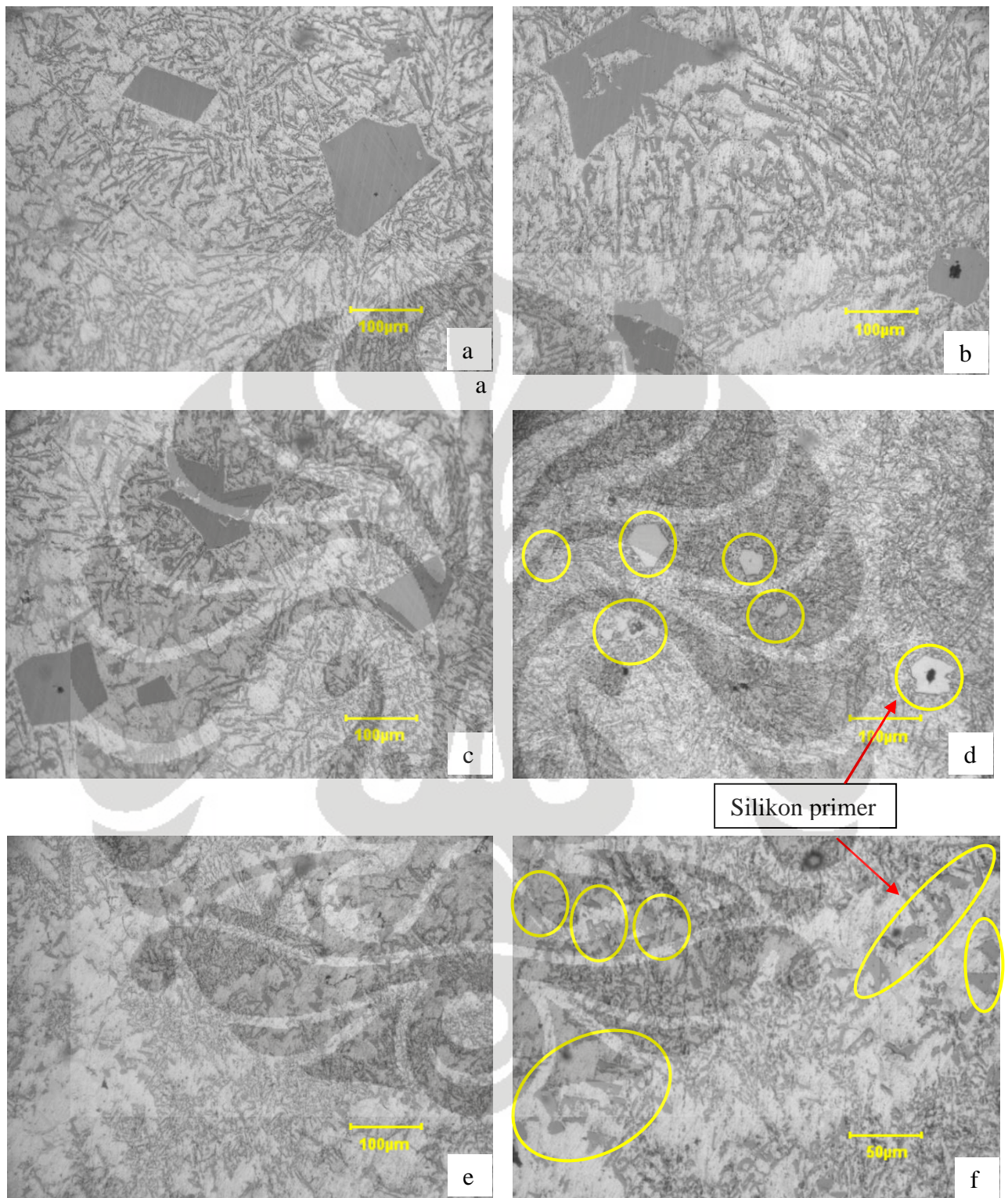
Selain itu terdapat penyimpangan pada kandungan tembaga pada penambahan 0,004% P, 0,005% P dan 0,006% P. Kandungan tembaga pada sample – sample tersebut sedikit melebihi batas maksimum kandungan tembaga pada material AC8A menurut standar JIS H 5202. Diduga hal ini disebabkan akibat adanya kandungan Cu pada *master alloy* Al-0,00193 wt% P sehingga menambah jumlah kadar Cu dalam paduan aluminium tuang AC8A. Hal ini akan mempengaruhi sifat mekanis yang akan dihasilkan karena tembaga berperan dalam meningkatkan kekerasan dan kekuatan paduan aluminium silikon.

Perbedaan terhadap standar JIS H 5202 juga terjadi pada kandungan kromium (Cr) dan stronsium (Sr). Unsur paduan Cr dan Sr tersebut seharusnya tidak terdapat dalam paduan aluminium tuang AC8A karena tidak sesuai dengan standar JIS H 5202. Presentase unsur kromium dalam paduan aluminium AC8A yang terdeteksi pada alat spektrometer berkisar antara 0,014 – 0,015 wt %. Berdasarkan literatur, kromium berlaku sebagai pengotor minor dalam aluminium komersial. Penambahan kromium ini umumnya tidak melebihi 0,35 wt % dan jika jumlahnya melebihi batas tersebut akan meningkatkan kecenderungan terbentuknya partikel yang sangat kasar bersamaan dengan penambahan unsur pengotor lain seperti mangan (Mn), besi (Fe) dan titanium (Ti). Sedangkan keberadaan unsur stronsium dapat menimbulkan interaksi dengan unsur fosfor. Interaksi antara fosfor dan stronsium ini dapat mempengaruhi struktur silikon eutektik yang terbentuk. Struktur-struktur yang tersebut dapat berupa *acicular*, *lamellar* ataupun *fibrous*. Hal ini tergantung dari kandungan fosfor dan stronsium yang saling berinteraksi. Hadirnya unsur kromium dan stronsium dalam paduan aluminium tuang AC8A kemungkinan besar disebabkan karena ingot yang digunakan oleh PT.X sebagai bahan baku memang telah mengandung unsur kromium dan stronsium dari tempat asal ingot diproduksi.

#### **4.2. HASIL DAN ANALISA PENGAMATAN MIKROSTRUKTUR**

Pengamatan mikrostruktur dilakukan untuk melihat perubahan mikrostruktur yang terjadi akibat penambahan modifier fosfor. Pengamatan mikrostruktur ini dilakukan dengan bantuan alat mikroskop optik digital dengan perbesaran 450X dan 1000X.

Pada paduan Al-Si, terdapat dua fasa yang sangat menentukan sifat mekanis, yaitu silikon eutektik dan silikon primer. Perubahan bentuk yang terjadi pada kedua fasa ini turut menyebabkan perubahan sifat mekanis paduan. Hasil pengamatan mikrostruktur penambahan modifier fosfor dapat dilihat pada gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Hasil pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik digital (a) 0,0025 wt % P; (b) 0,0027 wt % P; (c) 0,0038 wt % P; (d) 0,0046 wt % P; (e) 0,0061 wt % P; (f) 0,0061 wt % P



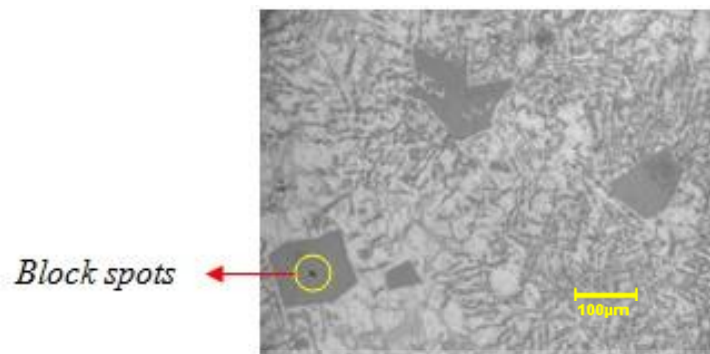
#### 4.2.1. Pengaruh Penambahan Fosfor terhadap Morfologi Silikon Primer

Gambar 4.1 memperlihatkan hasil pengamatan mikrostruktur paduan AC8A dengan variasi penambahan fosfor 0,0025 wt %, 0,0027 wt %, 0,0038 wt %, 0,0046 wt % dan 0,0061 wt %.

Dari hasil pengamatan mikrostruktur pada variasi penambahan fosfor 0,0025 wt%, 0,0027 wt %, 0,0038 wt %, 0,0046 wt % dan 0,0061 wt % memperlihatkan adanya penurunan dan penghalusan ukuran silikon primer dari paduan aluminium silikon hipereutektik. 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 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>[27]</sup>.

Selain ukuran silikon primer yang semakin menurun dengan penambahan fosfor, bentuk dan jumlah silikon primer juga mengalami perubahan. Silikon primer yang tadinya berbentuk poligonal dan kasar pada variasi penambahan fosfor 0,0025 wt % berubah menjadi *blocky* dan *faceted shape* seiring dengan penambahan jumlah fosfor. Jumlah silikon primer juga mengalami peningkatan seiring dengan penambahan fosfor walaupun tidak signifikan, hal ini disebabkan 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. Silikon primer tersebut akan tumbuh dari inti yang lebih banyak, karena itulah ukurannya semakin menurun dengan penambahan fosfor.

Pada gambar 4.1 terlihat adanya titik hitam yang berada dalam partikel silikon primer yang biasa dikenal sebagai “*block spots*” yang tidak lain merupakan senyawa AIP yang berperan bagi pertumbuhan silikon primer<sup>[26]</sup>.

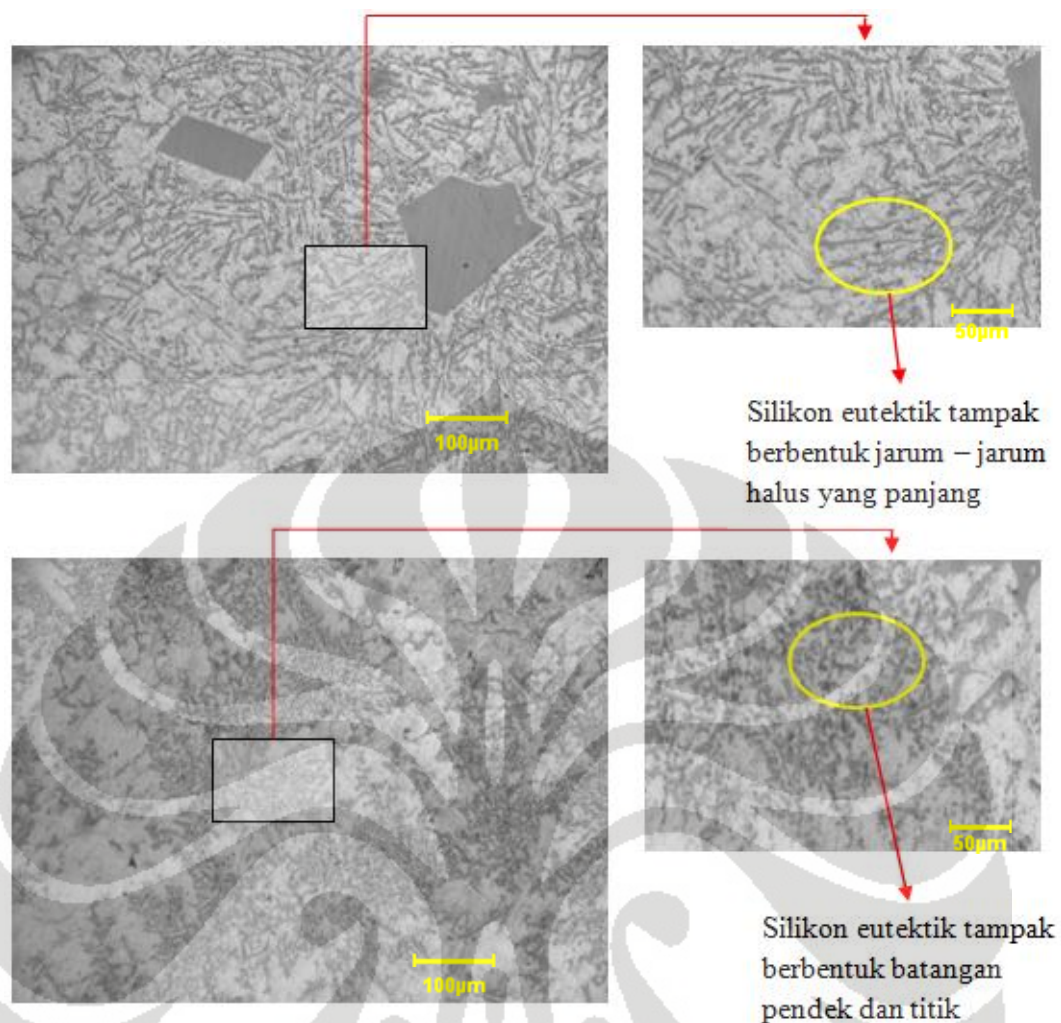


**Gambar 4.2** *Block spots* pada silikon primer

#### 4.2.2. Pengaruh Penambahan Fosfor terhadap Morfologi Silikon Eutektik

Menurut literatur, penambahan fosfor tidak akan mempengaruhi morfologi silikon primer<sup>[28],[29]</sup>. Tetapi juga terdapat literatur yang mengatakan bahwa penambahan fosfor akan mempengaruhi morfologi silikon eutektik yang tadinya berbentuk dendrit – dendrit besar atau seperti jarum – jarum menjadi seperti batangan pendek atau titik<sup>[27]</sup>. Hasil pengamatan mikrostruktur memperlihatkan adanya perubahan morfologi silikon eutektik dengan penambahan fosfor. Silikon eutektik yang tadinya berbentuk jarum – jarum halus yang panjang sebelum penambahan fosfor menjadi lebih berbentuk batangan pendek atau titik setelah penambahan fosfor.

Perubahan morfologi silikon eutektik ini mungkin disebabkan oleh perubahan silikon primer dalam struktur mikro paduan yang akan mempengaruhi morfologi silikon eutektik. Pertumbuhan silikon eutektik pada paduan aluminium silikon hipereutektik dipengaruhi oleh silikon primer dimana jika silikon primer terdistribusi dalam matriks dengan jarak yang jauh, maka silikon eutektik akan tumbuh menjadi jarum – jarum panjang<sup>[27]</sup>.



**Gambar 4.3** Perubahan morfologi silikon eutektik (a) sebelum penambahan fosfor; (b) setelah penambahan fosfor 0,0061 wt %

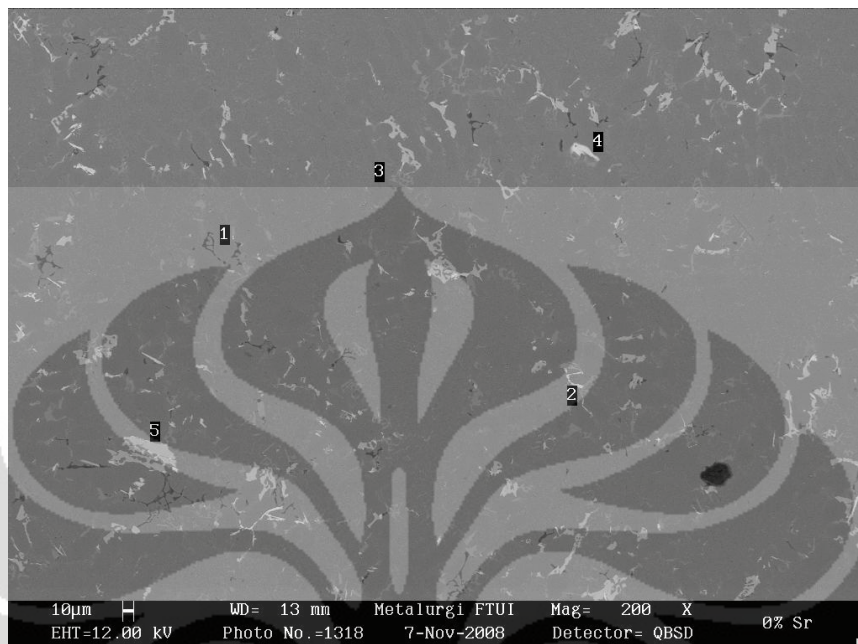
#### 4.3. HASIL DAN ANALISA PENGAMATAN SEM/EDS

Pengamatan hasil mikrostruktur yang terbentuk pada paduan aluminium AC8A yang telah ditambahkan modifier fosfor dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) dan Electron Dispersion Spectrometry (EDS). Pengamatan ini bertujuan untuk melihat fasa – fasa yang terbentuk pada paduan AC8A tersebut.

##### 4.3.1. Hasil dan Analisa Fasa yang Terbentuk

Pengamatan SEM dan EDS hanya dilakukan pada tiga sample yaitu pada variasi penambahan 0,0025 wt % P, 0,0038 wt % P dan 0,0061 wt % P. Hasil

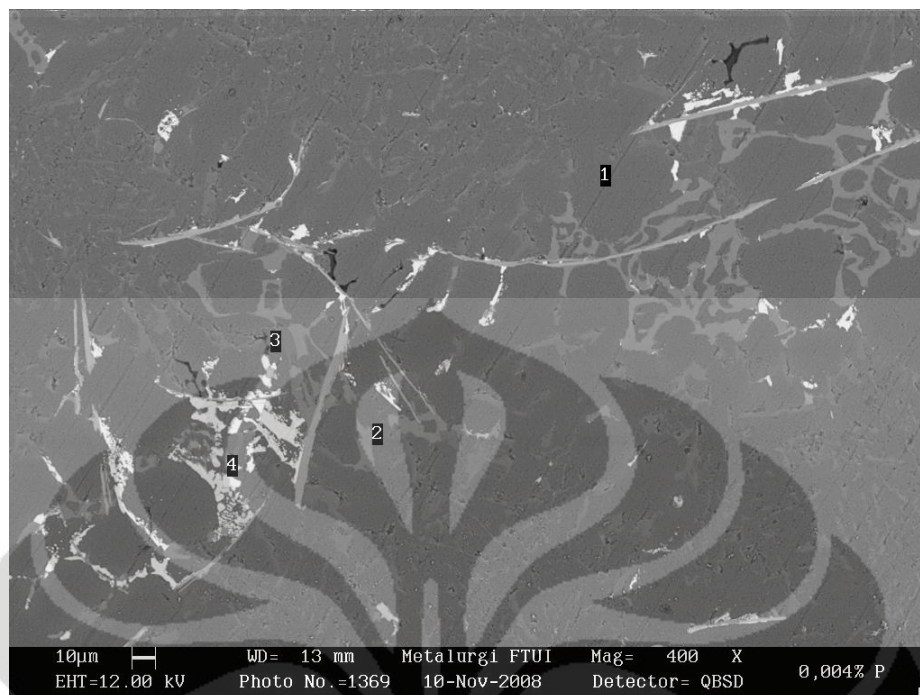
pengamatan SEM untuk variasi penambahan fosfor 0,0025 wt %, 0,0038 wt % dan 0,0061 wt % berturut – turut ditampilkan pada gambar 4.4, 4.5 dan 4.6



**Gambar 4.4** Hasil pengamatan SEM as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0025 wt % P, perbesaran 200x

**Tabel 4.2** Hasil analisa komposisi as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0025 wt % P

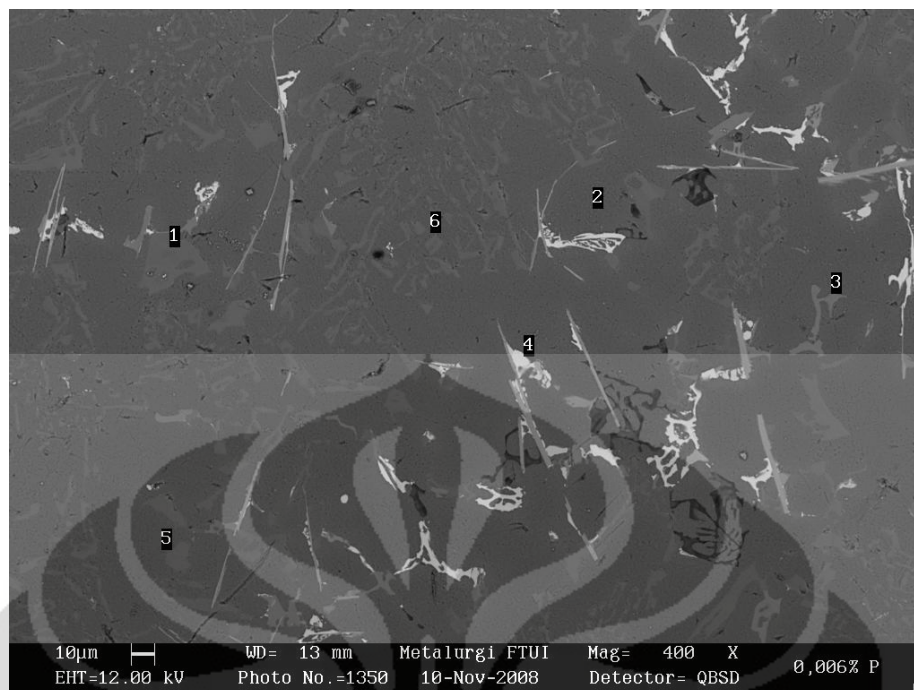
No	Komposisi (wt %)							Warna	Indikasi fasa yang terbentuk
	C	O	Al	Si	Cu	Fe	Mg		
1	0,54	0,65	97,43	1,38	-	-	-	gelap	Matriks $\alpha$ -Al
2	0,49	1,01	85,59	12,91	-	-	-	Abu – abu gelap	Eutectic
3	0,75	1,00	80,24	17,76	-	-	0,25	Abu – abu gelap	Eutectic
4	0,98	0,73	30,24	69,05	-	-	-	Abu – abu terang	Kristal Silikon
5	1,30	-	69,81	5,95	21,87	2,15	-	Abu – abu terang	Al-Si-Fe-Cu



**Gambar 4.5** Hasil pengamatan SEM as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,004 wt % P, perbesaran 400x

**Tabel 4.3** Hasil analisa komposisi as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,004 wt % P

No	Komposisi (wt %)									Warna	Indikasi fasa yang terbentuk
	C	O	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Ni	Ar		
1	0,64	1,13	95,60	1,30	-	-	-	-	1,33	gelap	Matriks $\alpha$ -Al
2	0,87	1,39	62,55	16,93	-	6,85	11,42	-	-	Abu – gelap	$Mg_2Si$
3	1,45	-	2,92	95,63	-	-	-	-	-	Abu- terang	Kristal Silikon
4	0,32	-	29,39	0,16	40,97	-	-	29,17	-	putih	$AlCu_2$



**Gambar 4.6** Hasil pengamatan SEM as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0061 wt % P, perbesaran 400x

**Tabel 4.4** Hasil analisa komposisi as-cast paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan 0,0061 wt % P

No	Komposisi (wt %)								Warna	Indikasi fasa yang terbentuk
	C	O	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Ni		
1	1,40	1,31	1,35	95,94	-	-	-	-	gelap	Kristal Silikon
2	0,53	1,10	97,24	1,13	-	-	-	-	gelap	Matriks $\alpha$ -Al
								6,19	Abu –	
3	1,42	1,46	57,37	16,81	-	4,65	12,08		abu	$Mg_2Si$
									gelap	
4	0,33	1,01	25,89	0,84	62,01	-	0,71	9,22	Putih	$AlCu_2$
									Abu –	
5	1,11	-	1,97	96,92	-	-	-		abu	Kristal Silikon
									terang	
									Abu –	
6	0,99	-	15,13	83,88	-	-	-		abu	Kristal Silikon
									terang	

Pada gambar 4.4 , hasil pengamatan SEM dapat dibedakan dari bentuk (morfologi), warna, serta komposisi kimia fasa – fasa yang ada. Pada fasa nomor 1 tampak berwarna gelap dan fasa ini memiliki jumlah yang dominan diantara fasa – fasa lainnya. Fasa nomor 2 dan 3 tampak berwarna abu - abu gelap (*dark grey*) dimana ciri khas warnanya agak kurang terlihat jelas. Fasa nomor 4 memiliki warna yang lebih terang dibandingkan dengan fasa nomor 3 dan memiliki morfologi *blocky*. Fasa nomor 5 tampak berwarna abu – abu terang (*light grey*) dan memiliki morfologi berbentuk *chinese script* dan *elongated*.

Pada gambar 4.5 , hasil pengamatan dengan SEM menunjukkan sedikit perbedaan dengan gambar 4.4 , dimana pada gambar 4.5 terdapat fasa nomor 4 yang berwarna putih serta terdapat fasa berwarna abu – abu yang berbentuk seperti jarum (*needles*). Sedangkan pada gambar 4.6 , hasil pengamatan SEM memperlihatkan kemiripan bentuk (morfologi), warna, serta komposisi kimia fasa – fasa yang ada pada gambar 4.5

Untuk mengetahui komposisi kimia dari fasa – fasa yang berbeda tersebut, maka dilakukan pengujian EDS. Hasil pengujian EDS untuk variasi penambahan fosfor 0,0025 wt % , 0,0038 wt % dan 0,0061 wt % berturut – turut ditampilkan pada tabel 4.2 , 4.3 dan 4.4 . Setelah melalui pengujian EDS, maka dapat diketahui fasa – fasa yang berbeda tersebut.

Pada gambar 4.4, fasa nomor 1 merupakan fasa  $\alpha$ -aluminium (matriks). Fasa nomor 2 dan 3 merupakan fasa aluminium – silikon eutektik. Sedangkan fasa nomor 4 yang berbentuk *blocky* merupakan kristal silikon primer, dan fasa nomor 5 yang berwarna abu – abu terang dengan bentuk *chinese script* dan *elongated* merupakan fasa Al-Si-Fe-Cu.

Pada gambar 4.5, fasa nomor 1 yang berwarna gelap merupakan matriks  $\alpha$ -aluminium. Unsur argon pada fasa nomor 1 ini berasal dari gas argon yang terperangkap pada saat proses *degassing*. Fasa nomor 2 yang berwarna abu – abu gelap merupakan fasa  $Mg_2Si$  yang kaya akan Fe. Dan fasa nomor 4 yang berwarna putih dengan morfologi *blocky* dan *cluster* merupakan fasa  $Al_2Cu$  yang kaya akan Ni. Sedangkan fasa – fasa yang berwarna abu – abu gelap dimana ciri khas warnanya agak kurang terlihat jelas merupakan fasa eutektik, sama seperti gambar 4.4. Disamping itu, terdapat pula fasa berwarna abu – abu terang yang berbentuk

seperti jarum – jarum panjang yang belum diketahui komposisinya karena belum mengalami penembakan EDS. Tetapi dari literatur yang ada, fasa tersebut memiliki kemiripan morfologi serta warna dengan fasa  $Al_5FeSi$ .

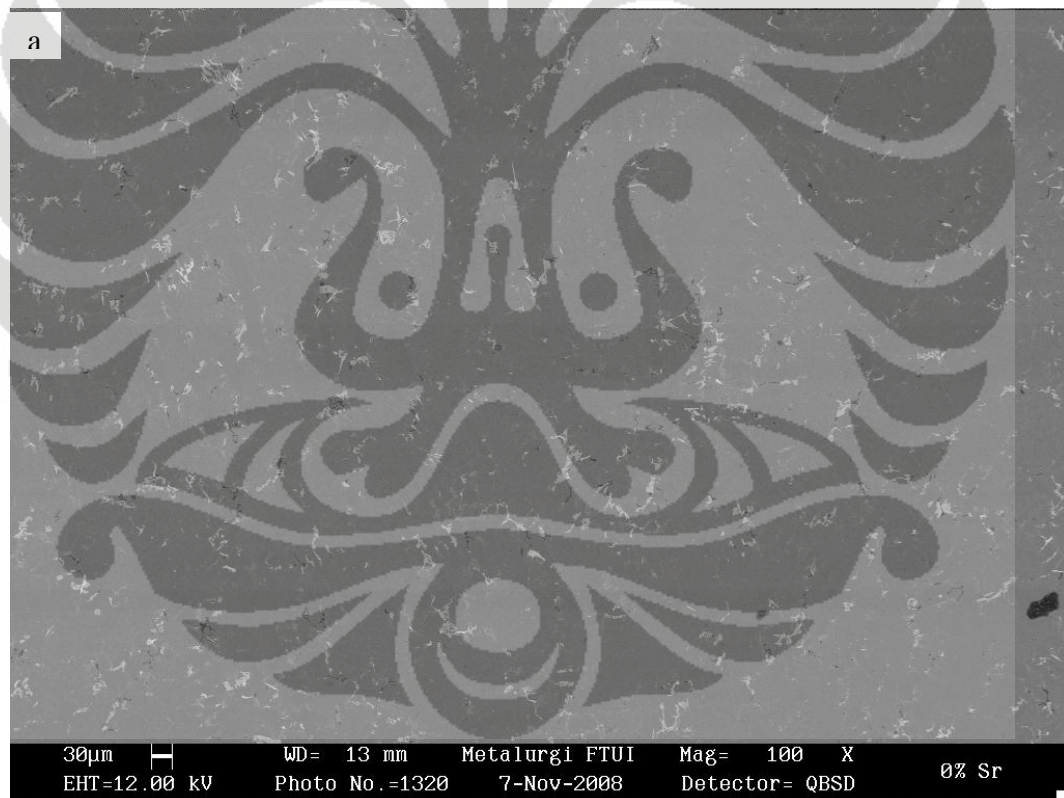
Pada gambar 4.6, fasa nomor 1, nomor 5 serta nomor 6 yang berbentuk *blocky* dan berwarna abu – abu merupakan fasa kristal silikon. Fasa nomor 2 yang berwarna gelap merupakan fasa  $\alpha$ -aluminium. Fasa nomor 3 yang berwarna abu – abu gelap merupakan fasa  $Mg_2Si$  yang kaya akan Ni dan Fe. Fasa nomor 4 yang berwarna putih dan memiliki morfologi *chinese script* serta *pocket* (kantong) merupakan fasa  $Al_2Cu$ . Sedangkan fasa – fasa yang berwarna abu – abu gelap dimana ciri khas warnanya agak kurang terlihat jelas merupakan fasa eutektik. Disamping itu, terdapat pula fasa berwarna abu – abu terang yang berbentuk seperti jarum – jarum panjang. Diperkirakan fasa ini merupakan fasa  $Al_5FeSi$  karena morfologi dan warna dari struktur ini menunjukkan kesamaan dengan literatur. Terlihat, dengan perbesaran yang sama, fasa  $Al_5FeSi$  yang berwarna abu – abu terang serta mempunyai morfologi seperti jarum – jarum panjang terlihat lebih tersebar merata dengan panjang yang lebih pendek dan lebih halus dibandingkan dengan gambar 4.5. Dari literatur yang ada, dijelaskan bahwa proses laju pembekuan sangat mempengaruhi kehalusan, kekasaran, morfologi serta distribusi fasa intermetalik. Kehalusan, kekasaran, morfologi dan distribusi fasa intermetalik ini mempengaruhi sifat mekanis dari paduan aluminium tuang. Semakin cepat laju pembekuan, maka akan dihasilkan fasa intermetalik yang semakin halus dan terdistribusi merata, hal ini dapat meningkatkan sifat mekanis paduan aluminium tuang. Sebaliknya, dengan semakin lambat laju pembekuan, maka akan dihasilkan fasa intermetalik yang kasar dan pengkonsentrasian fasa intermetalik di batas butir, dimana hal ini menyebabkan mekanisme penguatan paduan aluminium menjadi menurun.

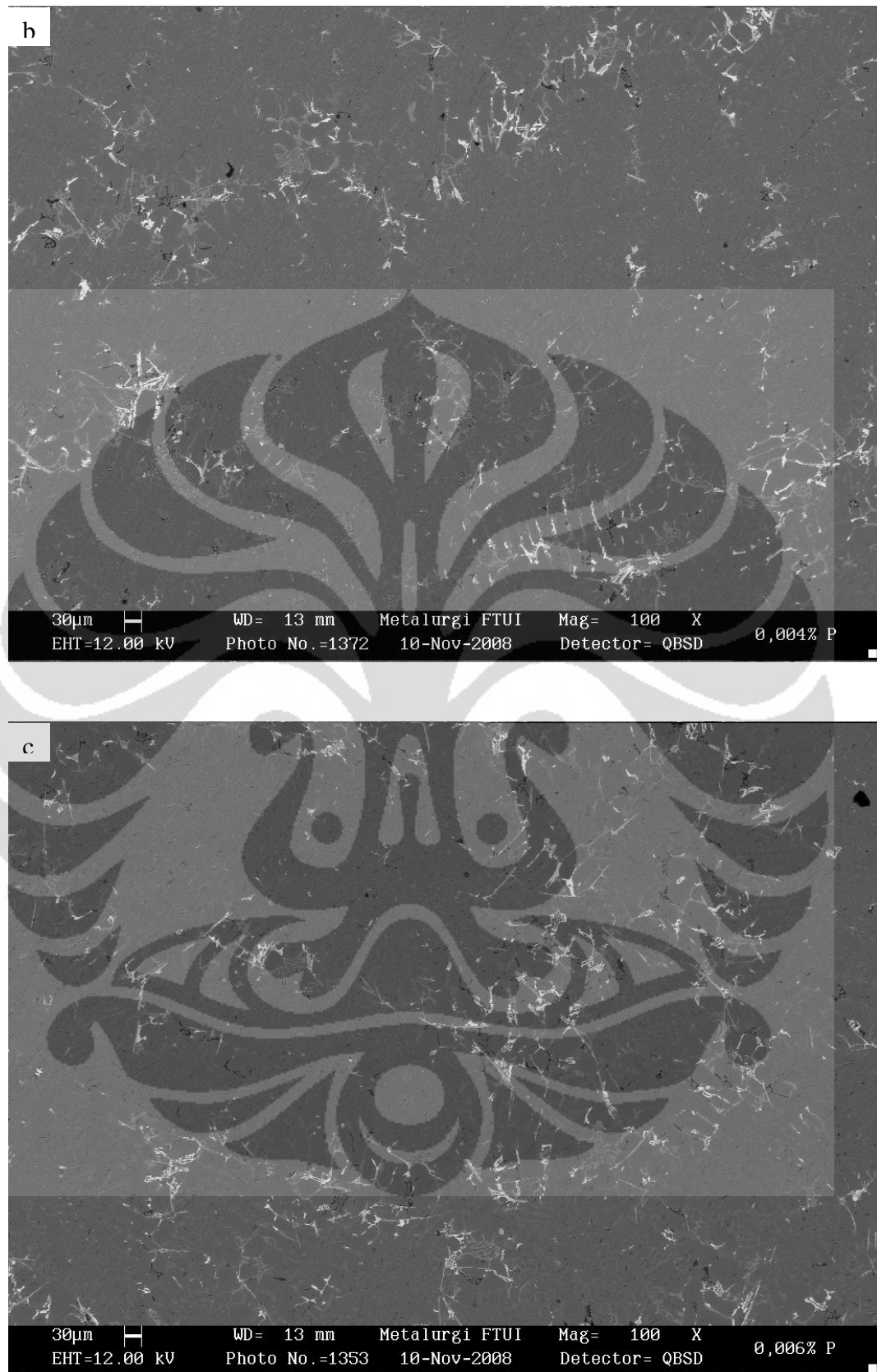
Pada ketiga struktur mikro tersebut terdapat fasa silikon eutektik, silikon primer serta unsur – unsur lain seperti Fe, Cu, Mg serta O dan C. Terbentuknya fasa kristal silikon ini disebabkan karena pemberian unsur silikon yang terlalu berlebih, padahal kelarutan silikon dalam keadaan padat dalam aluminium cukup rendah yaitu sekitar 1,65 wt % sehingga sisa dari silikon yang tidak larut sebagian ada yang membentuk partikel bebas yang dikenal sebagai kristal silikon dan



sebagian lagi bersenyawa dengan unsur – unsur pengotor (impurity) seperti Fe, Cu, dan Mg membentuk fasa intermetalik. Keberadaan fasa intermetalik ini akan meningkatkan sifat mekanis benda cor. Tetapi tidak selamanya fasa intermetalik memberikan keuntungan karena fasa tersebut dalam jumlah berlebih dapat menyebabkan timbulnya *hardspot* dan apabila bagian tersebut dimachining maka akan menyebabkan kerusakan prematur pada alat machining. Adanya unsur O dalam paduan akan menimbulkan *non metallic* inklusi karena dapat bereaksi dengan Al membentuk  $Al_2O_3$  dan dengan Si membentuk  $SiO_2$ . Kehadiran oksida tersebut dapat menurunkan sifat mekanis material. Selain unsur O, unsur C juga berperan dalam pembentukan non metallic inklusi karena unsur C dapat bereaksi dengan Al membentuk karbida ( $Al_3C_4$ ).

#### 4.3.2. Hasil dan Analisa Distribusi Fasa





**Gambar 4.7** Persebaran fasa pada material AC8A variasi penambahan fosfor (a) 0,0025 wt %; (b) 0,0038 wt % dan (c) 0,0061 wt %

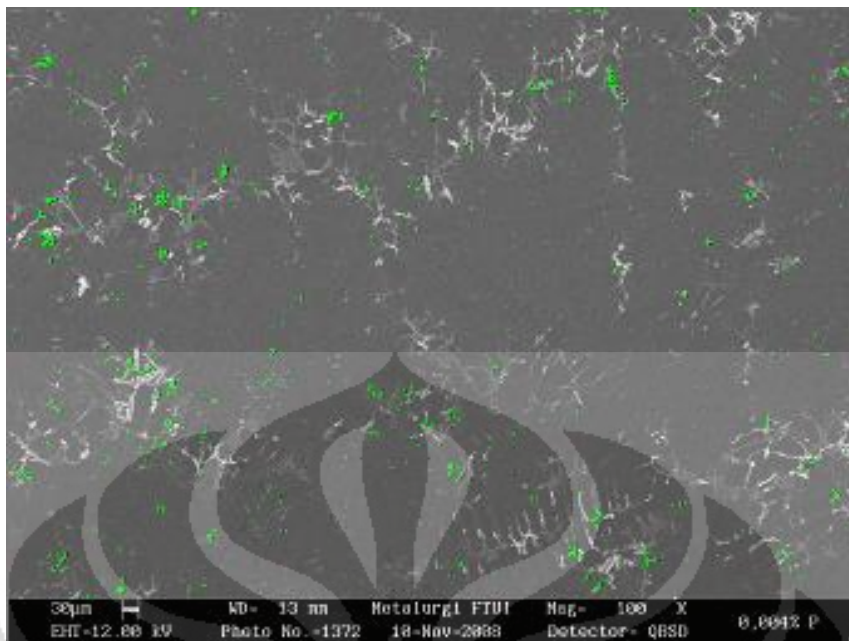
Gambar 4.7 memperlihatkan persebaran fasa pada paduan aluminium tuang AC8A variasi penambahan fosfor 0 wt %, 0,0038 wt % dan 0,0061 wt %. Pada gambar 4.7 a terlihat fasa berwarna abu – abu terang lebih mendominasi struktur mikro, sedangkan pada gambar 4.7 b dan c terlihat fasa berwarna putih yang lebih mendominasi struktur mikro.

Fasa intermetalik  $Al_2Cu$  pada variasi penambahan modifier 0,0061 wt % P terlihat sedikit lebih tersebar merata, walaupun tidak signifikan. Menurut literatur, pembentukan fasa intermetalik terjadi secara difusi sehingga sangat dipengaruhi oleh kecepatan pembekuan yang terjadi. Perbedaan kecepatan pembekuan akan menyebabkan perbedaan ukuran, bentuk, dan distribusi fasa intermetalik yang terbentuk. Semakin cepat proses pembekuan terjadi, jumlah dan sebaran fasa intermetalik semakin meningkat. Dengan laju pendinginan yang semakin cepat maka fasa intermetalik yang terbentuk akan semakin halus dan tersebar merata. Disamping itu, laju pendinginan yang cepat juga akan mengubah bentuk sel dendrit / jarak antara lengan dendrit (DAS) menjadi berukuran lebih kecil. Pada gambar 4.8 terlihat sel dendrit yang merupakan tempat terjadinya fasa intermetalik. Semakin kecil ukuran sel, maka semakin besar persebaran fasa intermetalik dalam suatu paduan aluminium.



**Gambar 4.8** Pembentukan fasa intermetalik dalam sel dendrit

Distribusi porositas pada ketiga variasi penambahan fosfor tersebut juga menunjukkan sedikit perbedaan. Berikut perhitungan fraksi area porositas dengan menggunakan perangkat lunak *PICSARA*.



**Gambar 4.9** Perhitungan fraksi area porositas variable penambahan 0,0038% P dengan menggunakan perangkat lunak *PICSARA*

**Tabel 4.5** Tabel data hasil perhitungan fraksi area porositas dengan *PICSARA*

Variabel Penambahan Fosfor	Data Fraksi Area Porositas (%)
0,0025 wt % P	0,39
0,0038 wt % P	0,48
0,0061wt % P	0,57

Dari data di atas, dapat disimpulkan bahwa porositas akan meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah fosfor yang ditambahkan. 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.

Hu Li-na dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan fosfor dalam paduan hipereutektik tidak hanya mempengaruhi ukuran dan jumlah porositas, tetapi juga mempengaruhi distribusi porositas<sup>[32]</sup>. Hu Li-na mengatakan bahwa terdapat banyak mekanisme tentang porositas, tetapi teori yang

mengatakan bahwa penambahan fosfor akan menurunkan tegangan permukaan merupakan teori yang paling sesuai pada kasus ini. Spekulasi bahwa penurunan tegangan permukaan logam akan menyebabkan poros terbentuk lebih dahulu selama solidifikasi sehingga hal tersebut akan menyebabkan porositas akan bertambah. Berdasarkan analisis termal yang dibangun oleh Zhang Zhong-hua<sup>[32]</sup> pada paduan hipereutektik Al-25% Si hipereutektik, setelah penambahan fosfor (0,5%), temperatur pertumbuhan primer bertambah menjadi 757<sup>0</sup>C dari temperatur normal 739,7<sup>0</sup>C dan *range* temperatur primer sebesar 187,6<sup>0</sup>C, lebih tinggi dibandingkan range dengan temperatur normal yang hanya 174<sup>0</sup>C. Hal ini mendukung sudut pandang bahwa kenaikan temperatur pertumbuhan primer akan mengakibatkan poros terbentuk lebih dahulu.

#### 4.4. PENGARUH FOSFOR TERHADAP KEKUATAN TARIK PADUAN Al - Si HIPEREUTEKTIK

Sample uji tarik yang didapatkan dari hasil pengecoran dilakukan uji tarik dengan menggunakan mesin uji tarik Shimadzu. Terdapat 4 sample uji tarik untuk setiap variabelnya kecuali untuk sample variasi penambahan fosfor 0 wt % yang hanya terdapat 1 sample uji tarik. Pada dasarnya pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai UTS (*Ultimate Tensile Strength*) paduan AC8A hipereutektik sebelum dan setelah penambahan *modifier* P. UTS merupakan tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum terjadinya perpatahan (*fracture*).

Karena data yang didapatkan dari hasil pengujian tarik mempunyai kgf/mm<sup>2</sup>, maka data tersebut terlebih dahulu dikonversikan menjadi MPa sebelum pengolahan lebih lanjut karena biasanya nilai UTS memiliki satuan MPa. Berdasarkan literatur nilai 1 Kgf/mm<sup>2</sup> = 9,8066 N/mm<sup>2</sup>. sedangkan 1 N/mm<sup>2</sup> = 1 Mpa. Maka nilai UTS pada tabel dia atas dikonversikan ke dalam satuan MPa dengan cara mengalikan nilai tersebut dengan 9,8066 N.

$$1 \text{ kgf/mm}^2 = 9.80665\text{N/mm}^2 \quad \dots\dots\dots$$

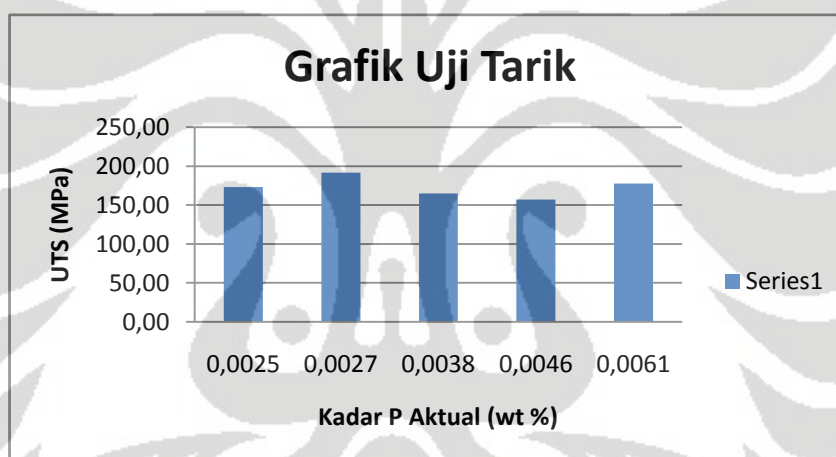
$$1\text{N/mm}^2 = 1\text{MPa} \quad \dots\dots\dots$$

$$\mathbf{1 \text{ Kgf/mm}^2 = \mathbf{9,80665 \text{ MPa}} \quad \dots\dots\dots$$

Data konversi hasil pengujian tarik dari Kgf/mm<sup>2</sup> menjadi MPa dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.6** Tabel data uji tarik paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P

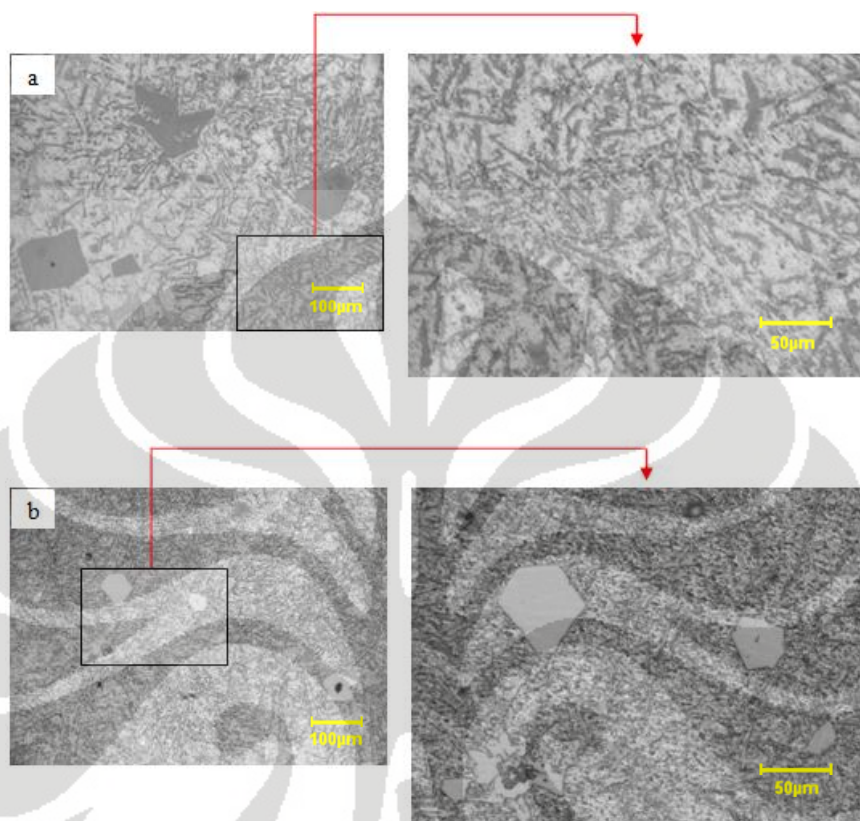
No	Kadar P Target (wt %)	Kadar P Aktual (wt %)	Max Stress (MPa)				Average Stress (MPa)
			Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	
1	0	0,0025	173,10	-	-	-	173,10
2	0,003	0,0027	190,80	194,04	209,37	172,79	191,75
3	0,004	0,0038	146,06	164,30	171,51	177,54	164,85
4	0,005	0,0046	169,94	129,44	175,44	153,20	157,00
5	0,006	0,0061	205,98	184,83	155,91	164,37	177,77



**Gambar 4.10** Grafik hasil pengujian tarik paduan aluminium tuang dengan penambahan modifier P

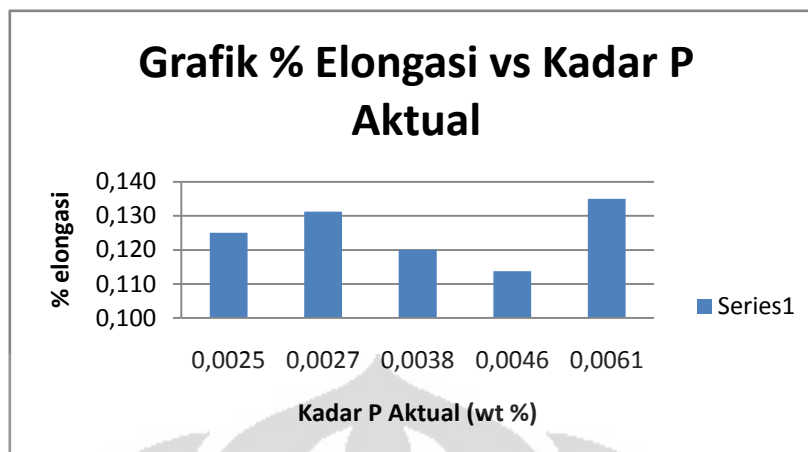
Gambar 4.10 memperlihatkan hasil pengujian tarik pada paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier fosfor. Berdasarkan data diatas, kekuatan tarik tidak menunjukkan kecenderungan tertentu. Berdasarkan literatur, seharusnya dengan penambahan fosfor maka kekuatan tarik akan meningkat, hal ini disebabkan oleh perubahan morfologi silikon primer yang lebih halus dengan sudut – sudut yang tumpul sehingga akan mengurangi tegangan internal yang berdampak pada peningkatan kekuatan tarik. Demikian pula dengan hasil elongasi yang tidak menunjukkan keselarasan dengan nilai UTS. Hal ini

mungkin disebabkan karena terdapatnya porositas pada sample yang menyebabkan hasil pengujian tidak menunjukkan kecenderungan tertentu.



**Gambar 4.11** Porositas yang terdapat pada sampel variasi penambahan fosfor (a) 0,0038 wt %; (b) 0,0046 wt %

Di samping itu, literatur<sup>[33]</sup> mengatakan bahwa terdapat banyak faktor yang mempengaruhi keefektifan fosfor sebagai modifier yang berfungsi sebagai inokulant silikon primer diantaranya adalah sudut pembasahan (*wetting angle*), kekasaran permukaan (*surface roughness*), efek kimia serta *surface segregation*; sehingga sangatlah sulit untuk memprediksi keefektifan penambahan fosfor sebagai inokulant silikon primer yang dapat mempengaruhi sifat mekanis paduan aluminium.



**Gambar 4.12** Grafik elongasi paduan aluminium tuang dengan penambahan modifier P

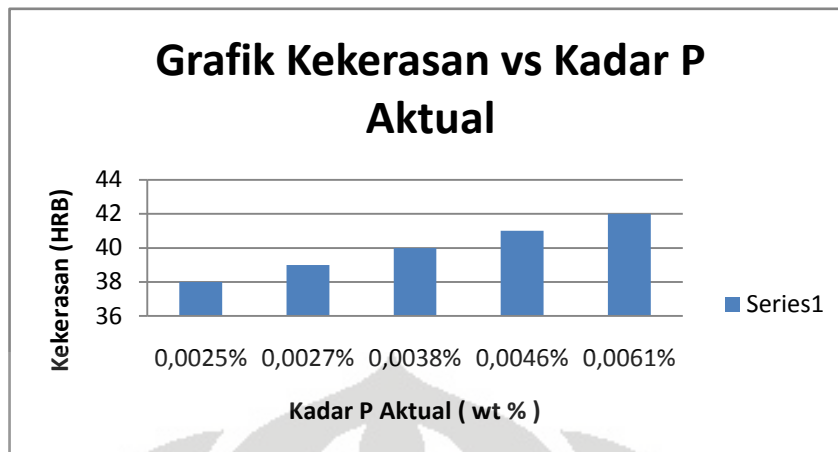
#### 4.5. PENGARUH FOSFOR TERHADAP KEKERASAN PADUAN Al - Si HIPEREUTEKTIK

Pengujian kekerasan dilakukan pada 3 titik yang berbeda untuk setiap sampelnya. Data hasil pengujian kekerasan untuk kelima sample ditampilkan pada tabel dan grafik dibawah ini.

**Tabel 4.7** Tabel data kekerasan paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P

Kadar P Target (wt %)	Kadar P Aktual (wt %)	Kekerasan (HRB)			Hardness Average (HRB)
		I	II	III	
0	0,0025	38	36	40	38
0,003	0,0027	36	42	39	39
0,004	0,0038	38	41	42	40
0,005	0,0046	41	44	38	41
0,006	0,0061	47	40	39	42





**Gambar 4.13** Grafik data kekerasan paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P

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.

Dari gambar 4.13 tampak bahwa nilai kekerasan mengalami peningkatan mulai dari 38 HRB pada penambahan 0,0025 wt % P, 39 HRB pada penambahan 0,0027 wt % P, 40 HRB pada penambahan 0,0038 wt % P, 41 HRB pada penambahan 0,0046 wt % P dan 42 HRB pada penambahan 0,0061 wt % P. Dari data tersebut juga terlihat bahwa persen peningkatan kekerasan pada setiap variabelnya cenderung konstan yaitu sebesar 1 %. Hal ini didukung oleh mikrostruktur yang terbentuk pada sample uji yang memperlihatkan bahwa seiring dengan pertambahan fosfor, kristal silikon primer yang tadinya berbentuk *polyhedral* yang kasar dengan sudut – sudut yang tajam termodifikasi menjadi lebih halus dan memiliki morfologi yang lebih bulat serta sudut yang lebih tumpul<sup>[28]</sup>.

Fasa – fasa yang tidak terlarut seperti  $Mg_2Si$ ,  $Al_2Cu$ , serta  $Al_5FeSi$  yang terdapat dalam paduan juga memberikan peranan terhadap peningkatan kekerasan. Dari hasil pengamatan SEM dapat dilihat bahwa persebaran fasa tidak terlarut

Al<sub>2</sub>Cu semakin merata dan semakin bertambah banyak seiring dengan penambahan jumlah fosfor. Menurut literatur, fasa Al<sub>2</sub>Cu yang dibentuk oleh tembaga dalam aluminium akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada kondisi *as-cast* atau *heat treatment*. Karena itulah, persebaran fasa Al<sub>2</sub>Cu yang semakin merata juga berperan dalam meningkatkan kekerasan paduan aluminium silikon hipereutektik yang digunakan dalam penelitian.

#### 4.6. 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. 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.

Data hasil pengujian keausan untuk kelima sample ditampilkan pada tabel 4.7 dan gambar 4.13 Sedangkan contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai laju keausan dijelaskan sbb :

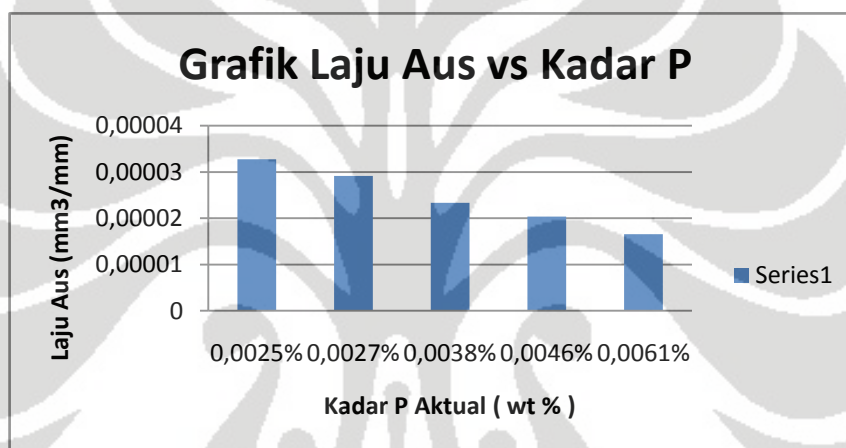
contoh perhitungan laju keausan variable penambahan 0 wt % P

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{W}{x} = \frac{B \cdot b^3}{12 r \cdot x} \\
 V &= \frac{B \cdot b^3}{12 r \cdot x} \\
 &= \frac{3 \text{ mm} \times 5,81^3}{12 \times 15 \text{ mm} \times 100000 \text{ mm}} \\
 &= 3,27 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}
 \end{aligned}$$

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

**Tabel 4.8** Tabel data keausan pada paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P

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> /m m)
		b1	b2	b3			
0	0,0025	5,954	5,671	5,809	5,81	3,27	3,27E-05
0,003	0,0027	5,963	5,024	5,784	5,59	2,91	2,91E-05
0,004	0,0038	5,084	5,054	5,441	5,19	2,33	2,33E-05
0,005	0,0046	5,783	4,734	4,363	4,96	2,03	2,03E-05
0,006	0,0061	4,857	4,823	4,214	4,63	1,66	1,66E-05



**Gambar 4.14** Grafik laju aus paduan aluminium tuang AC8A dengan penambahan modifier P

Pada gambar 4.14 tampak bahwa nilai laju keausan mengalami penurunan seiring dengan pertambahan jumlah fosfor. Hal ini berarti, ketahanan aus paduan aluminium AC8A hipereutektik mengalami peningkatan dengan semakin banyak pertambahan fosfor. Laju keausan paduan sebelum ditambahkan fosfor adalah  $3,27 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Kemudian laju keausan mengalami penurunan seiring dengan semakin besarnya jumlah fosfor yang ditambahkan. Laju keausan mengalami penurunan menjadi  $2,91 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$  pada penambahan 0,0027 wt % P;  $2,33 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$  pada penambahan 0,0038 wt % P;  $2,03 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$  pada penambahan 0,0046 wt % P dan  $1,66 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{mm}$  pada penambahan 0,0061 wt % P. Penurunan nilai laju keausan ini dapat dikaitkan dengan peningkatan nilai kekerasan akibat penambahan P yang telah dibahas sebelumnya.

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>[29]</sup>. Sedangkan kekerasan didefinisikan sebagai ketahanan material terhadap gaya penekanan dari material lain yang lebih keras<sup>[29]</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.

Menurut Dheerendra Kumar Dwivedi, perilaku keausan paduan aluminium tergantung dari beberapa parameter yang saling berhubungan misalnya bentuk, ukuran, komposisi dan distribusi mikro konstituen disamping kondisi aplikasi seperti beban, kecepatan *sliding*, temperatur, lingkungan dan *counter surface*<sup>[31]</sup>. Adanya silikon sebagai unsur paduan dalam paduan aluminium akan meningkatkan keausan 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 AC8A hipereutektik.

Disamping morfologi silikon primer, keausan juga dipengaruhi oleh unsur – unsur paduan yang terdapat dalam paduan Al-Si. Literatur mengatakan<sup>[31]</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

Peningkatan kadar fosfor yang ditambahkan pada paduan aluminium silikon AC8A hipereutektik memberikan pengaruh terhadap :

### A. Struktur mikro

1. Peningkatan kadar fosfor (0,0025 wt%, 0,0027 wt %, 0,0038 wt %, 0,0046 wt % dan 0,0061 wt %) akan :
  - a. merubah bentuk silikon primer dari poligonal menjadi *blocky/faceted shape* serta merubah ukuran silikon primer menjadi lebih halus.
  - b. merubah morfologi silikon eutektik yang berbentuk jarum – jarum panjang yang halus menjadi batangan – batangan pendek dan seperti titik (*dot*).
2. Fasa – fasa yang terbentuk pada penambahan fosfor 0,0025 wt % adalah fasa  $\alpha$ -aluminium, kristal silikon, silikon eutektik dan fasa Al-Si-Fe-Cu. Sedangkan fasa – fasa yang terbentuk pada penambahan fosfor 0,0038 wt % dan 0,0061 wt % adalah fasa  $\alpha$ -aluminium, kristal silikon, silikon eutektik,  $Mg_2Si$  dan  $Al_2Cu$ .

### B. Kekuatan mekanis

1. Nilai kekuatan tarik tidak menunjukkan kecenderungan tertentu yang disebabkan oleh adanya porositas dalam paduan
2. Nilai kekerasan paduan AC8A meningkat seiring dengan peningkatan kadar fosfor (0,0025 wt%, 0,0027 wt %, 0,0038 wt %, 0,0046 wt % dan 0,0061 wt %) yang ditambahkan ke dalam paduan aluminium AC8A hipereutektik yaitu berturut – turut mulai dari 38 HRB, 39 HRB, 40 HRB, 41 HRB, dan 42 HRB.
3. Nilai ketahanan material terhadap keausan meningkat seiring dengan peningkatan kadar fosfor (0,0025 wt%, 0,0027 wt %, 0,0038 wt %, 0,0046 wt % dan 0,0061 wt %) yang ditambahkan ke dalam paduan aluminium AC8A hipereutektik.

### C. Porositas

1. Porositas akan semakin meningkat dan tersebar merata seiring dengan peningkatan jumlah fosfor yang ditambahkan pada paduan aluminium AC8A hipereutektik.



## DAFTAR ACUAN

- [1] *Modification of Aluminium Silicon Foundry Alloy*  
<[www.metallurgical.com/Downloads/tech\\_paper\\_pdfs/Guide\\_Modif\\_Al\\_Si\\_Alloys.pdf](http://www.metallurgical.com/Downloads/tech_paper_pdfs/Guide_Modif_Al_Si_Alloys.pdf)>
- [2] Putra, Irawan. Oversize Pulihkan Kompresi  
<<http://irwanputra.wordpress.com/2008/02/11/oversize-pulihkan-kompresi/>>
- [3] Aluminum alloys for chill casting and low pressure casting according to the Japanese, Chinese, American and German industrial standard.
- [4] *Hypereutectic Piston*  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/Hypereutectic\\_piston](http://en.wikipedia.org/wiki/Hypereutectic_piston)>
- [5] *Piston* <<http://id.wikipedia.org/wiki/Piston>>
- [6] [www.wallpaperinstaller.com/scooby/piston4.jpg](http://www.wallpaperinstaller.com/scooby/piston4.jpg)
- [7] [www.forums.nasioc.com/forums/showthread.php?t=907570](http://www.forums.nasioc.com/forums/showthread.php?t=907570)
- [8] Modul Pembuatan Piston PT X
- [9] Diktat kuliah pengecoran oleh Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno Tahun 2006
- [10] [www.key-to-metals.com](http://www.key-to-metals.com)
- [11] Kaufman, J Gilbert and Elwin L Rooy. *Aluminium Alloy Casting: Properties, Processes and Application*. ASM International 2004
- [12] JIS Handbook. *Non-Ferrous Metals and Metallurgy*. Japanese Standards Association. Tokyo. 1997.
- [13] Georgius, Eifelson. Efisiensi Perlakuan Panas dengan mengganti Proses T6 (Artificial Ageing) dengan T4 (natural Ageing) pada Pembuatan Piston dengan Material AC8H. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok 2008
- [14] Hatch, John E. *Aluminium : Properties and Physical Metallurgy*. ASM Metal Park. Ohio.2001
- [15] Nogita, K, S.D. McDonald dan A.K. Dahle. *Modification of Al-Si Alloys*. Materials Forum Volume 28. Division of Materials Engineering, The University of Queensland, Brisbane-Australia. 2004

- [16] Guthy, Hema V. “*Evolution of Eutectic Microstructure in Chemically Modified and Unmodified Aluminium Silicon Alloy*”. Thesis. Worcester Polytechnic Institute, 2002
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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)
- [20] Suárez-Peña, B, et al,ed. *Microstructural Effects of Phosphorus on Pressure Die cast Al-12 Si Components*. Revista De Metalurgia, 2007
- [21] Dwivedi, Dheerandra 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
- [22] Campbell, John and Richard A. Harding. *The Freezing of Casting*. European Aluminium Association, 1994.
- [23] Donahue, Raymond, William G. Hesterberg, Terrance M. Cleary. *Hypereutectic Aluminium Silicon Alloy Having Refined Primary Silicon and Modified Eutectic*. United States Patent, 1993.
- [24] Gruzlesld, John dan Bernard Closset, *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*. USA : American Foundrymen's Society Inc. 1990
- [25] Modification and Refinement Phosphorus <[www. keysteelmatal.com](http://www.keysteelmatal.com)>
- [26] Rinaldi, Ervik. 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



- [27] Ying, Zhang. *Transformation of Microstructure After Modification of A390Alloy*. Science Press. 10 Sept 2007
- [28] Henghua, Zhang. *Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic Al-Si Alloy Modified with Cu-P*. Elsevier : Rare Metals, Vol. 27, No. 1, Feb 2008
- [29] Cisse, J. *Simultaneous Refinement of Primary and Eutectic Silicon in Hypereutectic Al-Si Alloy*. Metallurgical Transaction B. Volume 6B, March 1975-95
- [30] Polmear, I.J. *Light Alloys : Metallurgy of the Light Metals*. Butterworth-Heinemann. 2006
- [31] Dwivedi, Dheerendra Kumar. *Wear Behaviour of Cast Hypereutectic Aluminium Silicon Alloys*. Elsevier : Materials and Design. 2005
- [32] 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
- [33] Porter, D.A. and K.E. Easterling. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. Molly Millars Lane, Workingham, Berkshire, England : Van Nostrand Reinhold (UK) Co.Ltd, 1987.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM E3-01. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. 2004
- ASTM E-8. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. 2004
- ASTM E-18. *Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*. ASTM International. 2004
- Ir. Bustanul Arifiin, M.Phil.Eng, Dr-Ing., Ir. Bambang Suharno, *Diktat Kuliah Pengecoran*. Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2007
- Kaufman, J Gilbert and Elwin L Rooy. *Aluminium Alloy Casting: Properties, Processes and Application*. ASM International 2004
- JIS Handbook. *Non-Ferrous Metals and Metallurgy*. Japanese Standards Association. Tokyo. 1997.
- Hatch, John E. *Aluminium : Properties and Physical Metallurgy*. ASM Metal Park. Ohio. 2001
- Nogita, K, S.D. McDonald dan A.K. Dahle. *Modification of Al-Si Alloys*. Materials Forum Volume 28. Division of Materials Engineering, The University of Queensland, Brisbane-Australia. 2004
- Guthy, Hema V. “*Evolution of Eutectic Microstructure in Chemically Modified and Unmodified Aluminium Silicon Alloy*”. Thesis. Worcester Polytechnic Institute, 2002
- 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

- 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
- 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)
- Suárez-Peña, B, et al,ed. *Microstructural Effects of Phosphorus on Pressure Die cast Al-12 Si Components*. Revista De Metalurgia, 2007
- 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
- Campbell, John and Richard A. Harding. *The Freezing of Casting*. European Aluminium Association, 1994.
- Donahue, Raymond, William G. Hesterberg, Terrance M. Cleary. *Hypereutectic Aluminium Silicon Alloy Having Refined Primary Silicon and Modified Eutectic*. United States Patent, 1993.
- Gruzlesld, John dan Bernard Closset, *The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys*. USA : American Foundrymen's Society Inc. 1990
- Rinaldi, Ervik. 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
- Ying, Zhang. *Transformation of Microstructure After Modification of A390Alloy*. Science Press. 10 Sept 2007
- Henghua, Zhang. *Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic Al-Si Alloy Modified with Cu-P*. Elsevier : Rare Metals, Vol. 27, No. 1, Feb 2008

Cisse, J. *Simultaneous Refinement of Primary and Eutectic Silicon in Hypereutectic Al-Si Alloy*. Metallurgical Transaction B. Volume 6B, March 1975-95

Polmear, I.J. *Light Alloys : Metallurgy of the Light Metals*. Butterworth - Heinemann.2006

Dwivedi, Dheerendra Kumar. *Wear Behaviour of Cast Hypereutectic Aluminium Silicon Alloys*. Elsevier : Materials and Design. 2005

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

Porter, D.A. and K.E. Easterling. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. Molly Millars Lane, Workingham, Berkshire, England : Van Nostrand Reinhold (UK) Co.Ltd, 1987.

Lennart Backerud et al. *Foundry Alloy Volume 2 : Solidification of Aluminum Alloy*. Sweden : Department of Structural Chemistry University of Stockholm. 1996



### ❖ Hasil Uji Komposisi Kimia Variasi Penambahan Fosfor 0,0025 wt %

Run	Fe7 P1	Cu Sb5	Mn Sr	Mg V3	Zn Zr3	Ti4	Cr1	Ni6	Si	Al3	Be3	Bg1	Ca3	Co1	AL%	Li2	Na1
1>	0.36526 0.00256	1.08578 -0.00067	0.06250 (-0.00027)	1.00180 0.01570	0.07984 0.00737	0.15077	0.01531	0.76176	14.08965	95.86700	(-0.00003)	36.02800	0.01326	0.00213	82.3483	(-0.00083)	(-0.00022)
2>	0.36232 0.00251	1.09890 -0.00020	0.06218 (-0.00028)	1.01085 0.01570	0.08582 0.01615	0.15013	0.01505	0.76188	14.07615	94.32200	(-0.00003)	35.56900	0.01352	0.00214	82.3283	(-0.00088)	(-0.00022)
Avg	0.36379 0.00253	1.09234 -0.00044	0.06234 (-0.00027)	1.00632 0.01570	0.08283 0.01176	0.15045	0.01518	0.76182	14.08290	95.09450	(-0.00003)	35.79850	0.01339	0.00213	82.3383	(-0.00086)	(-0.00022)
Sd	0.00208 0.00003	0.00928 0.00033	0.00023 0.00001	0.00640 0.00000	0.00423 0.00621	0.00046	0.00018	0.00009	0.00954	0.00000	0.00018	0.00001	0.0142	0.00003	0.00000	0.00000	0.00000
Sd%	0.57167 1.37074	0.84934 -76.35547	0.36122 -3.09823	0.63604 0.00127	5.11105 52.82415	0.30296	1.21319	0.01139	0.06775	-1.32275	1.37808	0.26531	0.0172	-3.95949	-0.38580		

### ❖ Hasil Uji Komposisi Kimia Variasi Penambahan Fosfor 0,0027 wt %

Run	Fe7 P1	Cu Sb5	Mn Sr	Mg V3	Zn Zr3	Ti4	Cr1	Ni6	Si	Al3	Be3	Bg1	Ca3	Co1	AL%	Li2	Na1
1>	0.37895 0.00277	1.78273 -0.00250	0.06323 (-0.00026)	0.99155 0.01518	0.07743 0.00738	0.14897	0.01500	0.78388	13.79314	104.38900	(-0.00003)	36.12300	0.01292	0.00095	82.6333	(-0.00082)	(-0.00024)
2>	0.38644 0.00267	1.68494 -0.00396	0.06688 (-0.00024)	1.01698 0.01534	0.08053 0.00751	0.14935	0.01516	0.80190	14.03429	103.04100	(-0.00003)	36.45000	0.01323	0.00116	82.3098	(-0.00089)	(-0.00025)
Avg	0.38269 0.00272	1.73387 -0.00323	0.06505 (-0.00025)	1.00426 0.01526	0.07898 0.00744	0.14916	0.01508	0.79289	13.91371	103.71500	(-0.00003)	36.28650	0.01307	0.00106	82.4715	(-0.00081)	(-0.00024)
Sd	0.00530 0.00007	0.01755 0.00103	0.00258 0.00001	0.01798 0.00011	0.00219 0.00009	0.00027	0.00011	0.01274	0.17052	0.00000	0.00022	0.00015	0.2287	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
Sd%	1.38526 2.82736	1.60789 -31.85636	3.96269 -5.58544	1.79028 0.70322	2.76762 1.17767	0.17982	0.70823	1.60664	1.22554	-2.13671	1.66493	14.03298	0.2773	-1.49513	-2.19888		

### ❖ Hasil Uji Komposisi Kimia Variasi Penambahan Fosfor 0,0038 wt %

Run	Fe7 P1	Cu Sb5	Mn Sr	Mg V3	Zn Zr3	Ti4	Cr1	Ni6	Si	Al3	Be3	Bg1	Ca3	Co1	AL%	Li2	Na1
1>	0.35867 0.00400	1.58589 -0.00041	0.06089 (-0.00017)	1.01976 0.01426	0.06522 0.00630	0.15879	0.01379	0.59847	13.36306	99.12900	(-0.00003)	36.27300	0.00898	0.00188	82.7417	(-0.00078)	(-0.00024)
2>	0.35827 0.00352	1.59512 -0.00100	0.05978 (-0.00024)	1.03048 0.01416	0.06383 0.00631	0.15813	0.01374	0.59850	13.16761	98.48200	(-0.00003)	35.58400	0.00872	0.00152	82.9227	(-0.00084)	(-0.00027)
Avg	0.35847 0.00376	1.59050 -0.00070	0.06034 (-0.00020)	1.02512 0.01421	0.06453 0.00631	0.15846	0.01377	0.59849	13.26534	98.80550	(-0.00003)	35.92850	0.00885	0.00170	82.8322	(-0.00081)	(-0.00026)
Sd	0.00028 0.00034	0.00653 0.00041	0.00078 0.00005	0.00758 0.00007	0.00098 0.00001	0.00046	0.00003	0.00002	0.13820	0.00000	0.00018	0.00025	0.1280	0.00004	0.00002	0.00000	0.00000
Sd%	0.07920 9.02448	0.41037 -58.25520	1.29707 -22.96548	0.73973 0.49398	1.52039 0.08013	0.29187	0.25420	0.00260	1.04180	-1.30680	2.03277	14.90554	0.1545	-4.91859	-8.24379		

### ❖ Hasil Uji Komposisi Kimia Variasi Penambahan Fosfor 0,0046 wt %

Run	Fe7 P1	Cu Sb5	Mn Sr1	Mg V3	Zn Zr3	Ti4	Cr1	Ni6	Si	Al3	Be3	Bg1	Ca3	Co1	AL%	Li2	Na1
1>	0.40541 0.00513	1.45042 -0.00425	0.07069 0.00026	1.03344 0.01526	0.07217 0.00778	0.16581	0.01503	0.73866	13.69723	111.27000	(-0.00003	36.60600	0.01049	0.00096	82.3163	(-0.00055	(-0.00019
2>	0.41719 0.00411	1.47292 -0.00321	0.07182 0.00022	1.07162 0.01515	0.07235 0.00781	0.16274	0.01503	0.76638	13.51513	111.59200	(-0.00003	38.74800	0.01081	0.00127	82.3996	(-0.00066	(-0.00022
Avg	0.41130 0.00462	1.46167 -0.00373	0.07125 0.00024	1.05253 0.01520	0.07226 0.00780	0.16427	0.01503	0.75252	13.60618	111.43100	(-0.00003	37.67700	0.01065	0.00111	82.3579	(-0.00060	(-0.00020
Sd	0.00833 0.00073	0.01591 0.00074	0.00080 0.00003	0.02700 0.00007	0.00013 0.00062	0.00217	0.00001	0.01960	0.12876		0.00000		0.00023	0.00022	0.0589	0.00008	0.00003
Sd%	2.02574 15.69536	1.08849 -19.78322	1.11722 11.49118	2.56621 0.48706	0.17780 0.26455	1.32067	0.03748	2.60471	0.94635		-1.11857		2.14505	19.87735	0.0715	-12.58405	-13.49560

### ❖ Hasil Uji Komposisi Kimia Variasi Penambahan Fosfor 0,0061 wt %

Run	Fe7 P1	Cu Sb5	Mn Sr1	Mg V3	Zn Zr3	Ti4	Cr1	Ni6	Si	Al3	Be3	Bg1	Ca3	Co1	AL%	Li2	Na1
1>	0.37518 0.00468	1.54125 -0.00178	0.06273 (-0.00011	1.01870 0.01587	0.06559 0.01673	0.18119	0.01434	0.63261	13.25322	107.29400	(-0.00003	38.77400	0.00897	0.00145	82.8104	(-0.00076	(-0.00024
2>	0.37616 0.00750	1.57900 -0.00107	0.06421 (-0.00009	1.03040 0.01650	0.06703 0.00788	0.19354	0.01474	0.65302	13.27011	106.57800	(-0.00003	38.17400	0.00989	0.00161	82.7107	(+0.00073	(-0.00022
Avg	0.37567 0.00609	1.56013 -0.00142	0.06347 (-0.00010	1.02455 0.01618	0.06631 0.01231	0.18736	0.01454	0.64281	13.26167	107.93600	(-0.00003	38.57400	0.00933	0.00153	82.7606	(-0.00075	(-0.00023
Sd	0.00070 0.00199	0.02669 0.00051	0.00105 0.00002	0.00827 0.00045	0.00102 0.00626	0.00873	0.00028	0.01443	0.01194		0.00000		0.00051	0.00012	0.0705	0.00002	0.00001
Sd%	0.18575 32.63845	1.71097 -35.57968	1.64681 -17.02230	0.80743 2.77215	1.53455 50.87567	4.65836	1.92818	2.24547	0.09007		-4.03535		5.47965	7.51354	0.0851	-2.52440	-4.72939



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



- ❖ Data mentah hasil pengujian kekerasan sample AC8A disertai standar deviasi dan presentasi kesalahan relatif

Kadar P Target (wt%)	Kadar P Aktual (wt %)	Kekerasan (HRB)			Hardness Average (HRB)	S. Dev
		I	II	III		
0%	0,0025%	38,3	36,2	40,1	38	1,95
0,003%	0,0027%	36,2	41,6	39,1	39	2,70
0,004%	0,0038%	37,8	40,9	42,2	40	2,26
0,005%	0,0046%	41	44,1	38	41	3,05
0,006%	0,0061%	47,6	39,6	39,1	42	4,77

Kesalahan Relatif (%)	
Variasi P (%)	Kekerasan
0	5,11
0,003	6,94
0,004	5,61
0,005	7,43
0,006	11,33

Contoh cara perhitungan % kesalahan relatif kekerasan untuk 0 wt % P :

$$\% \text{ Kesalahan relatif} = \frac{1,95}{38} \times 100 \% = 5,11 \%$$

❖ Data mentah hasil pengujian keausan sample AC8A disertai standar deviasi dan presentasi kesalahan relatif

No	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)	S. Dev
			b1	b2	b3				
1	0%	0,0025%	5,954	5,671	5,809	5,81	3,27	3,27097E-05	0,141514
2	0,003%	0,0027%	5,963	5,024	5,784	5,59	2,91	2,9118E-05	0,498558
3	0,004%	0,0038%	5,084	5,054	5,441	5,19	2,33	2,33402E-05	0,215297
4	0,005%	0,0046%	5,783	4,734	4,363	4,96	2,03	2,03373E-05	0,736483
5	0,006%	0,0061%	4,857	4,823	4,214	4,63	1,66	1,65564E-05	0,361821

Variasi P (wt%)	Kesalahan Relatif (%)
0	2,44
0,003	8,92
0,004	4,15
0,005	14,85
0,006	7,81

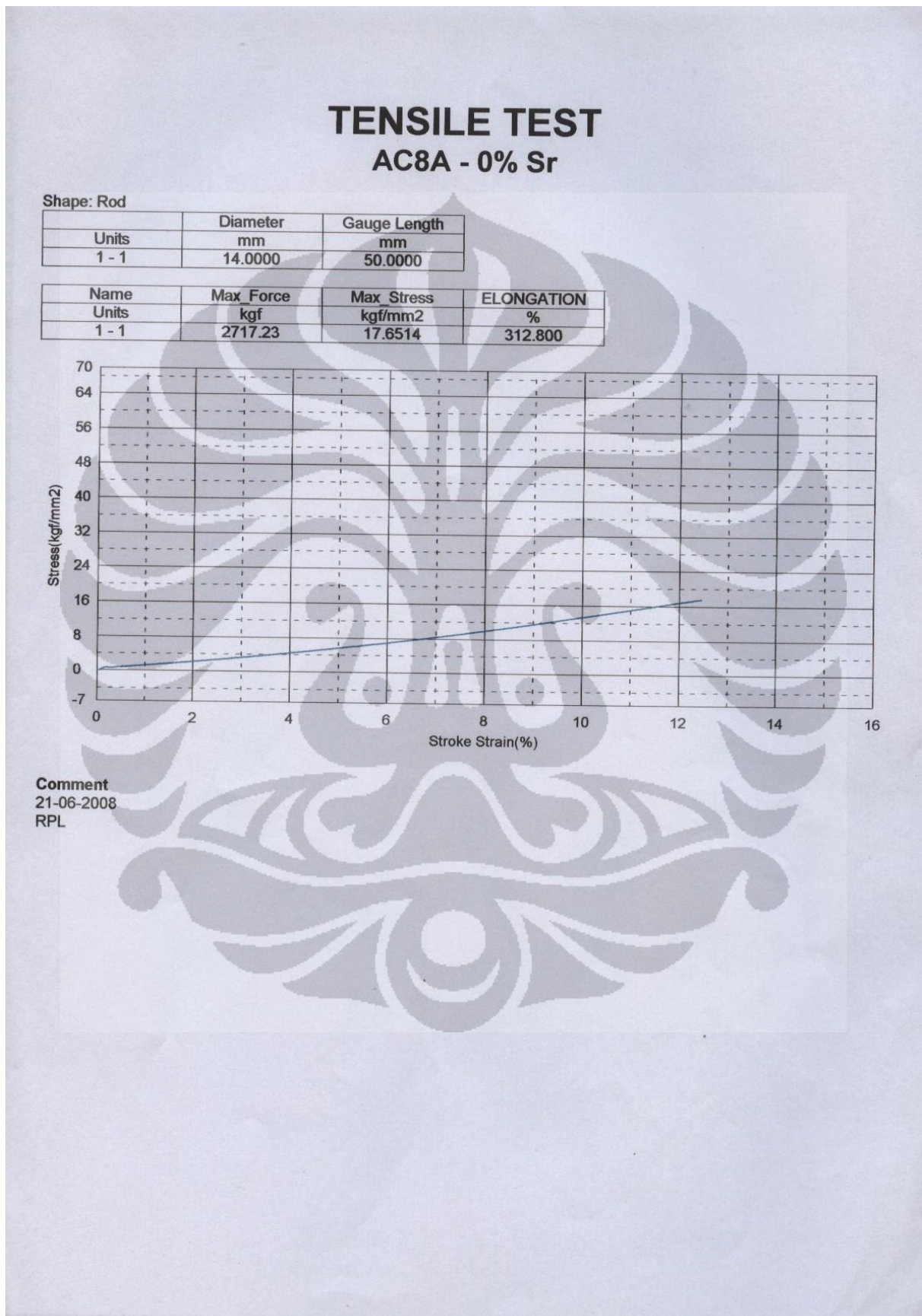
Contoh cara perhitungan % kesalahan relatif keausan untuk 0 wt % P :

$$\% \text{ Kesalahan relatif} = \frac{0,14}{5,81} \times 100 \% = 2,44 \%$$

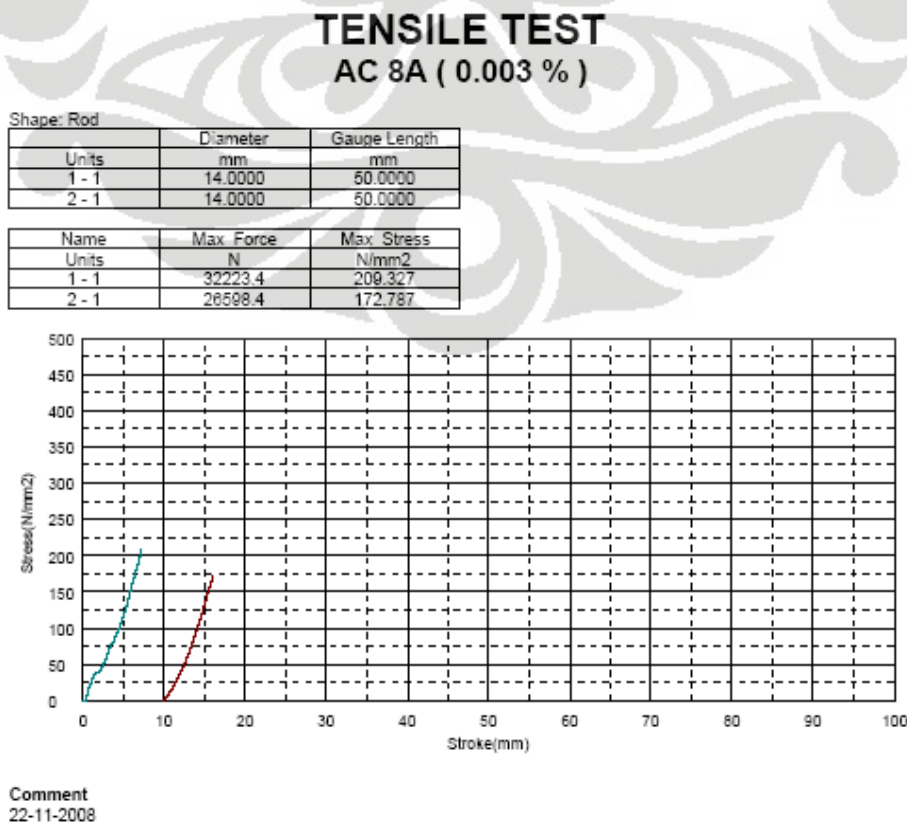
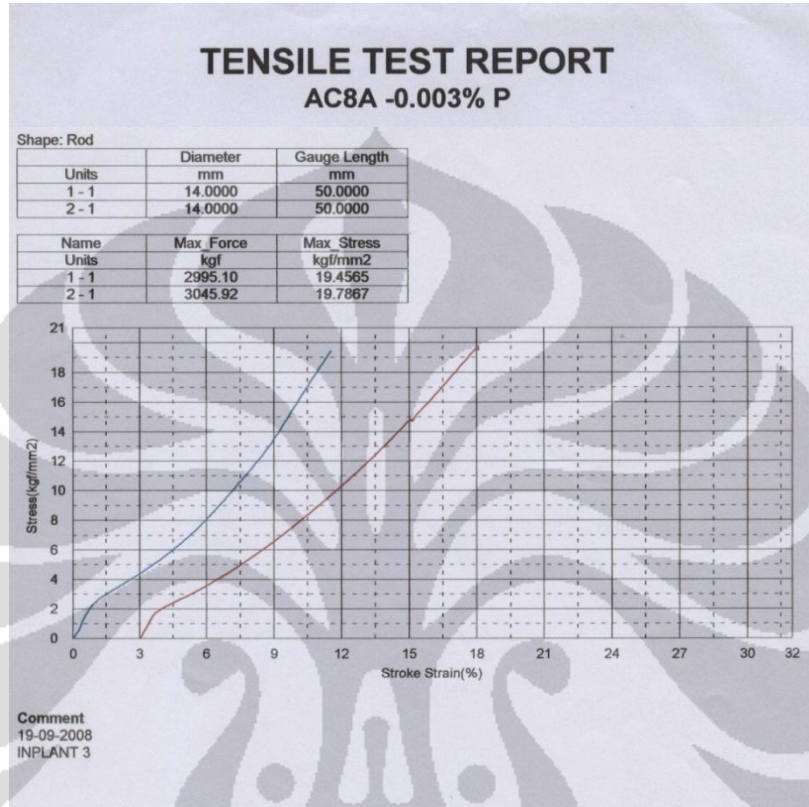


**LAMPIRAN C**  
**HASIL PENGUJIAN KEKUATAN**  
**TARIK**

- ❖ Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor 0 wt %



❖ Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor 0,003 wt %



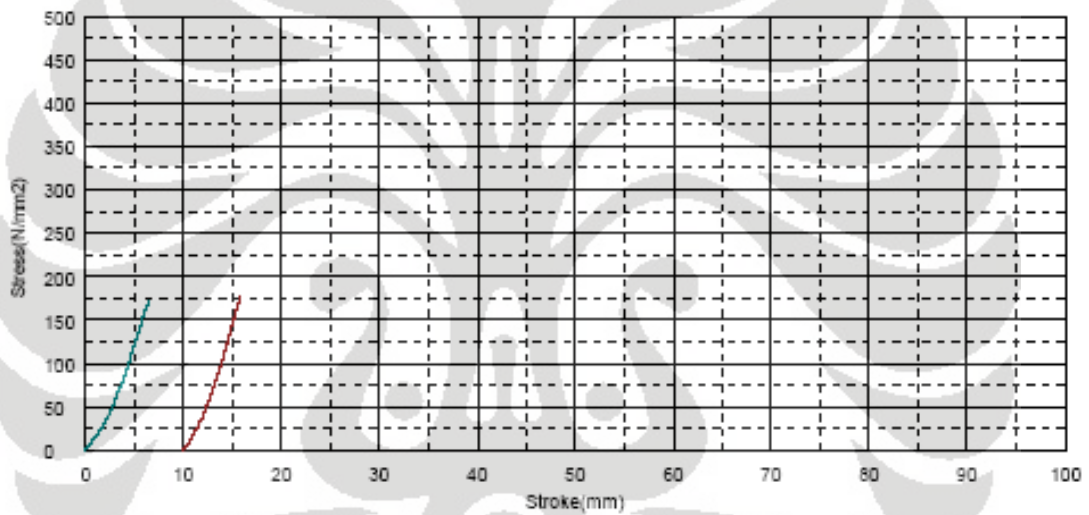
- ❖ Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor 0,004 wt %

## TENSILE TEST AC 8A ( 0.004 % )

Shape: Rod

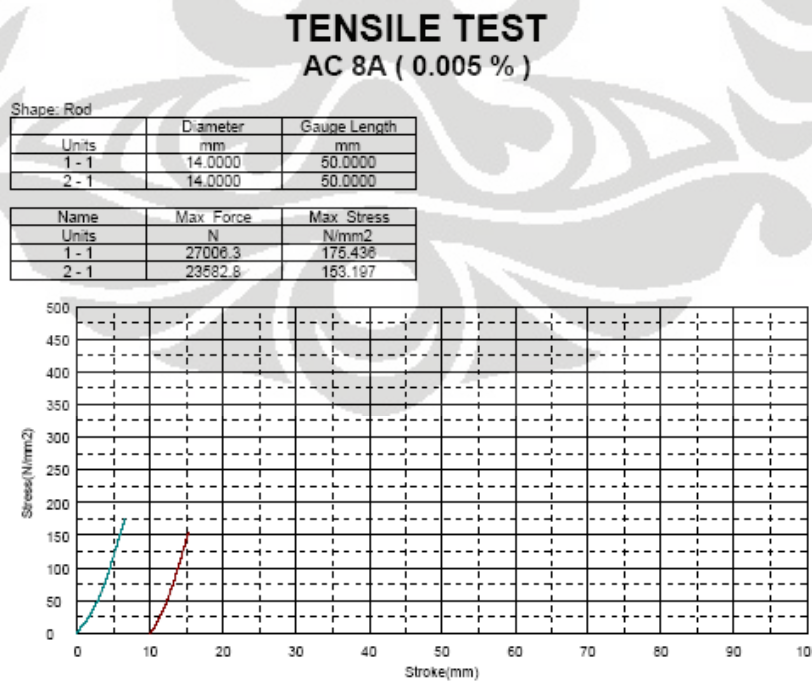
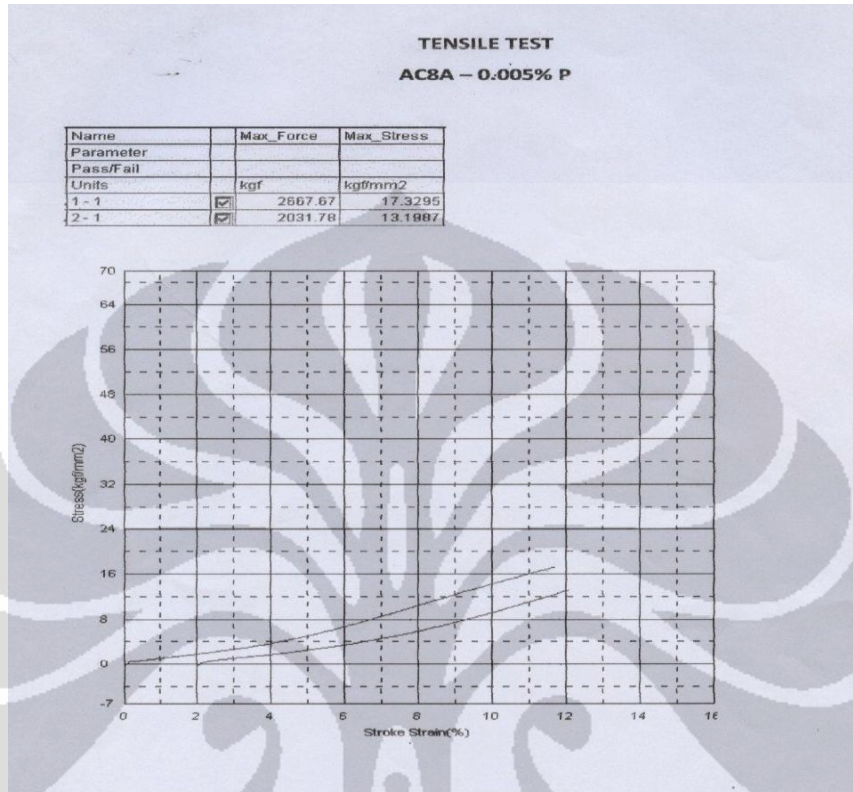
	Diameter	Gauge Length
Units	mm	mm
1 - 1	14.0000	50.0000
2 - 1	14.0000	50.0000

Name	Max Force	Max Stress
Units	N	N/mm <sup>2</sup>
1 - 1	26401.6	171.508
2 - 1	27329.7	177.537



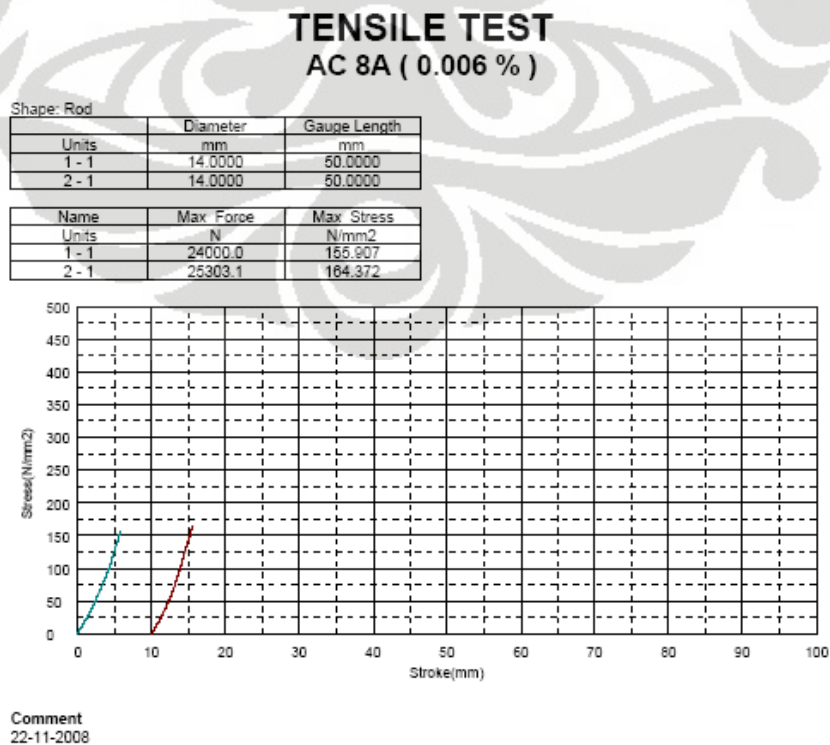
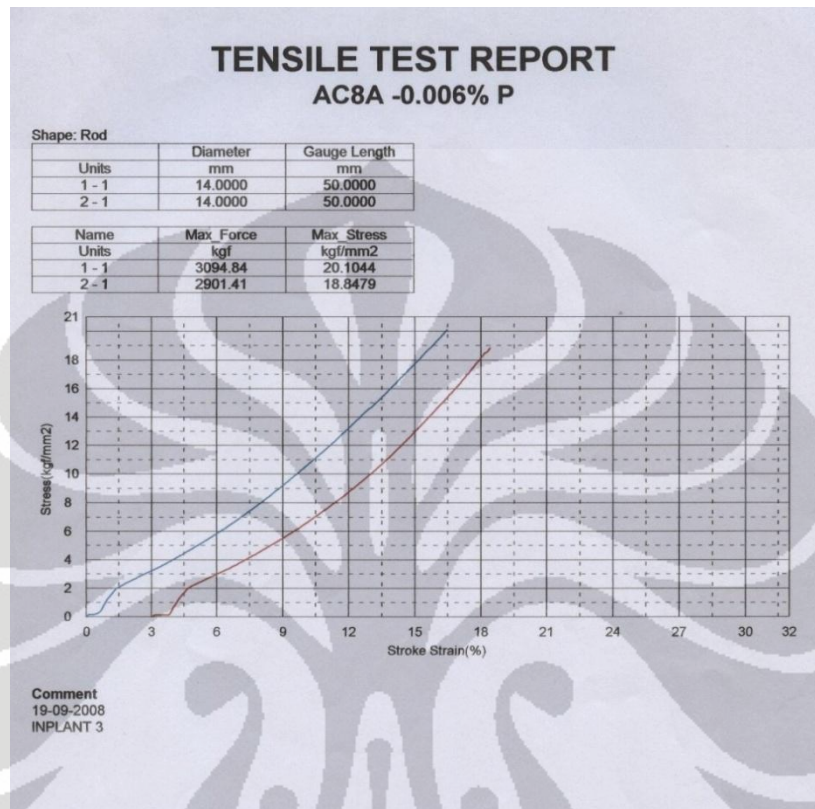
Comment  
22-11-2008

- ❖ Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor 0,005 wt %



Comment  
22-11-2008

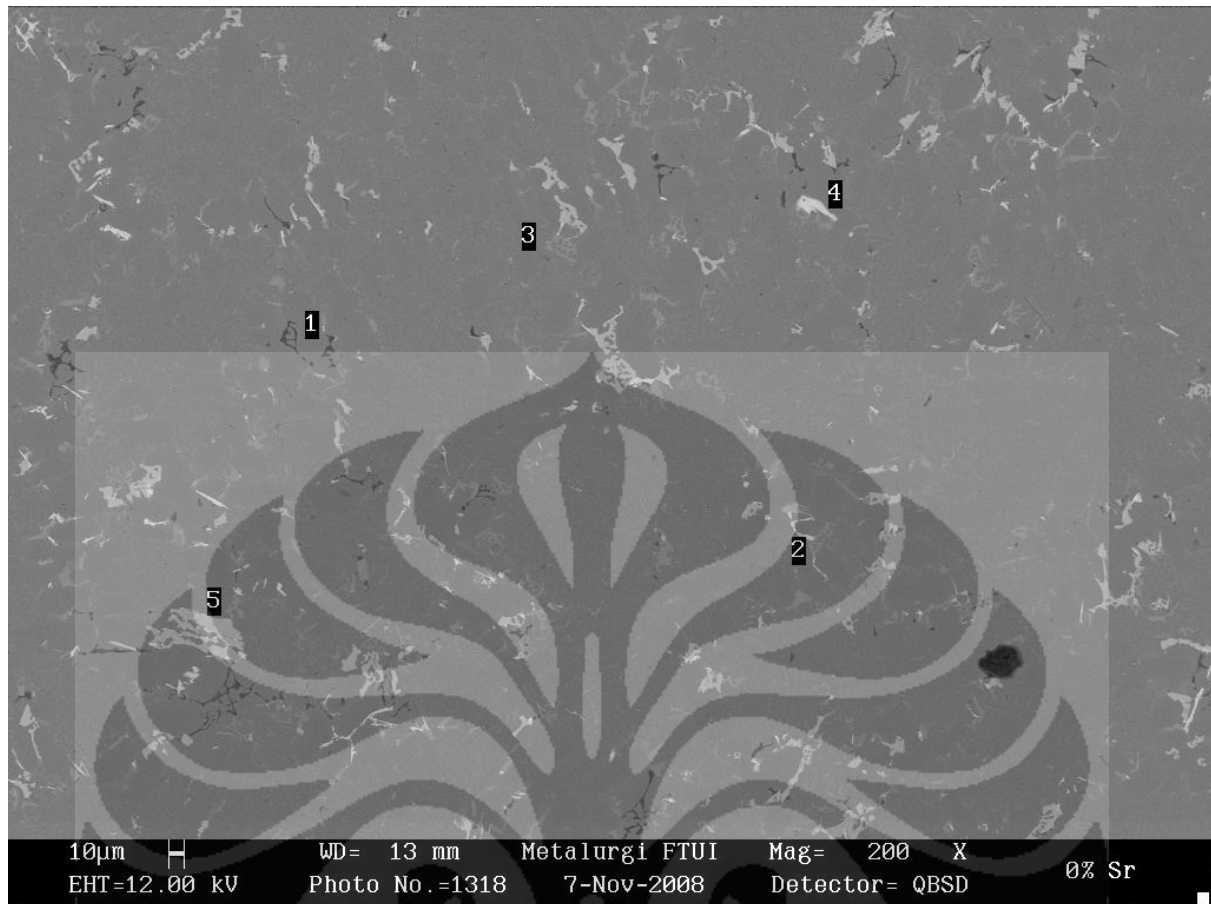
- ❖ Data mentah hasil pengujian tarik variasi penambahan fosfor 0,006 wt %







**LAMPIRAN D**  
**HASIL PENGUJIAN SEM / EDS**



**Hasil pengamatan SEM sample aluminium tuang AC8A dengan variasi penambahan fosfor 0 wt % dengan perbesaran 200 X**

SEMQuant results. Listed at 17:20:07 on 07/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0% Sr - No. 1

System resolution = 59 eV

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

1 peak possibly omitted: 0.92 keV

Standards :  
 C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL2O3 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.54	1.19
O K	ED	0.65	1.09
Al K	ED	97.43	96.41
Si K	ED	1.38	1.31
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

1

SEMQuant results. Listed at 17:26:57 on 07/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0% Sr - No. 2

System resolution = 59 eV

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

1 peak possibly omitted: 0.92 keV

Standards :  
 C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL2O3 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.49	1.10
O K	ED	1.01	1.69
Al K	ED	85.59	84.90
Si K	ED	12.91	12.30
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

2

SEMQuant results. Listed at 17:30:18 on 07/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0% Sr - No. 3

System resolution = 59 eV

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

Standards :  
 C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL2O3 22/03/06  
 Mg K MagOxide 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.75	1.66
O K	ED	1.00	1.68
Mg K	ED	0.25	0.28
Al K	ED	80.24	79.49
Si K	ED	17.76	16.90
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

3

SEMQuant results. Listed at 17:31:39 on 07/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0% Sr - No. 4

System resolution = 59 eV

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

1 peak possibly omitted: 0.90 keV

Standards :  
 C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL2O3 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.98	2.22
O K	ED	0.73	1.25
Al K	ED	30.24	30.53
Si K	ED	68.05	66.00
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

4

SEMQuant results. Listed at 17:33:32 on 07/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0% Sr - No. 5

System resolution = 60 eV

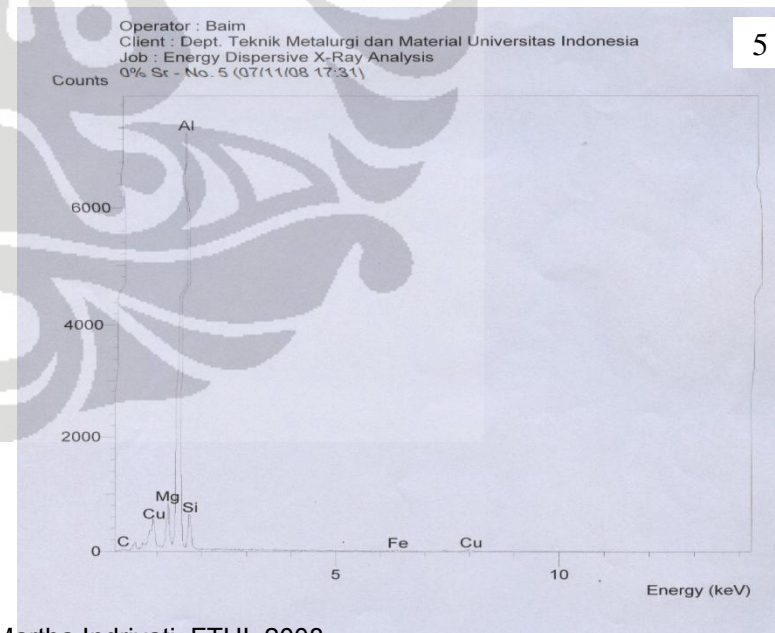
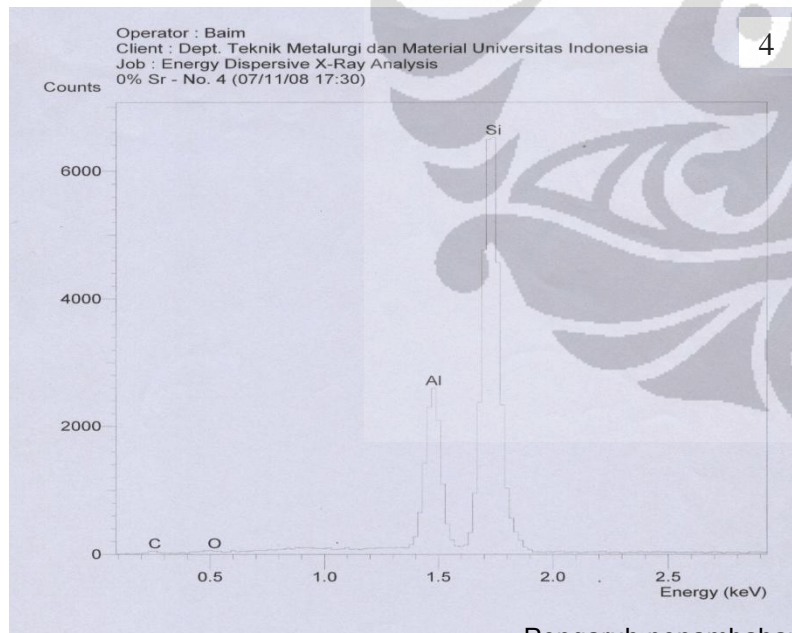
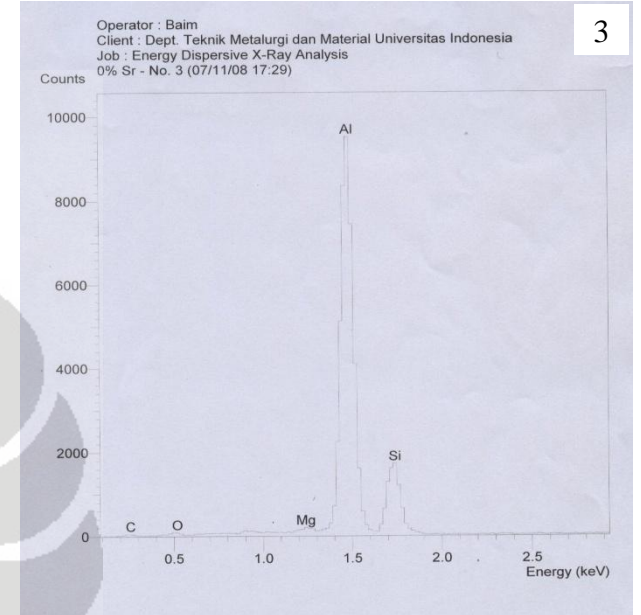
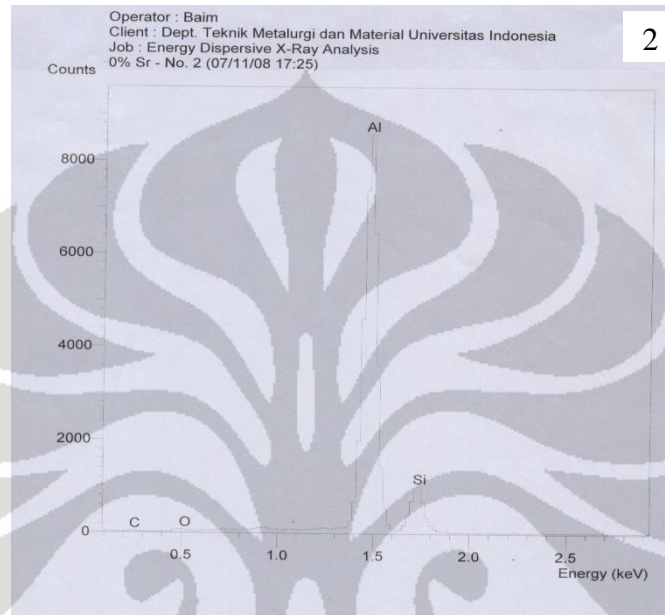
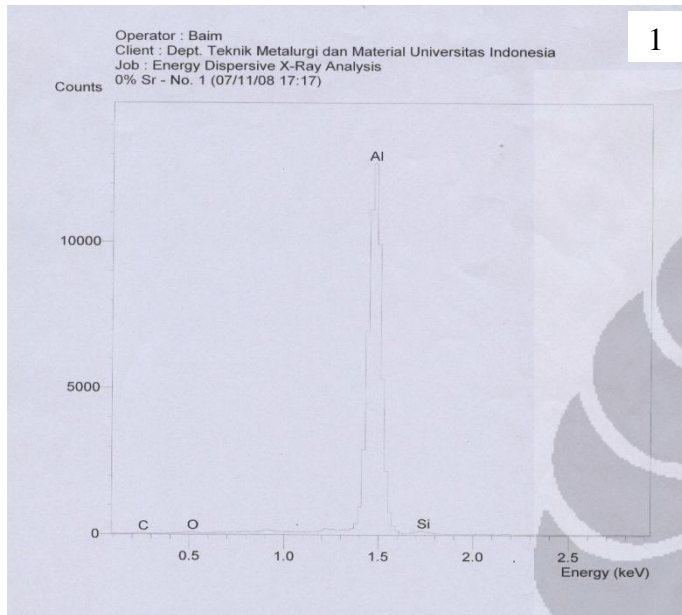
Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

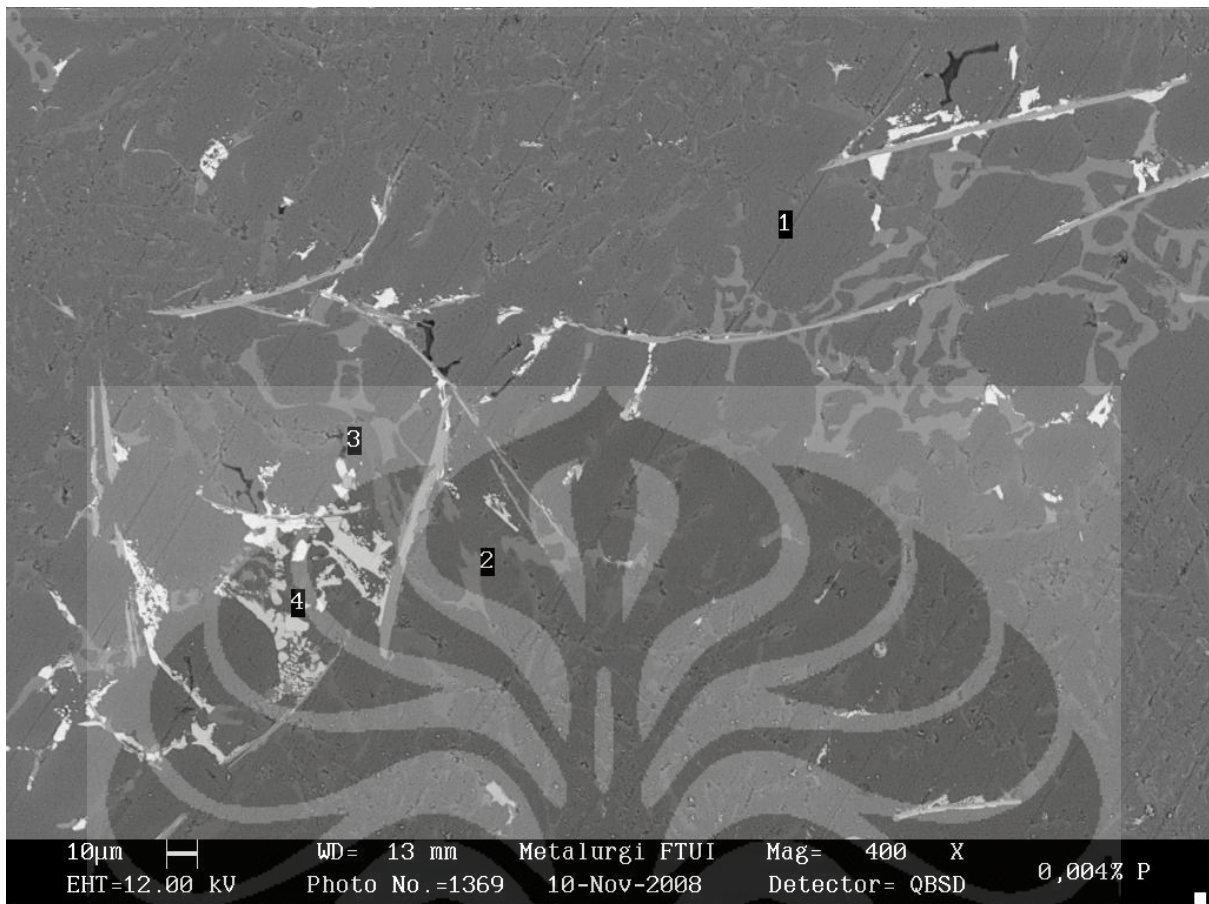
Standards :  
 C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 Fe K FeS2 22/03/06  
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.30	3.32
Al K	ED	68.81	78.48
Si K	ED	5.85	6.41
Fe K	ED	2.16	1.19
Cu K	ED	21.87	10.59
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

5





**Hasil pengamatan SEM sample aluminium tuang AC8A dengan variasi penambahan fosfor 0,004 wt % dengan perbesaran 400 X**

SEMQuant results. Listed at 19:00:42 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,004% P - No. 1

System resolution = 60 eV

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

1 peak possibly omitted: 2.14 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL2O3 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 Ar K Not defined

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.64	1.42
O K	ED	1.13	1.89
Al K	ED	95.60	94.57
Si K	ED	1.30	1.24
Ar K	ED	1.33	0.89
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 19:02:36 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,004% P - No. 2

System resolution = 60 eV

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

1 peak possibly omitted: 2.16 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL2O3 22/03/06  
 Mg K MagOxide 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.87	1.96
O K	ED	1.39	2.37
Mg K	ED	11.42	12.79
Al K	ED	62.55	63.13
Si K	ED	16.93	16.41
Fe K	ED	6.85	3.34
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 19:06:52 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,004% P - No. 3

System resolution = 59 eV

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

1 peak possibly omitted: 3.48 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.45	3.32
Al K	ED	2.92	2.98
Si K	ED	95.63	93.70
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

3

SEMQuant results. Listed at 19:09:04 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,004% P - No. 4

System resolution = 61 eV

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

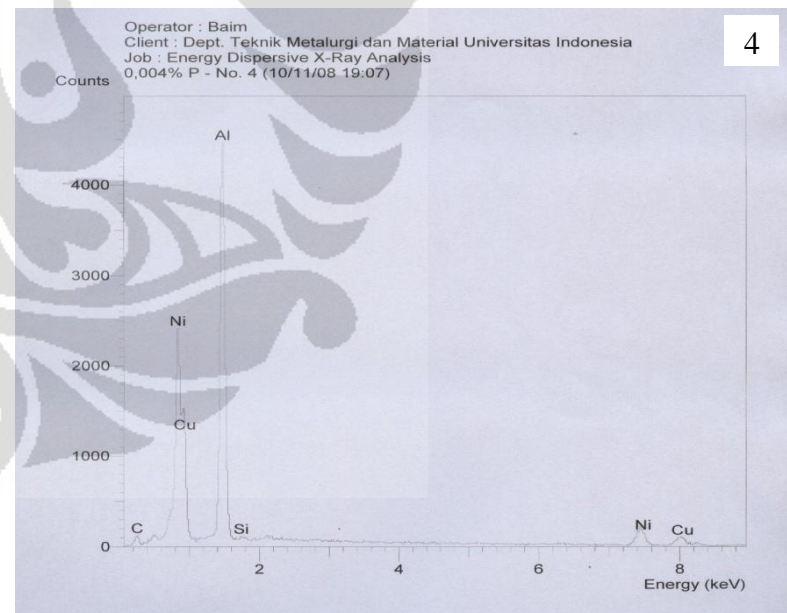
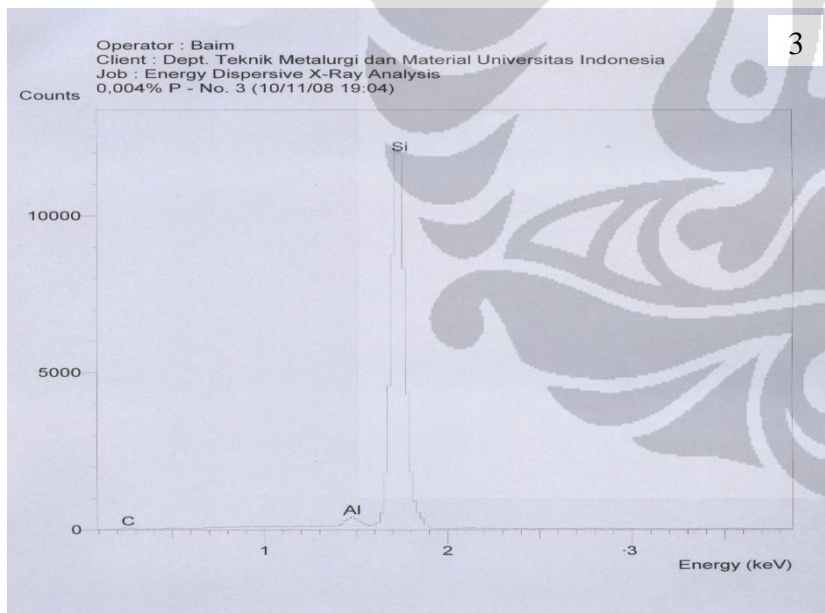
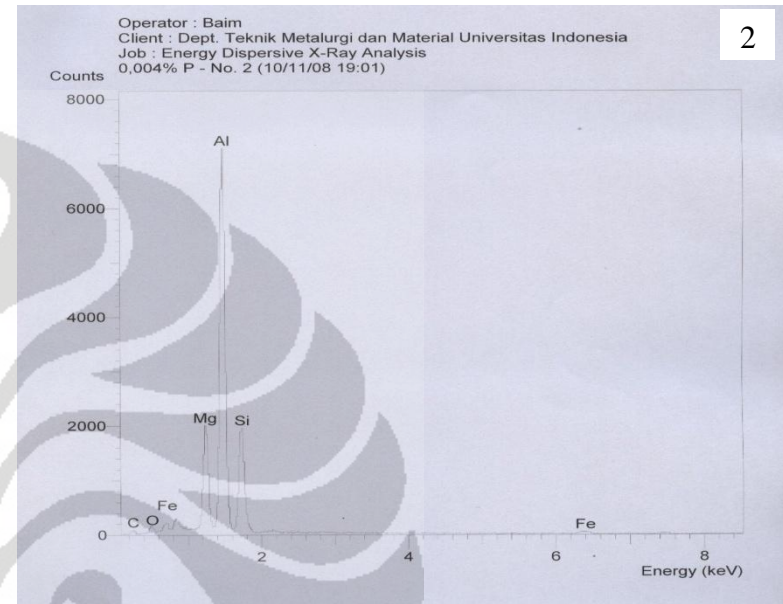
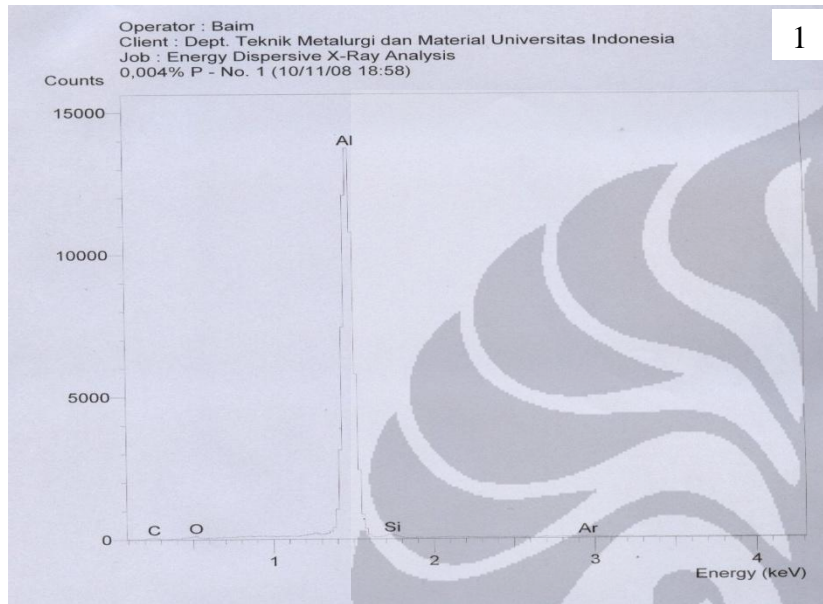
Standards :

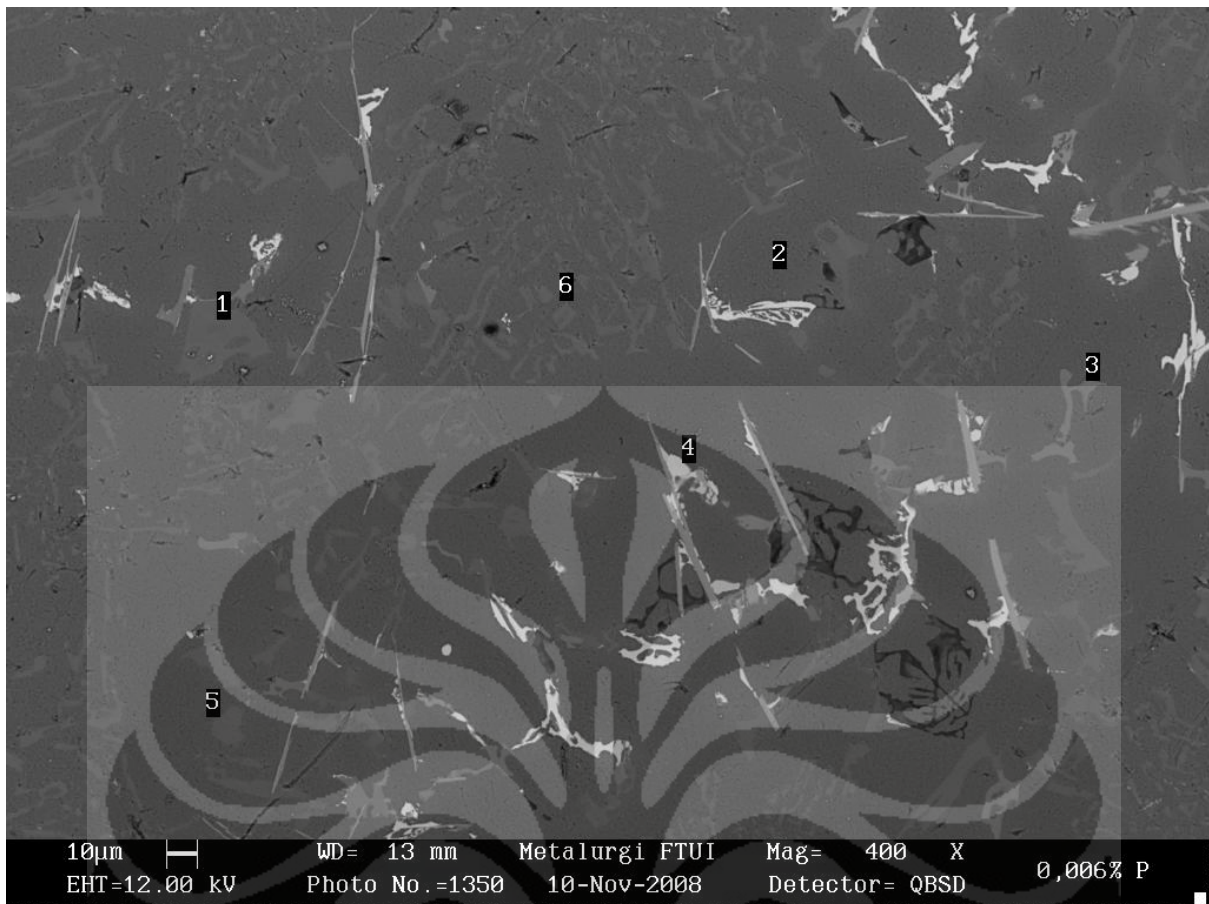
C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 Ni K Nickel 22/03/06  
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.32	1.19
Al K	ED	29.39	48.12
Si K	ED	0.16	0.25
Ni K	ED	29.17	21.95
Cu K	ED	40.97	28.49
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

4





**Hasil pengamatan SEM sample aluminium tuang AC8A dengan variasi penambahan fosfor 0,006 wt % dengan perbesaran 400 X**



SEMQuant results. Listed at 19:19:30 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,006% P - No. 1

System resolution = 59 eV

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

1 peak possibly omitted: 3.46 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL203 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.40	3.17
O K	ED	1.31	2.24
Al K	ED	1.35	1.37
Si K	ED	95.94	93.22
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

1

SEMQuant results. Listed at 19:23:59 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,006% P - No. 2

System resolution = 59 eV

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

2 peaks possibly omitted: -0.02, 2.14 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL203 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.53	1.18
O K	ED	1.10	1.83
Al K	ED	97.24	95.93
Si K	ED	1.13	1.07
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

2

SEMQuant results. Listed at 19:27:01 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,006% P - No. 3

System resolution = 61 eV

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

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL203 22/03/06  
 Mg K MagOxide 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 Fe K FeS2 22/03/06  
 Ni K Nickel 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.42	3.27
O K	ED	1.46	2.52
Mg K	ED	12.08	13.72
Al K	ED	57.37	58.73
Si K	ED	16.81	16.53
Fe K	ED	4.65	2.30
Ni K	ED	6.19	2.91
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

3

SEMQuant results. Listed at 19:28:35 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,006% P - No. 4

System resolution = 61 eV

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

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 O K AL203 22/03/06  
 Mg K MagOxide 22/03/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06  
 Ni K Nickel 22/03/06  
 Cu K Copper 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.33	1.22
O K	ED	1.01	2.82
Mg K	ED	0.71	1.30
Al K	ED	25.89	42.80
Si K	ED	0.84	1.33
Ni K	ED	9.22	7.00
Cu K	ED	62.01	43.53
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

4

SEMQuant results. Listed at 19:30:02 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,006% P - No. 5

System resolution = 59 eV

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

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.11	2.55
Al K	ED	1.97	2.02
Si K	ED	96.92	95.43
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

5

SEMQuant results. Listed at 19:39:31 on 10/11/08  
 Operator: Baim  
 Client: Dept. Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: 0,006% P - No. 6

System resolution = 59 eV

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

1 peak possibly omitted: 2.14 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K CeAl2 03/03/07  
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.99	2.28
Al K	ED	15.13	15.45
Si K	ED	83.88	82.27
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

6

