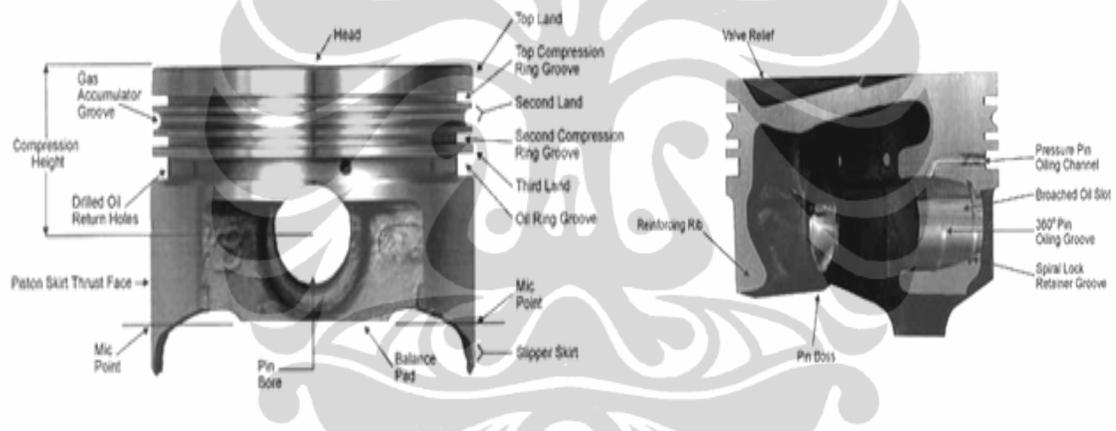


## BAB II

### DASAR TEORI

#### 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>[1]</sup>.



Gambar 2.1 Penampang piston dan bagian – bagiannya <sup>[1]</sup>

Bagian – bagian piston terdiri dari <sup>[1]</sup>:

- **Piston head** (kepala piston) merupakan bagian atas piston dan merupakan yang terdekat dengan *cylinder head* yang menerima panas serta tekanan yang besar selama mesin beroperasi
- **Piston pin bore** merupakan lubang pada bagian samping piston yang tegak lurus terhadap pergerakan piston yang akan menahan *piston pin*.
- **Piston pin** merupakan batang yang berlubang yang menghubungkan *connecting rod* ke piston

- **Skirt** merupakan bagian piston yang terdekat dengan *crankshaft* yang membantu meluruskan piston saat piston bergerak dalam silinder.
- **Ring groove** merupakan *recessed area* yang terletak mengelilingi piston yang berfungsi untuk menahan *piston ring*
- **Ring land** merupakan dua permukaan paralel dari *ring groove* yang fungsinya sebagai *sealing surface* untuk *piston ring*
- **Piston ring** digunakan sebagai *seal* antara piston dan dinding silinder. *Piston ring* terdiri dari 2 komponen yaitu pegas kompresi (*compression ring*) dan pegas pengontrol oli (*oil control ring*). Terdapat 3 peranan penting *piston ring* yaitu untuk mencegah kebocoran campuran udara, bensin dan gas pembakaran yang melalui celah antara piston dengan dinding silinder selama langkah kompresi dan isap; mencegah oli yang melumasi piston dan silinder masuk ke ruang bakar; dan memindahkan panas dari piston ke dinding silinder untuk membantu mendinginkan piston.

### 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. Konduktivitas panas merupakan kemampuan material untuk menerima dan mentransfer panas<sup>[3]</sup>.

Syarat – syarat utama material untuk pembuatan piston antara lain<sup>[5]</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.

- Mempunyai koefisien muai yang rendah agar didapat stabilitas dimensi yang baik pada temperatur tinggi.
- Mudah dalam pengecoran dan permesinan, sebagai hasil coran tentunya material ini harus memiliki mampu cor dan juga mampu mesin yang baik.

### 2.1.2 Material Piston

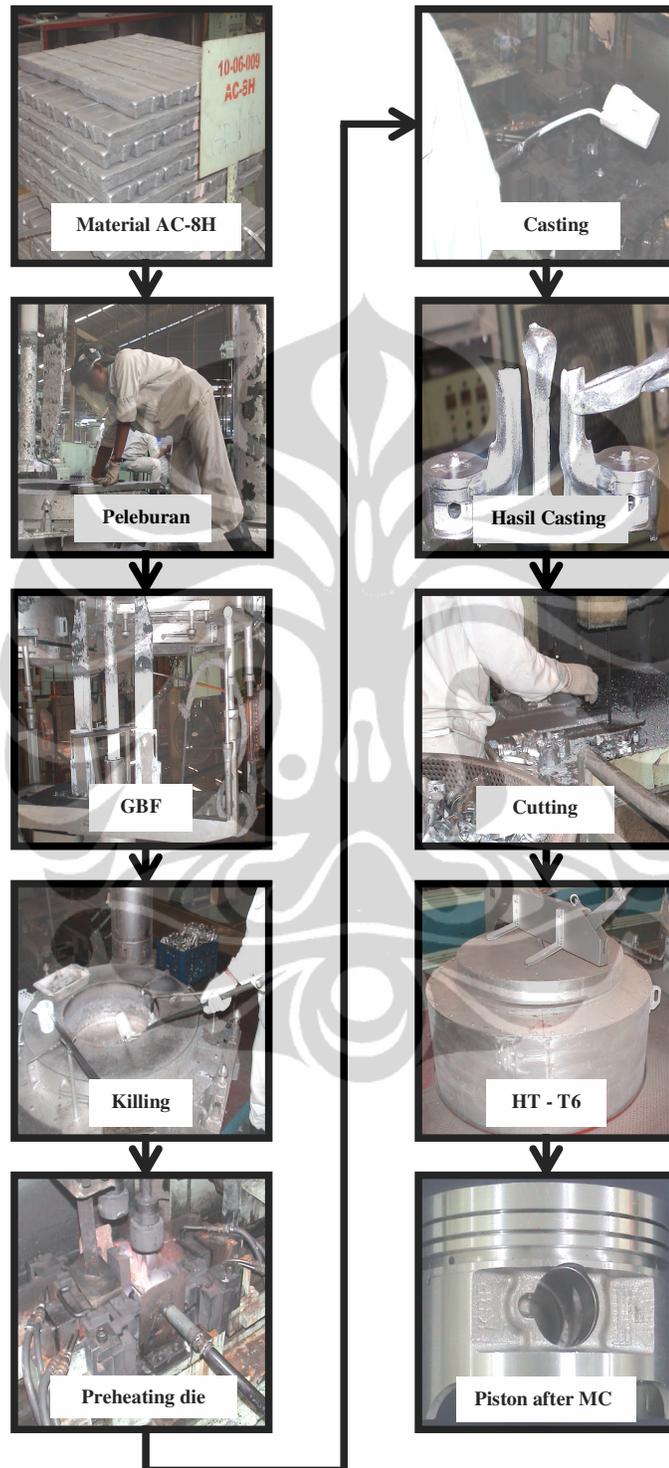
Umumnya material dasar coran untuk pembuatan piston adalah paduan Al-Si. Hal ini disebabkan karena karakteristik paduan tersebut dapat memenuhi persyaratan yang ditetapkan untuk material pembuatan piston. Paduan Al-Si-Cu-Ni-Mg merupakan salah satu paduan Al-Si yang memenuhi persyaratan material piston.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

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 Proses Pembuatan Piston



Gambar 2.2 Flow process Gravity die casting piston<sup>[5]</sup>.

Salah satu teknik produksi piston adalah *Gravity Die Casting*, proses ini merupakan salah satu pengembangan teknologi pembentukan logam dari keadaan cair menjadi padat. Teknik ini dapat menanggulangi kelemahan-kelemahan yang ada pada teknik casting biasa yaitu masalah gating system, penyusutan atau *shrinkage*, porositas atau gas-gas yang terperangkap dan juga masalah produksi yang menyangkut masalah kecepatan proses dan faktor investasi.

### **2.1.3.1 Proses Peleburan**

Proses pengecoran diawali dengan tahap peleburan. Untuk produksi piston, bahan dasar yang digunakan adalah aluminium AC8H. Perbandingan komposisi *ingot* dan *scrap* yang digunakan adalah 60 : 40. *ingot* dan *scrap* dilebur pada *melting furnace* sampai temperatur logam cair mencapai :  $720 \pm 10^{\circ}\text{C}$  . Energi yang digunakan untuk peleburan menggunakan gas LPG. Setelah semua *ingot* dan *scrap* melebur dilanjutkan dengan tahap *degassing* dengan metode *Gas Bubbling Floatation (GBF)* yang bertujuan untuk mengurangi kadar gas dan mengangkat kotoran pada *molten* aluminium. *GBF* dilakukan dengan rotor berputar dengan kecepatan 400-500 rpm, dengan gas argon yang bertekanan 16 Kgf/cm<sup>2</sup> yang diberikan sebanyak 18-20 liter / menit dan dilakukan selama 10 menit. Jika volume gas atau waktu *degassing* di bawah ketentuan, maka mekanisme pengikatan gas dan kotoran melalui gelembung tidak akan berlangsung optimal karena jumlahnya tidak memadai. Sebaliknya jika melebihi ketentuan, proses menjadi tidak efisien karena boros penggunaan gas argon dan waktu pengerjaan. Kotoran yang terapung dipermukaan biasa disebut *dross* yang selanjutnya dibuang. Penambahan *modifier* dilakukan pada tahapan ini.

### **2.1.3.2 Proses Pengecoran Piston**

Sebelum dilakukan penuangan, ada 2 langkah pemeriksaan yang harus dilakukan terlebih dahulu yaitu:

- a. Pemeriksaan komposisi kimia pada aluminium cair dengan spektrometer. Dari hasil spektrometer maka terlihat apakah komposisi kimia dari cairan aluminium sesuai standar atau tidak. Hal ini sangat penting karena akan menentukan *castability* dan produk piston yang dihasilkan.

b. Pengujian *vacuum porosity*. Untuk menghindari terjadinya *pin hole* saat dicor Setelah kedua hal tersebut selesai dilakukan, maka piston siap dicetak. Karena pada pembuatan piston menggunakan teknik pengecoran *Gravity Die Casting* maka proses penuangan lelehan aluminium dilakukan dengan manual oleh operator menggunakan *pouring ladle* ke dalam  *mold*. kecepatan dan debit penuangan sangat bergantung pada kecakapan operator *casting*. Dalam satu kali *casting* dihasilkan dua buah piston yang identik.

*Set up casting* piston :

- Kecepatan tuang = 2 – 2,5 detik/cast
- Temperatur Aluminium =  $680^{\circ} \pm 10^{\circ} \text{C}$
- Temperatur *dies* =  $280^{\circ} \pm 20^{\circ} \text{C}$
- Tekanan air pendingin = 4 – 6 kgf/cm<sup>2</sup>
- Waktu pembekuan = 60 detik

### 2.1.3.3 Pemotongan Piston

Tahap selanjutnya yaitu pemotongan piston. Piston ini dipotong dan dipisahkan dari *gating system*-nya. Alat yang digunakan adalah mesin *band saw blade*. Hasil sisa potongan disebut *scrap* dikumpulkan dan dilebur kembali bersama *ingot*.

### 2.1.3.4 Perlakuan Panas

Tahapan ini dilakukan dengan tujuan agar sifat mekanis piston menjadi lebih baik dan presipitat terdistribusi merata. Perlakuan panas ini dilakukan 4 tahap, yaitu <sup>[5]</sup> :

#### ***Solution treatment***

Tahap ini dilakukan pemanasan pada oven dengan suhu  $510 \pm 10^{\circ}\text{C}$  selama 90 menit sehingga akan didapatkan struktur mikro yang homogen pada semua presipitat terlarut dalam larutan padat aluminium.

#### ***Quenching***

Setelah dipanaskan kemudian piston *diquenching* dalam air yang bersuhu  $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$  dan ditahan dalam temperatur ini selama 30 detik, pendinginan kejut ini dilakukan agar struktur mikro paduan aluminium tidak sempat mengalami

perubahan. Fasa-fasa yang larut tidak diberi waktu untuk melakukan difusi membentuk fasa presipitat. Struktur mikro yang dihasilkan *quenching* ini adalah *super-saturated solid solution aluminium* (larutan padat aluminium yang lewat jenuh) yang bersifat keras dan getas.

### ***Artificial ageing***

Setelah proses *quenching*, piston kembali dimasukkan ke oven dengan temperatur  $230 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  dan ditahan pada kondisi ini selama 5 jam. Dalam kondisi tersebut, struktur mikro paduan aluminium akan secara perlahan mengalami perubahan. Fasa-fasa terlarut akan mempunyai kesempatan untuk berdifusi melakukan pengintian dan membentuk fasa-fasa presipitat di dalam butiran paduan aluminium. Fasa-fasa presipitat tersebut didominasi oleh fasa  $\text{Si}_3\text{Al}$  ( $\gamma'$ ). Keberadaan presipitat-presipitat ini dalam butiran  $\gamma\text{-Al}$  akan meningkatkan kekerasan paduan aluminium selama diameternya tidak terlalu besar. Jika terjadi *over aging* (prosesnya terlalu lama) maka inti-inti presipitat tersebut akan tumbuh atau saling bergabung menjadi fasa presipitat dengan ukuran yang lebih besar (*grain-growth*), yang akan menyebabkan kekerasan paduan menurun kembali. Dengan waktu selama 5 jam, diharapkan piston akan mencapai nilai kekerasan maksimal.

### ***Natural cooling***

Setelah 5 jam di-*aging*, piston dikeluarkan dari oven untuk didinginkan pada temperatur kamar (*ambient*), setelah proses perlakuan panas dilakukan pengujian kekerasan secara acak pada piston. Standar kekerasan setelah proses *heat treatment* adalah 60 - 70 HRB.

## **2.2 ALUMINIUM dan KARAKTERISTIKNYA**

Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1809 sebagai suatu unsur dan kemudian pertama kali direduksi sebagai logam oleh H. C. Oersted pada tahun 1825. Secara industri, pada tahun 1886 Paul Heroult di Perancis dan C. M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah memperoleh logam aluminium dan alumina dengan cara elektrolisa dari garamnya yang terfusi. Sampai sekarang proses Heroult-Hall masih dipakai untuk memproduksi

aluminium. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah pada urutan yang kedua setelah besi dan baja, dan ini merupakan urutan yang tertinggi di antara logam-logam *non-ferrous* <sup>[6]</sup>.

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik serta sifat-sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Selain itu, kekuatan mekaniknya akan sangat meningkat dengan penambahan unsur-unsur Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, secara satu persatu atau bersama-sama. Material ini dipergunakan dalam bidang yang luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga tapi juga dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi dan sebagainya<sup>[6]</sup>.

Secara umum sifat-sifat aluminium, diantaranya adalah sebagai berikut<sup>[7]</sup>:

- Memiliki berat yang relatif ringan dengan berat jenis sebesar  $2.7 \text{ g/cm}^3$  atau hampir  $1/3$  dari berat jenis baja.
- Kekuatan mekanis dan sifat-sifat fisiknya dapat ditingkatkan dengan cara menambahkan unsur-unsur paduan.
- Memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap larutan kimia, cuaca, dan berbagai jenis gas.
- Memiliki reflektivitas yang sangat baik.
- Memiliki elastisitas yang tinggi, sehingga material ini sering digunakan dalam aplikasi yang melibatkan kondisi pembebanan kejut.
- Non-magnetik, serta memiliki konduktivitas listrik dan panas yang hampir sebaik tembaga.
- Mudah ditempa dan mudah dikerjakan dalam kebanyakan proses manufaktur dan perubahan bentuk.

Selain itu sifat atau karakteristik dari aluminium dapat berbeda tergantung dari tingkat kemurniannya. Karakteristik dari aluminium murni yang diurutkan berdasarkan tingkat kemurniannya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Karakteristik Aluminium Murni<sup>[8]</sup>

Karakteristik	Kemurnian, %				
	99.999	99.990	99.800	99.500	99.000
Titik Lebur, °C		660.2	-	-	657.0
Titik didih, °C		2480	-	-	-
<i>Latent heat of fusion, cal/g</i>		94.6	-	-	93.0
Specific heat pada 100°C, <i>cal/g</i>		0.2226	-	-	0.2297
Berat jenis pada 20°C, <i>g/cm<sup>3</sup></i>	2.7	2.7	2.71	2.71	
<i>Electical Resistivity, μΩ-cm</i> pada 20°C	2.63	2.68	2.74	2.8	2.87
<i>Temperature Coeficient of Resistivity</i>		0.0042	0.0042	0.0041	0.0040
Koefisien Ekspansi Panas x 10 <sup>6</sup> (20-100°C)		23.86	23.5	23.5	23.5
Konduktivitas Panas, pada 100°C		0.57	0.56	0.55	0.54
Reflektivitas (total), %		90	89	86	-
Modulus Elastisitas, <i>lb/in<sup>2</sup> x 10<sup>6</sup></i>		9.9	-	-	10.0

## 2.3 ALUMINIUM dan PADUANNYA

Aluminium dan paduannya diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu aluminium tuang (*cast alloys*) dan aluminium tempa (*wrought alloys*). Kemudian masing-masing dapat diklasifikasikan lagi menjadi *cast alloys* yang dapat di *heat treatment* (dapat dilakukan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanis) dan di *work hardened* (pengerasan kerja), serta *wrought alloys* yang dapat di *heat treatment* dan di *work hardened*<sup>[9]</sup>.

### 2.3.1 Paduan Aluminium Tuang

Paduan aluminium tuang memiliki beberapa karakteristik seperti:

- Memiliki sifat fluiditas yang baik
- Temperatur lebur dan temperatur tuang relatif rendah dibandingkan logam lain
- Siklus penuangan cukup cepat
- Kelarutan gas (hidrogen) dapat dikendalikan dengan metode proses yang baik
- Cukup banyak jenis paduan aluminium tuang yang relatif bebas dari kecenderungan *hot shortness*.
- Memiliki stabilitas kimia yang relatif baik.
- Memiliki permukaan *as-cast* yang baik, mengkilat tanpa noda.

### 2.3.1.1 Sistem Penamaan Aluminium Tuang

Sebelum asosiasi aluminium mengumumkan sistem penamaan standar (ANSI), banyak industri aluminium menggunakan penamaan lain. Selain itu, organisasi lain seperti pemerintahan federal, SAE, Militer USA dan ASTM, juga masih menggunakan penamaan lain untuk aluminium tuang.

Sistem penamaan aluminium tuang terdiri dari empat angka. Angka pertama mengindikasikan unsur paduan utama. Angka yang kedua dan ketiga menandakan kandungan minimum aluminium, dan angka yang terakhir menandakan bentuk produk, yaitu: angka 0 untuk menandakan batas komposisi kimia untuk coran, angka 1 dan 2 untuk menandakan batas komposisi kimia untuk *ingot*. Namun, untuk penamaan tertentu misalnya seperti A333, dimana awalan huruf "A" menandakan modifikasi dari tipe aslinya<sup>[9]</sup>.

Berikut adalah sistem penamaan paduan aluminium tuang:

**Tabel 2.2** Sistem Penamaan Paduan Aluminium Tuang<sup>[9]</sup>

Nomor Penamaan	Unsur Paduan Utama
1xx.x	Aluminium Murni (99% atau lebih)
2xx.x	Tembaga
3xx.x	Silikon + Tembaga dan /atau magnesium
4xx.x	Silikon
5xx.x	Magnesium
6xx.x	Seri yang sudah tidak digunakan
7xx.x	Seng
8xx.x	Timah
9xx.x	Unsur lainnya

### 2.3.2 Pengaruh Unsur Paduan pada Aluminium

Baik paduan aluminium tuang atau tempa, sifat mekanis dan non-mekanisnya dipengaruhi oleh unsur-unsur paduan yang ada pada aluminium tersebut. Unsur-unsur tersebut diantaranya<sup>[10]</sup>:

- Silikon (Si)

Pengaruh dari silikon yang paling signifikan terhadap aluminium adalah meningkatkan sifat mampu cornya. Penambahan silikon ke dalam aluminium

akan meningkatkan fluiditas, ketahanan terhadap retak panas. Paduan aluminium silikon memiliki rentang yang sangat luas hingga 25% Si. Penambahan silikon juga dapat mengurangi nilai *specific gravity* dan koefisien ekspansi termal dari aluminium.

- Tembaga (Cu)

Kandungan tembaga yang biasa digunakan pada paduan aluminium adalah 4-10% tembaga. Tembaga sangat berpengaruh dalam meningkatkan kekuatan dan kekerasan dari aluminium baik yang *as-cast* dan juga setelah *heat treatment*. Akan tetapi, penambahan tembaga dapat mengurangi ketahanan retak panas dan juga mampu cor dari aluminium.

- Magnesium (Mg)

Magnesium merupakan dasar dari peningkatan kekuatan dan kekerasan pada paduan Al-Si yang telah di *heat treatment*. Pengerasan fasa  $Mg_2Si$  memperlihatkan batas kelarutan hingga 0.7% Mg. Umumnya dipergunakan dalam paduan kompleks Al-Si dengan Cu, Ni, dan unsur lainnya.

- Mangan (Mn)

Biasanya dianggap sebagai *impurity* pada proses *gravity casting* dan biasanya dikontrol agar berada pada level yang rendah. Pada paduan aluminium tempa, mangan merupakan paduan yang penting terutama dalam proses *work hardening*.

- Besi (Fe)

Besi meningkatkan ketahanan terhadap retak panas dan mengurangi kecenderungan sintering antara aluminium dengan cetakan logam. Dengan meningkatnya kandungan besi, maka keuletan akan semakin berkurang.  $FeAl_3$ ,  $FeMnAl_6$ , and  $\alpha AlFeSi$  merupakan fasa yang tidak larut yang bertanggung jawab dalam meningkatkan kekuatan terutama pada temperatur tinggi.

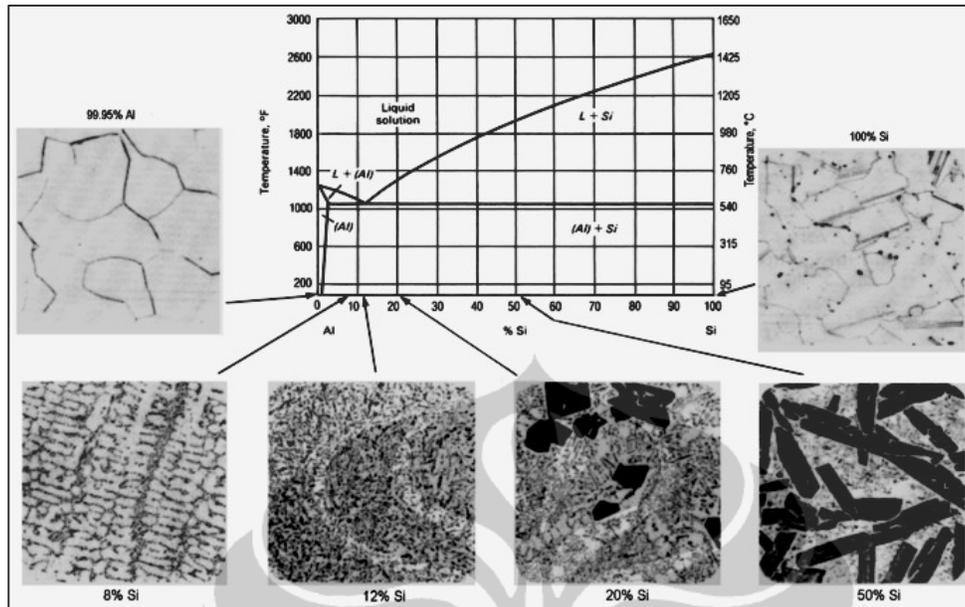
- Zink (Zn)

Tidak ada keuntungan yang signifikan dengan penambahan zink ke aluminium.

- **Nikel**  
Bersama dengan tembaga, nikel dapat meningkatkan sifat paduan aluminium pada temperatur tinggi. Selain itu juga dapat mengurangi koefisien ekspansi termal dari paduan tersebut.
- **Titanium**  
Titanium biasa digunakan untuk memperhalus struktur butir dari paduan aluminium tuang. Unsur ini biasanya dikombinasikan dengan sejumlah kecil boron.
- **Sodium (Na)**  
Sodium dapat memodifikasi paduan aluminium silikon eutektik. Sodium dapat berinteraksi dengan fosfor yang dapat mengurangi pengaruh modifikasi dari eutektik.
- **Stronsium (Sr)**  
Merupakan unsur *modifier* pada paduan aluminium silikon eutektik. Rentang yang biasa ditambahkan adalah 0.008-0.04%. Semakin tinggi kandungan Sr, maka dapat membentuk porositas.
- **Fosfor (P)**  
Dalam bentuk  $AlP_3$ , fosfor nukleasi dan memperhalus fasa silikon primer pada paduan hipereutektik Al-Si. Dalam konsentrasi 1 ppm, fosfor dapat memperkasar struktur eutektik pada paduan hipoeutektik Al-Si. Fosfor dapat menghilangkan pengaruh dari *modifier* eutektik, seperti sodium dan stronsium.

## 2.4 PADUAN ALUMINIUM SILIKON

Paduan aluminium silikon merupakan jenis paduan yang paling banyak digunakan dalam proses pengecoran. Ciri khas dari paduan ini adalah eutektik terbentuk antara aluminium dan silikon pada kadar silikon 11-13% , Gambar 2.3.

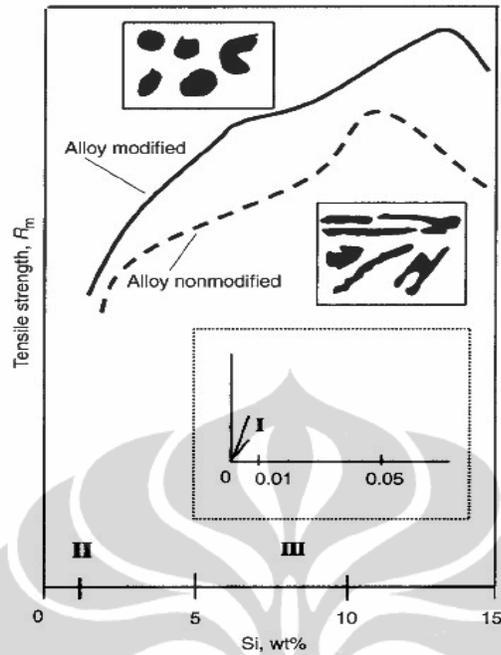


**Gambar 2.3** Diagram Fasa Aluminium Silikon Beserta Struktur Mikro yang Terbentuk pada Berbagai Macam Komposisi Silikon<sup>[11]</sup>

Berdasarkan kandungan silikonnya, paduan ini diklasifikasikan menjadi tiga bagian yaitu<sup>[12]</sup> :

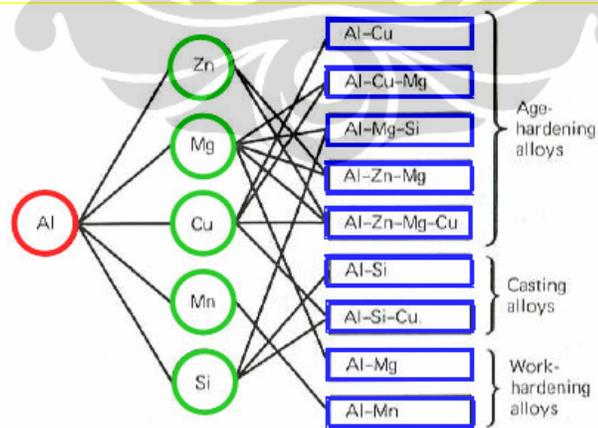
1. Paduan hipoeutektik yang memiliki kandungan silikon antara 5-10%
2. Paduan eutektik, kandungan silikon 11-13%
3. Paduan hipereutektik, kandungan silikon 14-25%

Berdasarkan kemurnian dari material dasar, paduan Al-Si terdiri dari berbagai macam elemen pengotor seperti besi, mangan, tembaga, dan seng. Juga, tembaga dan magnesium sering ditambahkan sebagai unsur paduan untuk meningkatkan kekuatan dan kemampukerasan dari material yang akan dicor. Pengotor dan unsur paduan akan larut menjadi *solid solution* dalam matriks dan sebagian membentuk partikel intermetalik selama proses pembekuan.



**Gambar 2.4** Pengaruh Kadar Silikon pada Aluminium terhadap Kekuatan Tarik<sup>[6]</sup>

Pada umumnya paduan aluminium silikon diaplikasikan untuk proses *casting*. Hal ini dikarenakan hadirnya silikon sebagai paduan untuk aluminium dapat meningkatkan karakteristik coran. Penambahan silikon hingga titik eutektik, akan meningkatkan sifat mampu alir aluminium.



**Gambar 2.5** Paduan Aluminium dan Proses Pengaplikasiannya<sup>[13]</sup>

Pada Tabel 2.3 dapat dilihat jenis-jenis atau nama-nama paduan aluminium silikon yang biasa digunakan dalam aplikasi manufaktur terutama dibidang otomotif.

**Tabel 2.3** Beberapa Jenis Paduan Aluminium Silikon<sup>[10]</sup>

Paduan	Metode Pengecoran	Komposisi, %									
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Lainnya
<b>328.0</b>	<i>Sand Casting</i>	7.5-8.5	1	1.0-2.0	0.20-0.6	0.20-0.6	0.35	0.25	1.5	0.25	0.5
<b>332.0</b>	<i>Permanent Mold Casting</i>	8.5-10.5	1.2	2.0-4.0	0.5	0.50-1.5	-	0.5	1	0.25	0.5
<b>333.0</b>	<i>Permanent Mold Casting</i>	8.0-10.0	1	3.0-4.0	0.5	0.05-0.50	-	0.5	1	0.25	0.5
<b>A333.0</b>	<i>Permanent Mold Casting</i>	8.0-10.0	1	3.0-4.0	0.5	0.05-0.50	-	0.5	3	0.25	0.5
<b>336.0</b>	<i>Permanent Mold Casting</i>	11.0-13.0	1.2	0.5-1.5	0.35	0.7-1.3	-	2.0-3.0	0.35	0.25	0.005
<b>339.0</b>	<i>Permanent Mold Casting</i>	11.0-13.0	1.2	1.5-3.5	0.5	0.50-1.5	-	0.5-1.5	1	0.25	0.5

#### 2.4.1 Material AC8H

Penamaan AC8A menunjukkan sistem penamaan dengan menggunakan standar JIS yang dipakai oleh negara Jepang. Padanan material ini pada standar AA adalah aluminium 336.0. Paduan AC8A merupakan tipe Al-Si tuang yang banyak dipakai pada industri pengecoran komponen otomotif. Komponen-komponen otomotif seperti piston merupakan contoh aplikasi dari paduan AC8A. Tabel 2.4 menunjukkan komposisi kimia dari AC8A.

**Tabel 2.4** Komposisi AC8A berdasarkan JIS<sup>[14]</sup>

Unsur	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ni	Zn	Ti	Cr
% berat	11-13	0.8-1.3	0.8-1.3	0.7 max	0.15 max	0.8-1.5	0.15 max	0.2 max	0.10 max

Berbeda dengan AC8A , AC8H memiliki sedikit perbedaan pada komposisi kimianya. AC8H didapat dengan memodifikasi komposisi kimia dari standar AC8A. Komposisi kimia dari AC8H dapat dilihat pada Tabel 2.5.

**Tabel 2.5** Komposisi Kimia AC8H<sup>[2]</sup>

Unsur	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ni	Zn	Ti	Cr	Pb	Sn
%	10.50–	2.50–	0.70–	0.05–	0–	0–	0–	0.20–	0–	0–	0–
berat	11.50	3.50	1.30	0.40	0.10	0.10	0.10	0.30	0.05	0.05	0.05

Perbedaan mendasar komposisi kimia AC8A dan AC8H pada unsur Cu (tembaga), dimana AC8H memiliki *range* kandungan tembaga lebih tinggi dari AC8A. Tembaga sangat berpengaruh dalam meningkatkan kekuatan dan kekerasan dari aluminium baik yang *as-cast* dan juga setelah *heat treatment*<sup>[10]</sup>.

## 2.5 MODIFIKASI PADA ALUMINIUM SILIKON

Proses modifikasi suatu paduan logam aluminium silikon sangat diperlukan agar dapat memperbaiki sifat mekanis material tersebut. Sifat mekanis yang baik dari suatu logam dapat dicapai dengan merubah bentuk struktur mikro paduan tersebut. Perubahan bentuk struktur mikro dapat dicapai dengan penambahan unsur-unsur tertentu yang dinamakan *modifier*. Selain dengan penambahan *modifier*, perubahan struktur mikro dapat juga dicapai dengan merubah kecepatan pembekuan (*quench modification*) dan perlakuan panas (*heat treatment*) pada material tersebut<sup>[3]</sup>.

Modifikasi biasanya dilakukan dengan cara penambahan sejumlah unsur kimia ke dalam paduan aluminium cair saat proses pengecoran. Untuk paduan aluminium silikon hipoeutektik, *modifier* yang digunakan adalah sodium (Na), stronsium (Sr), kalsium (Ca), dan antimony. Sedangkan untuk paduan aluminium silikon hipereutektik, *modifier* yang digunakan, adalah fosfor (P)<sup>[3]</sup>. Secara umum, penambahan *modifier* tersebut bertujuan untuk menghambat pertumbuhan kristal-kristal silikon dalam fasa eutektik, sehingga partikel silikon yang semula

dalam bentuk *lamel* (jarum kasar), menjadi berbentuk *granular*, dan akhirnya menjadi partikel yang lebih halus (*modified*) dan tersebar merata.

### 2.5.1 Fungsi *Modifier*

Penambahan *modifier* pada paduan aluminium silikon dapat mengurangi tingkat *scrap* dan meningkatkan produktivitas dikarenakan *modifier* berfungsi untuk <sup>[4]</sup>:

- Mengontrol morfologi silikon
- Meningkatkan sifat mekanis
- Meningkatkan *machinability*
- Mengurangi *hot tearing*
- Mengurangi waktu *heat treatment*
- Mengontrol distribusi porositas
- Meningkatkan *die filling*
- Menghambat pembentukan silikon primer
- Mencegah / berfungsi sebagai *anti sticking*

*Modifier* akan mengubah ukuran dan morfologi silikon dari yang berbentuk acicular yang kasar menjadi bentuk *fibrous* yang halus yang berdampak pada perubahan sifat material seperti kekuatan tarik dan *machinability*. Modifikasi juga berfungsi untuk menghaluskan silikon primer yang keras.

### 2.5.2 Unsur – unsur *Modifier*

Beberapa unsur yang biasa digunakan sebagai *modifier* meliputi stronsium dan natrium yang digunakan pada paduan Al-Si hipoeutektik serta fosfor dan antimony yang digunakan pada paduan Al-Si hipereutektik.

#### a. Stronsium

Stronsium merupakan unsur *modifier* yang biasanya ditambahkan pada paduan aluminium silikon hipoeutektik. Penambahan stronsium pada kadar yang sangat rendah akan semakin mengefektifkan modifikasi. Biasanya stronsium ditambahkan pada *range* 0,008 – 0,04%. Proses modifikasi dengan stronsium ini bertujuan untuk menghambat pertumbuhan kristal-kristal silikon dalam paduan

aluminium silikon hipoeutektik, yang awalnya berstruktur *lamel* (jarum) menjadi berstruktur *fibrous*.

b. Natrium

Natrium merupakan unsur yang ditambahkan untuk memodifikasi aluminium silikon eutektik. Dibutuhkan konsentrasi natrium yang sangat rendah (0,001%) agar modifikasi semakin efektif. Biasanya, natrium ditambahkan pada range 0,005 – 0,015%.

Natrium ditambahkan ke dalam paduan aluminium silikon dalam bentuk padatan logam. natrium memiliki kekurangan antara lain mudah terbakar pada udara terbuka dan pada aluminium cair dapat menimbulkan turbulensi yang dapat meningkatkan hidrogen dan jumlah oksida, sehingga *modifier* ini jarang digunakan.

c. Fosfor

Fosfor digunakan untuk memodifikasi paduan aluminium silikon hipereutektik dimana aluminium phosphida (AlP) bertindak sebagai nukleus dari silikon primer, sehingga akan menghaluskan silikon dan meningkatkan *machinability*.

Pada konsentrasi ppm, fosfor akan mengkasarkan struktur eutektik pada paduan aluminium silikon hipoeutektik dan akan menghilangkan keefektifan modifier eutektik, natrium dan stronsium.

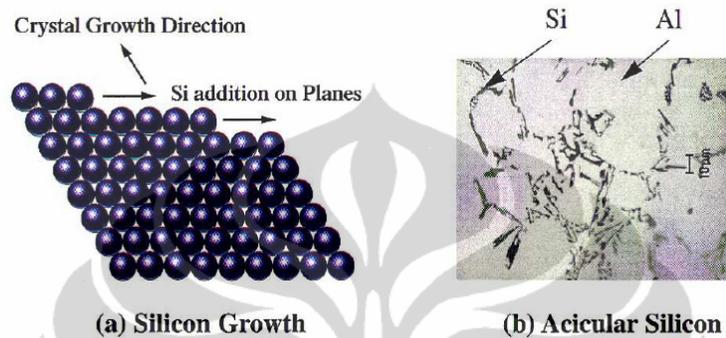
d. Antimony

Pada konsentrasi  $\geq 0,10\%$ , antimony akan menghaluskan aluminium silikon eutektik. Modifikasi ini akan menghasilkan struktur *acicular* eutektik yang lebih halus daripada struktur yang *fibrous*. Karena itu, peningkatan *castability* dan sifat mekanik dengan penambahan antimony tidak terlalu signifikan. Karena sifatnya yang beracun, unsur ini jarang dipergunakan sebagai *modifier*.

### 2.5.3 Mekanisme Modifikasi

Fasa silikon memiliki peranan penting dalam proses modifikasi. Silikon merupakan unsur non-logam dan memiliki bentuk kristal pada paduan aluminium. Kristal silikon memiliki perilaku khusus saat berada dalam paduan Al-Si yang disebut *faceted manner* yang berarti bahwa kristal silikon hanya tumbuh pada arah

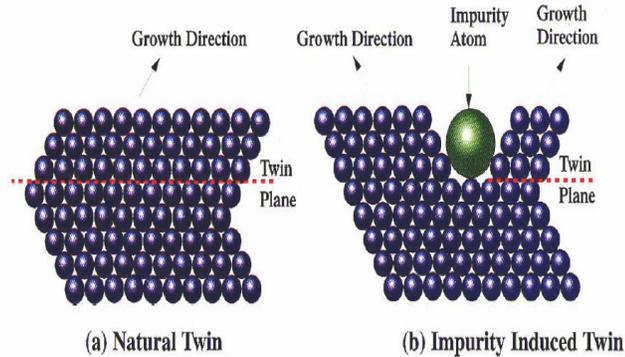
kristalografi tertentu. Gambar 2.6 menunjukkan secara skematis dimana atom – atom silikon bertambah pada bidang yang membentuk sudut dengan bidang pertumbuhannya. Karena itu, silikon yang tidak termodifikasi akan tampak seperti pelat dengan ujung yang tajam, *angular feature* yang disebut *acicular* <sup>[3]</sup>.



**Gambar 2.6** Pertumbuhan dan bentuk *acicular silicon* <sup>[3]</sup>.

Selama proses pertumbuhan kristal ini, memungkinkan terbentuknya cacat yang menyebabkan perubahan arah kristal yang disebut cacat *twin*. Cacat *twin* merupakan salah satu bentuk cacat kristalografi yang dapat terbentuk pada saat sekumpulan atom silikon mengalami pergeseran posisi melewati suatu bidang kristalografi. Hal ini terjadi secara natural, tetapi juga dapat disebabkan jika terdapat atom asing pada bidang pertumbuhan silikon sehingga akan mengganggu struktur.

Pembentukan *twin* secara natural biasanya terjadi hanya dalam jumlah yang kecil sehingga pengaruhnya pada struktur kristalin juga kecil. *Twinning* yang disebabkan karena adanya pengotor (*impurity-induced twinning*) 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*. Pengotor yang disebutkan diatas adalah *modifier* yang ditambahkan pada paduan. Seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.7 b, ukuran dari atom pengotor akan menjadi faktor utama yang menentukan apakah akan terbentuk *twin* atau tidak.



**Gambar 2.7** Pembentukan *twin* pada silikon<sup>[3]</sup>.

## 2.6 PENGARUH STRONSIUM SEBAGAI *MODIFIER*

Stronsium merupakan unsur yang banyak dipakai sebagai *modifier* pada kondisi proses pembekuan yang lambat. Proses penambahan *modifier* stronsium pada suatu proses pengecoran umumnya menggunakan *master alloy* yang mengandung 10 % stronsium. Penambahan menggunakan stronsium murni tidak efektif karena mudah untuk bereaksi dengan udara ataupun uap air, sehingga dalam waktu singkat terbentuk lapisan oksida yang membentuk SrO, SrO<sub>2</sub>, Sr(OH)<sub>2</sub> dan (CaSr)NO<sub>3</sub><sup>(3)</sup>. Pembentukan lapisan oksida ini tentunya membuat sulitnya pelarutan material ini pada aluminium<sup>[3]</sup>.

Penggunaan stronsium biasanya digunakan pada paduan Al-Si hipoeutektik, bertujuan untuk merubah bentuk silikon eutektik dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*. Perubahan bentuk ini menyebabkan perubahan sifat mekanis paduan aluminium tuang.

### 2.6.1 Pengaruh Stronsium pada Paduan Aluminium Silikon Hipoeutektik

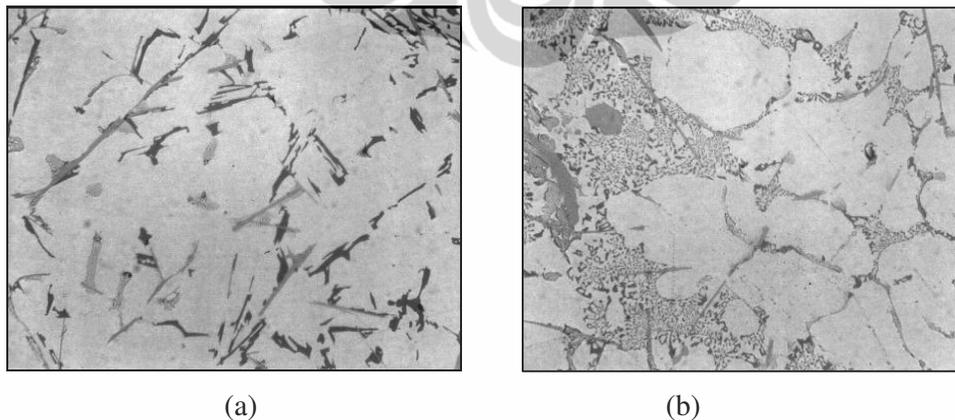
*Modifier* stronsium pada paduan hipoeutektik cenderung mengurangi tegangan antarmuka pada fasa eutektik yang terdiri dari struktur lamelar aluminium eutektik dan silikon eutektik. Sehingga sudut kontak antara Aluminium dan silikon meningkat, dan memungkinkan matriks aluminium menghalangi dan menghambat pertumbuhan kristal silikon

Penambahan *modifier* stronsium sebanyak 0.07 sampai 0.08% merupakan penambahan yang paling baik. Namun berdasarkan penelitian selanjutnya

diperoleh hasil bahwa penambahan stronsium dalam jumlah kecil sudah mencukupi. Sementara itu juga telah diketahui, bahwa penambahan stronsium sebesar 0.02% cukup untuk memodifikasi paduan Al-7%Si, seperti A356. Sedangkan untuk paduan silikon eutektik (Al-11%Si) seperti A413, dimodifikasi dengan stronsium sampai kurang lebih 0.04%.

Stronsium merupakan salah satu jenis *modifier* yang biasa digunakan untuk memodifikasi kristal silikon paduan aluminium-silikon hipoeutektik<sup>[15]</sup>. Proses modifikasi dengan stronsium ini bertujuan untuk menghambat pertumbuhan kristal-kristal silikon dalam paduan aluminium silikon hipoeutektik, yang awalnya berstruktur lamel (jarum) menjadi berstruktur *fibrous* sehingga dengan modifikasi ini akan meningkatkan kekuatan tarik dan keuletan paduan aluminium silikon hipoeutektik. Selain itu, fungsi lain dari *modifier* ini adalah untuk meningkatkan kekuatan impak dan *fracture*, kekuatan fatik, sifat mampu mesin, kecenderungan retak panas rendah, serta meningkatkan sifat fluiditas.

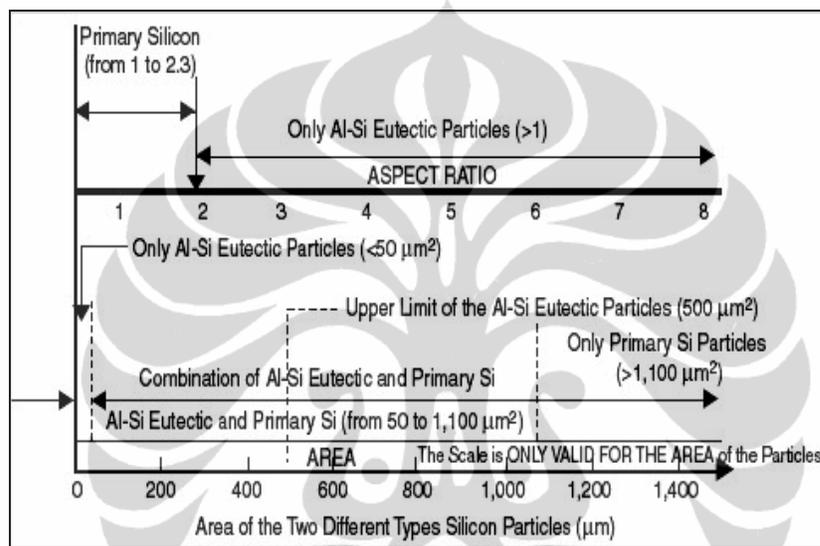
Dalam penggunaannya, stronsium ditambahkan dalam bentuk *master alloy*, karena jika digunakan stronsium murni akan menjadi tidak efektif karena bereaksi dengan atmosfer (higroskopis). Stronsium umumnya berhubungan dengan kenaikan porositas hidrogen, hal ini ditandai dengan meningkatnya kelarutan hidrogen atau berkurangnya tegangan permukaan<sup>[15]</sup>. Secara struktur mikro, efek dari penambahan stronsium dapat dilihat pada Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Aluminium Silikon Hipoeutektik (a)Tanpa modifikasi  
(b)Dimodifikasi dengan 0.018%Sr<sup>[3]</sup>

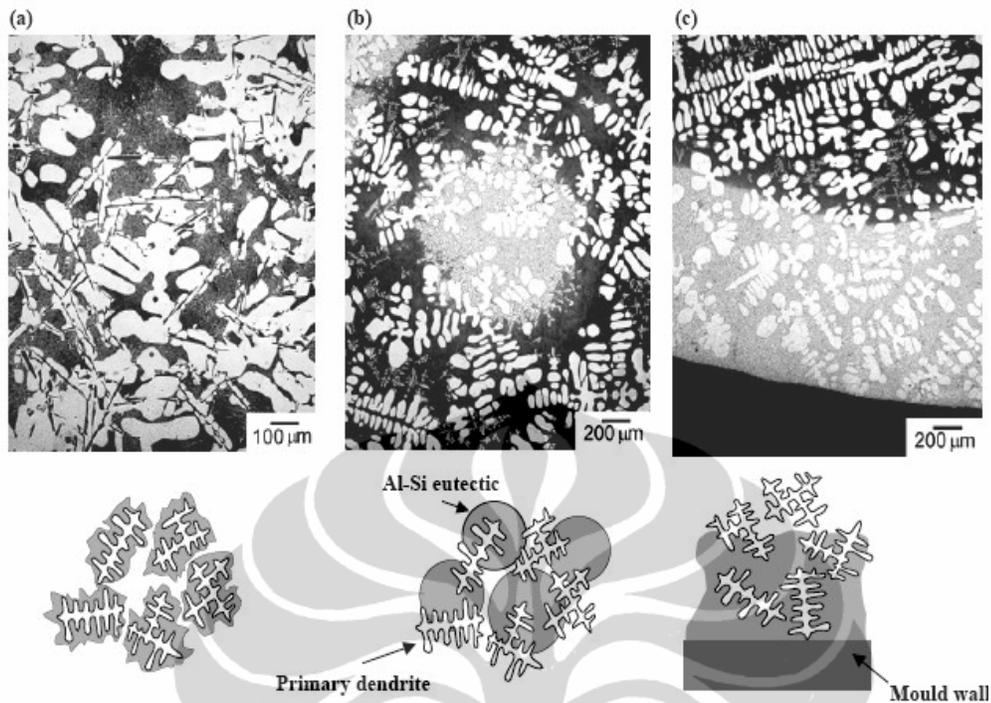
## 2.6.2 Pengaruh Stronsium pada Paduan Aluminium Silikon Eutektik

Pada umumnya paduan aluminium silikon eutektik memiliki lebih dari 50% struktur silikon eutektik. Sehingga, unsur-unsur seperti stronsium dan natrium dapat digunakan untuk memodifikasi paduan aluminium silikon eutektik ini. Hal ini dikarenakan baik stronsium atau natrium berfungsi untuk memodifikasi struktur dari silikon eutektik yang terdapat pada paduan aluminium silikon hipoeutektik.



**Gambar 2.9** Batasan Kehadiran Silikon Eutektik dan Primer pada Paduan Aluminium Silikon<sup>[28]</sup>

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, unsur-unsur *modifier* ini dapat mempengaruhi mekanisme pembekuan dari eutektik silikon. Perbedaan mekanisme pembekuan tersebut dapat dilihat pada gambar 2.10.



**Gambar 2.10** Tiga Mekanisme Pembekuan dari Aluminium Silikon Eutektik (a) Tanpa Modifikasi (b) Modifikasi Sr (c) Modifikasi Na<sup>[4]</sup>

### 2.6.3 Pengaruh Stronsium pada Kekuatan Tarik Paduan Al-Si

Paduan Al-Si-Cu sangat banyak dipakai dalam lingkup industri pengecoran karena sifat mekanik, ketahanan korosi serta mampu cor (*castability*) yang baik. Namun seperti telah dijelaskan sebelumnya, paduan ini memiliki keterbatasan yaitu kristal silikon eutektik yang berbentuk *flake / acicular* sehingga sifatnya menjadi getas (menjadi lokasi konsentrasi tegangan). Pengaruh stronsium sebagai *modifier* adalah mengubah bentuk kristal tersebut menjadi bentuk *fibrous* yang halus dan bulat sehingga keuletan dan kekuatan tarik (UTS) paduan Al-Si-Cu menjadi meningkat<sup>[3]</sup>. Pada tabel 2.6 terlihat bagaimana modifikasi struktur silikon meningkatkan kekuatan tarik dan keuletan paduan.

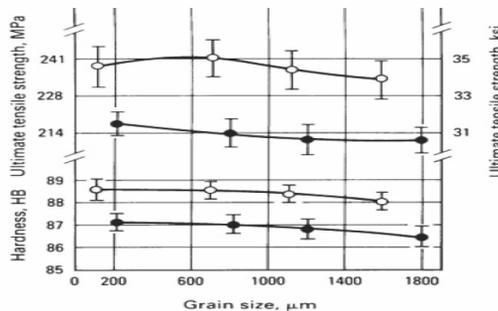
**Tabel 2.6** Pengaruh Modifikasi Terhadap Kekuatan Tarik dan Keuletan<sup>[3]</sup>

Struktur Silikon	Al-7%Si-0,3%Mg		Al-11%Si	
	UTS	E	UTS	E
<i>Acicular</i>	180	7	150	6
<i>Lamellar</i>	200	12 – 16	170	14 -- 18
<i>Fibrous</i>	200	16	170	18

Pengaruh modifikasi terhadap kekuatan tarik suatu paduan aluminium akan sesuai dengan tabel di atas bila pengontrolan variabel-variabel proses dilakukan. Kecepatan pembekuan, jumlah porositas (kualitas hasil pengecoran), dan jumlah *modifier* yang dipakai merupakan variabel-variabel yang harus dikontrol selama pengecoran sampel uji tarik dilakukan. Bila variabel-variabel tersebut tidak terkontrol, maka hasil yang diperoleh dari pengujian tarik akan mengalami penyimpangan<sup>[3]</sup>.

#### 2.6.4 Pengaruh Stronsium pada Kekerasan Paduan Al-Si

Proses modifikasi menghasilkan struktur silikon yang halus dan bulat sehingga kekuatan atau kekerasan dari paduan aluminium-silikon mengalami peningkatan. Efek modifikasi terhadap peningkatan kekuatan terlihat pada Gambar 2.11. Namun, seperti telah diketahui bahwa penambahan *modifier* meningkatkan porositas pada produk akhir yang dihasilkan. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan kekerasan atau kekuatan dari efek modifikasi menjadi tidak terlihat.

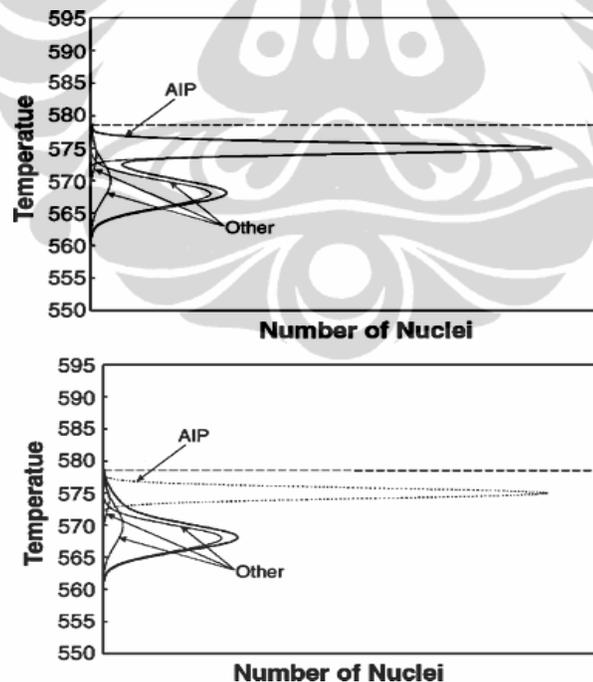


**Gambar 2.11** Pengaruh Modifikasi Terhadap Kekerasan dan Kekuatan Paduan Aluminium<sup>[15]</sup>

Peningkatan kekerasan karena efek *modifier* juga disebabkan oleh distribusi, ukuran, dan bentuk dari fasa-fasa intermetalik yang terbentuk<sup>[3]</sup>. Fasa intermetalik yang berukuran besar, tersebar merata dan terbentuk secara kontinyu meningkatkan kekerasan paduan aluminium.

## 2.7 PENGARUH PHOSFOR SEBAGAI *MODIFIER*

Selain dari unsur stronsium dan natrium, ternyata fosfor juga dapat mempengaruhi struktur dari silikon eutektik. Fosfor berperan dalam proses pengintian dari silikon eutektik tersebut. Dengan adanya fosfor, frekuensi pengintian dari silikon eutektik akan meningkat. Pada aluminium silikon eutektik penambahan fosfor akan membentuk presipitat *aluminium phosphide* (AIP). AIP inilah yang akan berperan dalam proses pengintian pada paduan aluminium silikon. Pada gambar 2.12 terlihat bahwa dengan adanya AIP pada paduan aluminium silikon akan meningkatkan secara signifikan jumlah inti yang terbentuk.



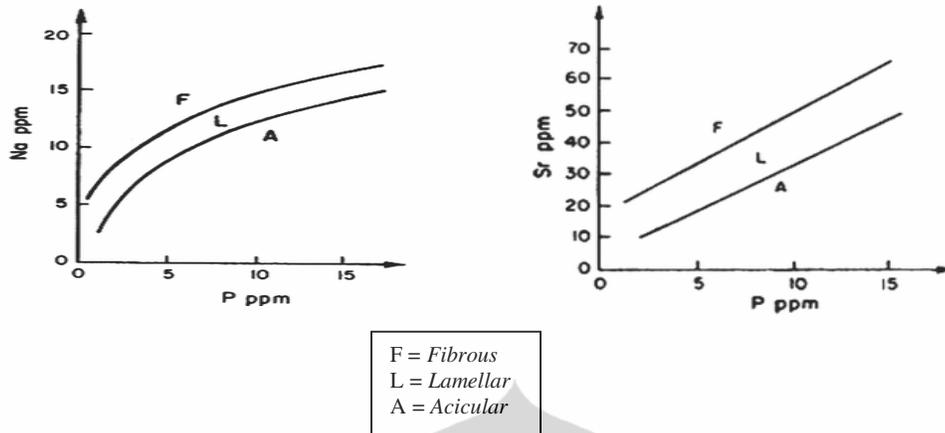
**Gambar 2.12** Jumlah Inti yang Terbentuk (a) Modifikasi Fosfor (b) Tanpa Modifikasi<sup>[19]</sup>

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 0.003-0.015% maka pada aluminium silikon eutektik jumlah penambahan fosfor seharusnya berada dibawah rentang tersebut. Fosfor tidak ditambahkan dalam bentuk master alloy karena harga yang mahal, tetapi sebagian besar dalam bentuk flux yang mengandung red phosphorus sebagai active agent dan garam-garam yang bertujuan mencegah terjadinya oksidasi dan pembakaran yang cepat dari unsur fosfor<sup>[30]</sup>.

Berdasarkan literatur, dikatakan bahwa 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 sodium (*double refinement*)<sup>[16]</sup>.

Beberapa penelitian mengenai pengaruh penambahan fosfor juga telah dilakukan, khususnya pengaruhnya terhadap silikon eutektik. Pada penelitian yang dilakukan oleh Kim, dkk dengan judul "*Effect of Phosphorus on Modification of Eutectic Al-7Si-0.3Mg Alloy*" 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 *elongation* mengalami penurunan seiring dengan peningkatan jumlah kandungan fosfor<sup>[17]</sup>.

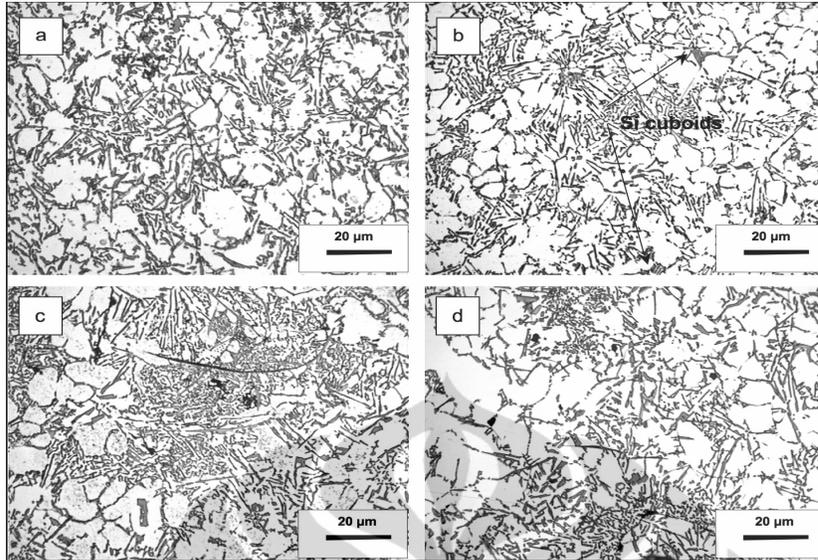
Berdasarkan penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa penambahan fosfor terhadap paduan aluminium silikon eutektik sangat dipengaruhi oleh kandungan stronsium atau sodium pada paduan tersebut. Interaksi antara fosfor dengan stronsium atau fosfor dengan sodium memegang peranan penting dalam proses modifikasi dari silikon eutektik, dalam hal ini adalah morfologi dari silikon eutektik yang terbentuk. Pengaruh kandungan fosfor, stronsium dan sodium dengan morfologi struktur silikon yang terbentuk dapat dilihat pada gambar 2.13.



**Gambar 2.13** Interaksi Antara Fosfor dengan Sodium dan Stronsium terhadap Morfologi Silikon Eutektik pada Paduan Al-7%Si (A356)<sup>[19]</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. Dengan kata lain, jumlah penambahan fosfor yang berbeda pada paduan yang berbeda serta kondisi pengecoran yang berbeda akan menghasilkan modifikasi dari silikon eutektik yang berbeda pula.

Penelitian mengenai penambahan fosfor terhadap aluminium silikon eutektik juga telah dilakukan. Penelitian tersebut dilakukan terhadap paduan Al-12Si dengan metode *pressure die casting*, dimana penambahan fosfor dilakukan dengan beberapa variabel kandungan fosfor yang berbeda, yaitu 10 ppm, 30 ppm dan tanpa penambahan fosfor. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil berupa foto mikrostruktur dari setiap variabel penambahan fosfor. Foto struktur mikro tersebut dapat dilihat pada gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Hasil Foto Struktur Mikro pada Penelitian “*Microstructural Effects of Phosphorus on Pressure Die Cast Al-12Si Components*”<sup>[18]</sup>

Dari hasil penelitian tersebut, terlihat adanya perubahan pada silikon eutektik dari hasil penambahan fosfor yang berbeda. Gambar (a) merupakan foto Struktur Mikro Al-12Si *pressure die casting* tanpa kandungan fosfor, gambar (b) dengan 10 ppm kandungan fosfor (c) dengan penambahan 30 ppm *red phosphorus* dan gambar (d) dengan penambahan 30 ppm fosfor dalam bentuk paduan AlFeP<sup>[18]</sup>.

Dari foto struktur mikro tersebut dapat dianalisa bahwa kandungan fosfor yang semakin meningkat dapat mempengaruhi ukuran dan bentuk dari silikon eutektik. Pada gambar 2.14 (gambar b dan c) penambahan fosfor dari 10 ppm ke 30 ppm terlihat adanya peningkatan nukleasi dari silikon eutektik. Hal ini ditunjukkan dengan bentuk silikon eutektik yang terbentuk menjadi lebih halus.

### 2.7.1 Pengaruh Fosfor pada Paduan Aluminium Silikon Hipereutektik

Aluminium silikon hipereutektik merupakan suatu keadaan dari sistem Al-Si dimana kadar silikonnya melebihi 12% (eutektik), sehingga pada keadaan ini pada umumnya akan terbentuk silikon primer.

Adanya silikon primer ini akan mengurangi sifat mekanis dari Al-Si, diantaranya menurunkan fluiditas dan mengurangi sifat *castability*-nya. Oleh

karena itu diperlukan unsur *modifier* seperti fosfor yang berfungsi untuk meningkatkan kembali sifat mekanisnya.

Penambahan fosfor sebagai *modifier* pada hipereutektik aluminium silikon 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 hipereutektik aluminium silikon. Sebagai contoh, dengan meningkatkan kadar Si dari 12% menjadi 20% maka akan meningkatkan ukuran silikon primer menjadi 4.5 kali lipat ukuran semula<sup>[3]</sup>.

Kadar fosfor yang digunakan sebagai *modifier* pada paduan Al-Si hipereutektik biasanya berada pada rentang 0.003% hingga 0.015% bergantung dari kondisi pengecorannya, yaitu dari kadar silikon pada paduan tersebut<sup>[3]</sup>. Ketidakesesuaian 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>[13]</sup>.

Fosfor akan bereaksi dengan Aluminium yang terdapat dalam paduan dan membentuk senyawa *aluminum phosphide* (AIP). AIP ini akan memacu terbentuknya inti dari silikon primer. Pada saat penambahan fosfor sebaiknya temperatur dinaikkan hingga 100<sup>0</sup>C di atas temperatur *melting*. Hal ini akan penting untuk mempermudah terbentuknya AIP. Oleh karena itu, pada paduan Al-Si hipereutektik, temperatur proses harus berada pada temperatur 700-800<sup>0</sup>C bergantung dari kadar silikon pada paduan tersebut<sup>[13]</sup>.

Akan tetapi dengan menaikkan temperatur, maka akan semakin tinggi pula kontaminasi hidrogen ke dalam lelehan Al-Si tersebut. Untuk itu, sebaiknya setelah dilakukan penambahan fosfor sebaiknya segera dilakukan *fluxing* untuk mencegah hidrogen masuk ke dalam lelehan logam. Selain itu, *fluxing* juga berguna untuk mendistribusikan inti *aluminium phosphide* ke seluruh lelehan logam.

Efek penambahan fosfor ini akan memberikan pengaruh yang besar terhadap properties dari paduan Al-Si, diantaranya adalah *Tensile Strength* dan Ketahanan Aus.

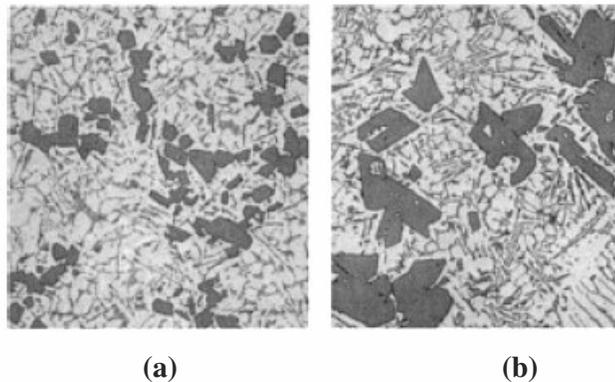
### 1) *Tensile Strength*

Penambahan fosfor pada Al-Si akan meningkatkan *tensile strength* 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 *tensile strength*-nya. Hal ini diakibatkan semakin banyaknya silikon primer yang dimodifikasi sehingga efeknya semakin terlihat dibandingkan tanpa dimodifikasi<sup>[3]</sup>.

### 2) Ketahanan Aus

Secara umum penambahan fosfor akan meningkatkan ketahanan aus dari paduan Al-Si hipereutektik. Silikon primer yang halus dan terdistribusi merata akan membuat paduan ini memiliki kekerasan yang merata pula, sehingga ketika terabrasif tidak akan mudah pecah (*brittle*)<sup>[31]</sup>.

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. Hal ini dikarenakan terbentuknya semakin banyak kandungan, maka akan semakin banyak juga silikon primer yang terbentuk.



**Gambar 2.15** Efek Penambahan Fosfor pada Paduan 390 (16-18%Si) (a) Setelah Dimodifikasi (b) Tanpa Dimodifikasi<sup>[10]</sup>

## 2.8 PENGARUH *MODIFIER* PADA STRUKTUR MIKRO

Perubahan struktur mikro akibat penambahan *modifier* dapat bervariasi dari bentuk *acicular* hingga *fibrous* silikon, bahkan dengan penambahan sodium ataupun stronsium yang tidak tepat akan didapatkan struktur campuran.

Lima variabel yang menentukan jenis struktur mikro akhir dari paduan Al-Si yang akan terbentuk adalah <sup>[3]</sup>:

### 1. Tipe *modifier* yang digunakan

Baik sodium dan stronsium mempunyai kemampuan untuk menghasilkan struktur mikro yang halus. Namun, sodium memiliki kemampuan yang lebih baik dalam modifikasi struktur karena sodium menghasilkan struktur modifikasi yang lebih seragam pada konsentrasi yang lebih rendah daripada stronsium.

### 2. Kehadiran pengotor pada logam cair

Kehadiran *impurities* pada logam cair dapat mempengaruhi kemampuan modifikasi suatu struktur. Contoh *impurities* tersebut adalah fosfor. Dimana kehadiran fosfor membuat proses modifikasi semakin sulit (pada aluminium silikon hipoeutektik), dan paduan yang memiliki kandungan fosfor lebih sedikit secara otomatis akan lebih mudah untuk dimodifikasi.

### 3. Laju pendinginan

Kecepatan pendinginan yang tinggi akan membantu proses modifikasi, sehingga jumlah *modifier* yang digunakan untuk *permanent mold casting* akan lebih sedikit daripada yang digunakan pada *heavy section sand casting*. Modifikasi umumnya jarang digunakan pada *die casting* karena pada *die casting* proses pembekuannya yang sangat cepat sehingga menghasilkan struktur yang sudah cukup halus. Berdasarkan penelitian, dengan menggunakan *modifier* strontium dengan kadar 0.02% - 0.03% pada paduan 380.0 akan menghasilkan struktur mikro yang lebih halus lagi yang berarti terjadi perbaikan pada sifat mekanis.

4. Jumlah *modifier* yang digunakan

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

5. Kandungan silikon pada paduan

Semakin besar konsentrasi silikon, maka semakin banyak *modifier* yang harus ditambahkan untuk menghasilkan modifikasi yang sempurna.

### 2.8.1 Overmodifikasi

Jumlah *modifier* dengan kadar yang lebih tinggi dari yang dibutuhkan untuk menghasilkan struktur mikro yang baik dapat menghasilkan efek yang buruk terhadap *properties* dari paduan<sup>[3]</sup>.

Overmodifikasi pada sodium dapat terjadi apabila konsentrasi sodium melewati batas 0.018% - 0.020%. Pada konsentrasi tersebut, maka akan terjadi penolakan terhadap sodium di depan *solidifying interface*. Kemudian terbentuk senyawa AlSiNa, dan hal ini menyebabkan tumbuhnya silikon primer kasar. Setelah itu, terjadi proses nukleasi dan pertumbuhan aluminium yang menyelimuti silikon kasar dan menghasilkan overmodifikasi pada produk akhir<sup>[3]</sup>.

Dua fenomena yang berbeda terjadi pada overmodifikasi stronsium. Salah satunya adalah pengkasaran partikel silikon dan perubahan bentuk dari silikon bulat yang halus ke bentuk jarum yang saling berhubungan. Hal lain yang terjadi ketika overmodifikasi stronsium adalah kehadiran stronsium yang mengandung fasa intermetalik pada struktur mikro, seperti partikel AlSrSi<sub>2</sub>.

Selain pada stronsium dan sodium, fenomena overmodifikasi juga terjadi pada modifikasi fosfor. 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>[3]</sup>.

### 2.8.2 Pengaruh Modifikasi terhadap Porositas

Modifikasi selalu dihubungkan dengan perubahan porositas dari coran. Coran yang tidak termodifikasi biasanya mempunyai *porous* makro dan *shrinkage* yang besar. Dengan modifikasi, *porous* makro yang besar akan berganti dengan *porous* yang halus dan terdistribusi merata. Beberapa pendapat menyebutkan bahwa nukleasi *porous* semakin mudah dalam lelehan logam yang termodifikasi dikarenakan penurunan tegangan permukaan. Jika *porous* lebih mudah terbentuk, maka *porous* 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>[4]</sup>:

Perbedaan kelarutan gas hidrogen dalam paduan aluminium padat dan cair yang cukup besar menyebabkan gas hidrogen terperangkap dalam padatan, membentuk *porous*. Adanya *modifier* akan meningkatkan kelarutan hidrogen dalam lelehan logam sehingga menyebabkan *porous*.

### 2.9 PROSES HEAT TREATMENT PADA PADUAN ALUMINIUM

Paduan aluminium baik *wrought product* maupun *cast product* dapat ditingkatkan sifat mekanisnya dengan cara *heat treatment* (paduan yang dapat di *heat treatment*), sedangkan untuk paduan yang tidak dapat di *heat treatment* hanya mengandalkan efek pengerjaan dingin untuk pencapaian sifat mekanis yang dibutuhkan<sup>[3]</sup>.

Tujuan utama proses *heat treatment* pada paduan aluminium adalah<sup>[24]</sup>:

1. Melunakkan paduan untuk meningkatkan proses pengerjaan (tidak relevan untuk *casting*).
2. Untuk meningkatkan kekuatan dan menghasilkan properti mekanis yang diinginkan.
3. Untuk menstabilkan properti fisik ataupun mekanis atau ketahanan korosi, dan untuk menghindari perubahan yang akan muncul karena waktu pada temperatur ruang atau temperatur yang dinaikkan.
4. Untuk memastikan kestabilan dimensi selama pemakaian.

5. Untuk menghilangkan tegangan sisa yang disebabkan oleh pendinginan yang tak merata.

### 2.9.1 Penandaan untuk Kondisi *Heat-Treatment*

W dan T merupakan penandaan yang diberikan pada aluminium *wrought* dan *cast* yang dapat di *heat treatment* (artinya logam-logam yang dapat dikuatkan dengan pemberian panas atau proses thermal). Penandaan W menyatakan kondisi tidak stabil dan tidak umum digunakan. Penandaan T yang diikuti angka 1 sampai 10 menyatakan proses yang diberikan pada logam *cast* dan *alloy* tersebut. Penandaan *temper* dan penjelasan singkat mengenai prosesnya dijelaskan sebagai berikut<sup>[20]</sup>:

- T1, didinginkan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu dan *natural ageing* sampai kondisi temperatur ruang. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pekerjaan dingin setelah proses pembentukan dengan kenaikan suhu seperti proses pencetakan dan proses ekstrusi dan untuk sifat mekanis setelah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang. Penandaan ini juga diberikan untuk produk yang diratakan dan diluruskan setelah proses pendinginan dari proses pembentukan.
- T2, didinginkan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu, pekerjaan dingin, *natural ageing* sampai kondisi temperatur ruang. Penandaan ini diberikan untuk produk yang mengalami pekerjaan dingin untuk meningkatkan kekuatan setelah pendinginan dari proses pekerjaan panas seperti rolling atau ekstrusi dan untuk sifat mekanis yang telah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang.
- T3, *Solution heat-treated, cold work, and natural ageing* sampai kondisi temperatur ruang. T3 diberikan untuk produk yang mengalami pekerjaan dingin untuk meningkatkan kekuatan setelah *solution heat-treatment* dan untuk sifat mekanis yang telah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang.
- T4, *Solution heat-treated and natural ageing* sampai kondisi temperatur ruang. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami

pekerjaan dingin setelah solution heat-treatment dan untuk sifat mekanis yang telah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang.

- T5, didinginkan dari proses pembentukkan kenaikan temperatur dan *artificial aged*. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pengerjaan dingin setelah didinginkan dari proses pembentukkan dengan kenaikan suhu, seperti pencetakan dan ekstrusi, dan untuk sifat mekanis yang telah dikembangkan dengan *artificial ageing*.
- T6, *Solution Heat-Treated dan artifial aged*. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pendinginan setelah solution heat treatment dan untuk sifat mekanis, atau kestabilan dimensi, atau keduanya..
- T7, *Solution Heat-Treated and overaged or stabilized*. Penandaan ini diberikan pada produk *wrought* yang telah mengalami *artificial ageing* setelah *solution heat-treatment* di luar puncak kekuatan agar dihasilkan karakter spesial, seperti mempertinggi ketahanan terhadap korosi retak tegang atau pengelupasan. Penandaan ini juga diberikan pada produk cast yang telah mengalami *artificial ageing* setelah *solution heat treatment* untuk mendapatkan stabilitas kekuatan dan dimensional.
- T8, *Solution Heat-Treated, cold work, and artificial aged*. Penandaan ini diberikan pada produk yang mengalami pengerjaan dingin, setelah *solution heat-treatment*, yang secara spesifik untuk meningkatkan kekuatan dan untuk sifat mekanis, atau kestabilan dimensional, atau keduanya, yang substannya dikembangkan dengan *artificial ageing*.
- T9, *Solution Heat-Treated, artificial ageing, dan pekerjaan dingin*. Penandaan ini diberikan pada produk yang mengalami pekerjaan dingin setelah *artificial ageing* yang secara spesifik untuk meningkatkan kekuatan.
- T10, didinginkan dari proses pembentukkan kenaikan suhu, pekerjaan dingin, dan *artificial ageing*. Penandaan ini diberikan untuk produk yang mengalami pengerjaan dingin yang secara spesifik untuk meningkatkan kekuatan setelah proses pendinginan dari proses pembentukkan dengan

kenaikkan suhu, seperti rolling atau ekstrusi, dan untuk properti mekanis yang telah dikembangkan oleh *artificial ageing*.

### 2.9.2 Pengerasan Presipitasi

Pengerasan presipitasi adalah bentuk perlakuan panas yang paling umum pada paduan aluminium. Pengerasan presipitasi ini berprinsip pada pembentukan presipitat fasa kedua yang dapat mendistorsi kisi dari kristal aluminium. Distorsi kisi/*lattice distortion* (LD) inilah yang digunakan sebagai penghambat laju dislokasi. LD ini terjadi karena terjadinya SSSS (*Super Saturated Solid Solution*) akibat dari pendinginan cepat/*quenching*. Kondisi ini bersifat tidak stabil dan mendorong terbentuknya endapan. Endapan yang terbentuk diasumsikan memiliki struktur transisi metastabil yang koheren dengan kisi<sup>[20]</sup>, jadi kondisi tidak stabil tersebutlah yang membuat partikel-partikel fasa kedua berusaha untuk kembali mencapai keadaan setimbangnya/*equilibrium* dimana fasa kedua tersebut tidaklah larut dalam matriks aluminium.

Beberapa jenis paduan yang dapat dilakukan proses pengerasan presipitasi adalah sebagai berikut<sup>[23]</sup>:

- Al-Cu : Pembentukan endapan  $\text{CuAl}_2$
- Al-Cu-Mg : Mg berfungsi untuk memperbanyak endapan
- Al-Mg-Si : Pembentukan endapan  $\text{Mg}_2\text{Si}$
- Al-Zn-Mg : Pembentukan endapan  $\text{MgZn}_2$

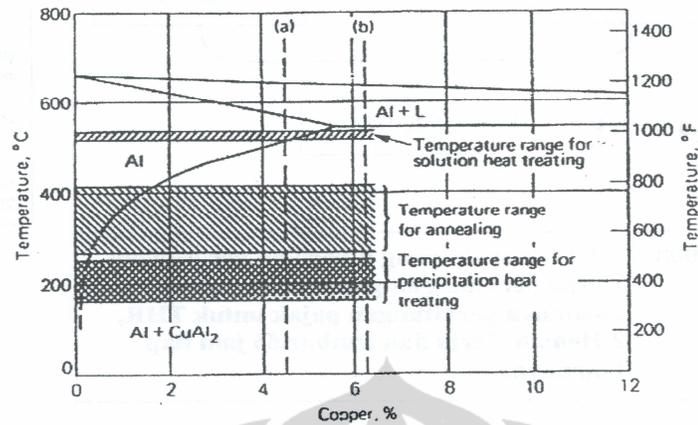
Untuk mendapatkan tingkat kekerasan yang diinginkan maka harus dilakukan kombinasi pemanasan, pendinginan, waktu, jenis, fraksi volume, ukuran, dan distribusi dari partikel presipitat yang dihasilkan. Ada beberapa syarat agar pengerasan presipitasi ini dapat terjadi:

- ▶ Adanya unsur yang dapat membentuk fasa kedua baik dengan aluminium ataupun dengan silikon
- ▶ Kelarutan yang cukup besar dari unsur tersebut di dalam aluminium
- ▶ Penurunan kelarutan yang signifikan seiring penurunan temperatur

### 2.9.3 *Solution Treatment*

Agar dapat membuat penguatan presipitasi terjadi, maka hal pertama yang harus dilakukan adalah membuat *solid solution* terlebih dahulu dan prosesnya dinamakan *solution treatment*. Proses ini bertujuan membawa unsur pembentuk presipitat ke batas kelarutan maksimumnya di dalam aluminium sesuai dengan diagram fasa yang ada sehingga tercapai fasa tunggal. Untuk mencapai batas kelarutan tersebut diperlukan temperatur yang tinggi dan waktu yang cukup agar terjadi homogenisasi<sup>[22]</sup>. Temperatur dan waktu *solution treatment* ini pada umumnya bervariasi tergantung dari banyak hal seperti banyak dan jenisnya unsur paduan, biaya, dan waktu yang tersedia. Tetapi dilihat dari diagram fasa, temperatur *solution treatment* ini berada tepat sebelum garis *solidus* mulai dan sebelum garis *solvus* berakhir atau mudahnya berada di bawah garis eutektik seperti pada Gambar 2.16. Proses *solution treatment* ini juga memberikan kontribusi kepada struktur yang tidak larut menjadi lebih *spheroid*<sup>[22]</sup>.

Hal-hal yang mungkin terjadi di dalam proses *solution treatment* ini adalah *overheating* dan juga *underheating*. *Overheating* terjadi apabila temperatur sudah melewati garis eutektik sehingga terdapat fasa *liquid*. Fasa *liquid* yang terjadi ini pada umumnya berawal dari batas butir karena memiliki tingkat energi yang tinggi akibat dari segregasi *impurities* yang menurunkan temperatur lebur. Akibat dari *overheating* ini adalah kerusakan struktur mikro akibat adanya porositas yang dapat menurunkan sifat mekanik. *Underheating* adalah temperatur *solution treatment* yang terlalu rendah sehingga tidak semua unsur penguat larut sempurna. Hal ini menyebabkan sedikitnya kuantitas dari partikel penguat yang akan terjadi sehingga kekuatan yang didapat tidak akan sesuai dengan yang diinginkan<sup>[22]</sup>.



**Gambar 2.16** Potongan diagram fasa Al-Cu yang menandakan daerah *solution treatment* dan *artificial ageing*<sup>[22]</sup>

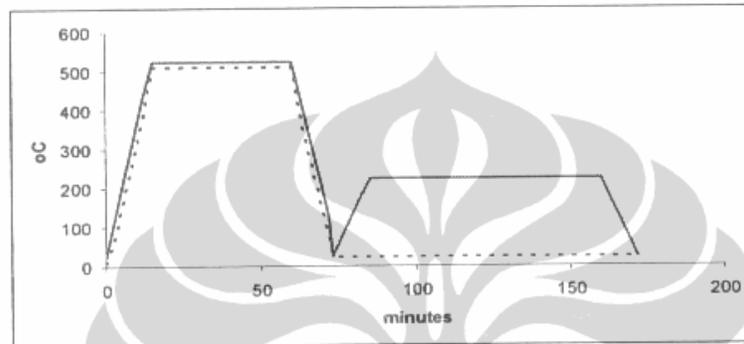
### 2.9.4 Quenching

Merupakan proses pendinginan cepat ke temperatur ruang agar *solid solution* yang terjadi pada proses *solution treatment* berubah menjadi SSSS. Proses ini bukan hanya mempertahankan atom-atom terlarut agar tetap berada dalam larutan tetapi juga memastikan bahwa ada suatu jumlah minimum dari kisi yang kosong agar dapat terjadi proses difusi pada temperatur rendah. Jika tidak ada proses *quenching*, maka atom-atom terlarut tersebut akan bermigrasi ke daerah yang tidak teratur sehingga tidak didapatkan kekuatan yang diinginkan. Parameter yang ada pada proses *quenching* ini adalah jeda waktu antara transportasi sampel menuju media *quenching* dan jenis dari media *quenching* tersebut<sup>[22]</sup>. Tetapi pada umumnya jeda waktu yang digunakan adalah secepat mungkin dan media *quenchnya* adalah air yang memiliki suhu temperatur ruang.

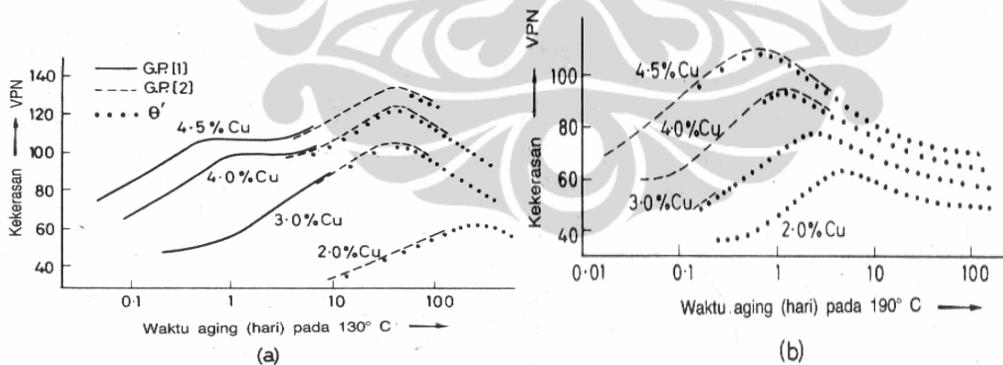
### 2.9.5 Ageing

Ada beberapa proses *ageing* pada paduan aluminium. Tetapi yang umum digunakan adalah T4 (*natural ageing*) dan T6 (*artificial ageing*), contoh siklus dari proses *ageing* ini dapat dilihat dari Gambar 2.17. Tujuan utama dari *ageing* ini adalah meningkatkan sifat mekanik. Pada T4 (*natural ageing*) proses *ageing* dilakukan tanpa alat apapun, jadi material aluminium dibiarkan begitu saja setelah proses *quenching* hingga mencapai puncak kekerasannya. Sedangkan pada T6

(*artificial ageing*), dilakukan peningkatan temperatur agar bisa mencapai puncak kekerasan lebih cepat. Pada umumnya, semakin tinggi temperatur yang diberikan, maka puncak kekerasan akan terjadi lebih cepat tetapi nilai kekerasannya tidak setinggi jika menggunakan temperatur yang lebih rendah seperti pada Gambar 2.18 <sup>[21]</sup>.



**Gambar 2.17** Contoh siklus *ageing*, garis lurus adalah T6 dan garis putus-putus adalah T4<sup>[22]</sup>

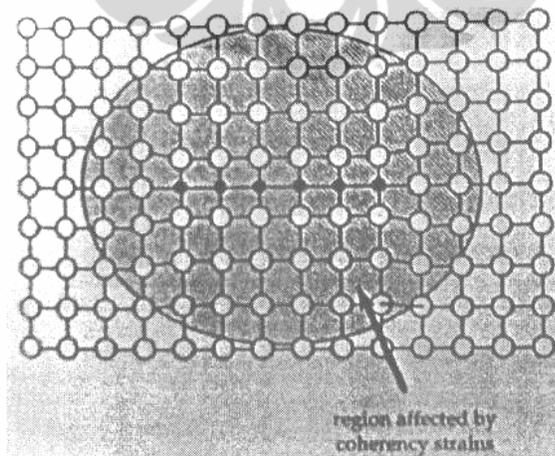


**Gambar 2.18** Pengaruh temperatur penuaan dengan kekerasan, temperatur penuaan lebih rendah (a) menghasilkan kekerasan lebih tinggi dari temperatur penuaan lebih tinggi (b) <sup>[21]</sup>

## 2.10 MEKANISME Pengerasan Presipitasi pada Paduan Al

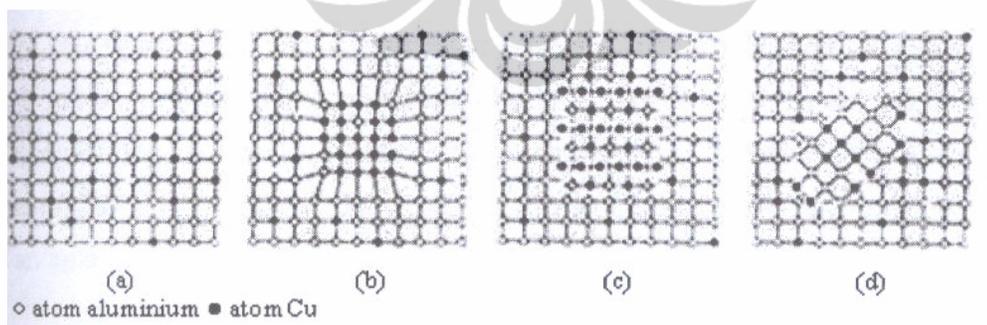
Persyaratan utama dalam pengerasan presipitasi dari SSSS adalah pembentukan dari presipitat yang terdispersi secara merata selama proses *ageing*. Proses *ageing* tersebut tidak hanya harus dilakukan di bawah kesetimbangan dari temperatur *solvus*, tetapi juga harus berada di bawah garis *solvus miscibility gap* metastabil dari *Guinier-Preston (GP) zones*. *Vacancy* yang super jenuh mengijinkan terjadinya difusi, maka dari itu pembentukan zone ini menjadi lebih cepat dibandingkan dengan kesetimbangan koefisien difusi. Selama proses presipitasi, SSSS akan membentuk area yang larut yang akan menjadi awal dari pembentukan *non-equilibrium precipitates*<sup>[22]</sup>.

Mekanisme penguatan dari presipitat melibatkan pembentukan *cluster* yang koheren dari atom-atom terlarut tetapi masih memiliki struktur kristal yang sama dengan matriks. Mekanisme ini menyebabkan terjadinya regangan karena perbedaan dari ukuran atom pelarut dengan atom terlarut. Area regangan dari matriks yang mengelilingi presipitat koheren inilah yang menghambat laju dari dislokasi sehingga kekuatan dan kekerasan material bertambah. Karakteristik yang menentukan derajat kekoherenan suatu presipitat adalah kemiripan antara jarak atom pada matriks dengan presipitat. Perubahan sifat ini terjadi sebagai akibat dari pembentukan daerah mikrostruktur yang kaya akan atom terlarut atau *GP zones*<sup>[22]</sup> seperti yang diperlihatkan Gambar 2.19.

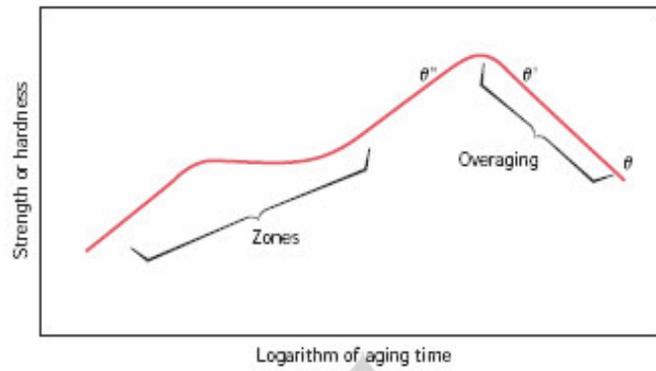


Gambar 2.19 Ilustrasi dari GP Zone<sup>[21]</sup>

Ukuran, bentuk, dan distribusi dari *GP zones* ini tergantung dari unsur paduannya, perlakuan panas dan mekanik sebelumnya. *GP zones* memiliki diameter ukuran hanya ratusan *angstrom* dan hanya dapat dilihat dengan menggunakan TEM. Dikarenakan sifatnya yang metastabil, maka proses *heat treatment* yang dilakukan haruslah optimum. Zona proses pengerasan presipitasi ini meliputi berbagai perubahan fasa, ukuran, bentuk, dan struktur. Transisi fasa yang terjadi merupakan akibat dari semakin tingginya difusi yang terjadi sehingga terjadi pembesaran ukuran zona yang memiliki struktur kristal sendiri. Perubahan fasa GP menuju  $\theta''$  membuat struktur kristal berubah menjadi tetragonal dan memiliki ukuran *cluster* lebih besar. Perubahan ini tidak mengubah derajat koherensi dari susunan atom sehingga kekerasan akan terus meningkat. Seiring dalam proses difusi menuju keadaan setimbang, terbentuklah fasa  $\theta'$  yang berasal dari  $\theta''$ . Fasa ini termasuk fasa semi koheren karena susunan dari atomnya sudah mulai berubah seperti pada Gambar 2.20. Fasa  $\theta'$  masih belum stabil sehingga akan berubah kembali menjadi fasa  $\theta$  yang stabil. Fasa  $\theta$  ini adalah  $\text{CuAl}_2$  yang memiliki struktur kristal BCT (*Body Centered Tetragonal*). Fasa ini sudah kehilangan koherensinya sehingga atom-atom terlarut kembali tersusun acak. Hilangnya koherensi berarti hilangnya distorsi kisi yang membuat *strain* pada kisi menghilang, akibatnya dislokasi kini dapat melaju dengan bebas kembali. Ilustrasi perubahan zona dapat dilihat pada Gambar 2.21.



**Gambar 2.20** Derajat koherensi pada presipitat Al-Cu. (a) acak, (b) koheren, (c) semi koheren, (d) inkoheren <sup>[7]</sup>



**Gambar 2.21** Perubahan zona yang terjadi selama proses *ageing*<sup>[24]</sup>

