

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 ALUMINIUM**

Aluminium merupakan material yang serbaguna dan secara umum mempunyai kemampuan untuk di cor yang paling baik. Paduan aluminium dapat digunakan pada metode pengecoran apapun.

Paduan aluminium tuang memiliki karakteristik yang mendukung untuk dilakukan proses pengecoran diantaranya mampu alir yang baik, titik lebur yang rendah, sifat mampu cor yang baik, berat jenis yang rendah, pertukaran panas yang cepat, stabilitas kimia yang cukup baik dan permukaan *as-cast* yang halus. Oleh karena itu, paduan aluminium banyak diaplikasikan pada dunia otomotif.

Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1809, aluminium termasuk unsur terbanyak yang terdapat di alam selain Si, O dan Fe, tetapi tidak pernah ditemukan dalam bentuk unsur murni (*native element*) di alam. Untuk meningkatkan kadarnya, dilakukan proses pemurnian yang disebut *Bayer Process*, dimana bauksit direduksi menjadi aluminium oksida, kemudian direduksi secara elektrolisis sehingga diperoleh aluminium murni, setelah itu baru diolah menjadi barang jadi sesuai dengan kebutuhan.<sup>[3]</sup>

##### **2.1.1 Sifat fisik dan mekanik Aluminium**

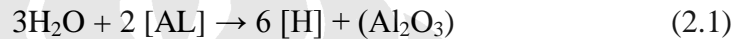
Beberapa keunggulan dari aluminium adalah sebagai berikut<sup>[4]</sup> :

- Ringan, berat jenis rendah ( $2,7 \text{ gr/cm}^3$ ), hanya 1/3 dari baja
- *Excellent Strength-to-weight ratio*
- Temperatur lebur rendah ( $660^\circ\text{C}$ ), peralatan peleburan sederhana
- Sifat mampu cor sangat baik, terutama di dekat komposisi Eutektik
- Sifat mampu mesin (*machinability*) baik

- Surface finish, baik
- Ketahanan korosi baik
- Konduktor panas dan listrik yang baik
- Mudah dipadu (*alloying*) dengan unsur lain

Sedangkan kelemahan aluminium adalah sebagai berikut:

- Memiliki berat jenis yang rendah, sehingga mudah tercampur dengan pengotor (*dross*) oksida, seperti  $Al_2O_3$  yang berat jenisnya (2.1 gr/mm<sup>3</sup>) hampir sama dengan aluminium cair (2.3 gr/mm<sup>3</sup>)
- Sangat mudah mengikat gas Hidrogen dalam kondisi cair



Jadi sebaiknya menggunakan degasser atau GBF (*Gas Bubble Flootation = Argon Treatment*)

- Mengalami penyusutan (*Shrinkage*) yang cukup Tinggi 3.5 – 8.5 % (rata-rata 6 %)

Karakteristik dari aluminium dan paduannya secara umum dapat dilihat pada tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Karakteristik aluminium dan paduannya secara umum

Karakteristik	Nilai
Kekuatan tarik	70-505 MPa
Kekuatan luluh	20-455 MPa
Elongasi	1-30%
Kekeerasan	30-150 HB
Modulus elastisitas	65-80 GPa
Kekuatan geser	42-325 MPa
Berat jenis	2.57-2.95 gr/cm <sup>3</sup>
Batas kekuatan fatik	55-145 MPa
Konduktifitas panas	85-175 W/m.K pada 25 <sup>0</sup> C
Koefisien ekspansi panas linear	17.6-24.7 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Konduktifitas listrik	18-60% IACS

Sifat fisik dan mekanik aluminium castings dapat dirubah dengan cara<sup>[5]</sup>:

- *Komposisi paduan*: komposisi paduan menentukan sifat fisik dan mekanik spesifik yang akan dihasilkan. Kandungan paduan didisain untuk menghasilkan karakteristik-karakteristik yang meliputi *castability* sesuai performa yang akan dihasilkan. Interaksi unsur paduan dapat dikenali melalui fasa mikrostruktur yang terbentuk dan pengaruh *solid-solution* untuk mengembangkan sifat-sifatnya.
- *Kecepatan pendinginan selama dan setelah proses pembekuan*: kondisi selama proses pembekuan menentukan ciri-ciri struktur mikro yang mempengaruhi sifat fisik dan mekanik suatu paduan.
- *Proses pengecoran*: terdapat berbagai macam proses pengecoran, dimana masing-masing proses memiliki perbedaan kecepatan ekstraksi panas, kecepatan pembekuan yang mempengaruhi proses pembekuan yang berhubungan dengan kecenderungan terhadap struktur mikro dan makro.
- *Pembekuan*: proses pengecoran sangat rentan terhadap cacat internal dan permukaan. Bentuk hasil coran dengan geometri yang kompleks, fluida yang dinamis, dan mekanika proses pembekuan berkombinasi mempengaruhi kepadatan dan diskontinuitas hasil coran. Porositas internal dapat diakibatkan dari shrinkage dan porositas hidrogen, sebaik cacat yang dapat terlihat seperti misruns, cracks, reaksi dengan *moisture*, *folds*, dan *tears*. Inklusi *nonmetallic* mempengaruhi sifat mekanik dan nukleasi pembentukan hidrogen *pore*. Fraksi volume pore serta geometri dan distribusinya menurunkan *tensile properties*, kekuatan *fatigue*, ketangguhan, dan *ductility*, sementara cacat permukaan sangat mempengaruhi mekanik dan *fatigue performance*.
- *Perlakuan panas*: sifat mekanik dapat dirubah dengan melakukan perlakuan panas setelah proses pembekuan, meliputi *annealing*, *solution heat treatment*, dan *precipitation aging*.
- *Postsolidification densification*: *hot isostatis pressing* (HIP) dapat meningkatkan tingkat *internal soundness*, *tensile properties*, *ductility*, dan performa fatik.

### 2.1.2 Pengelompokan Komposisi Aluminium

Walaupun terdapat banyak paduan aluminium yang telah dikembangkan, terdapat 7 keluarga dasar paduan aluminium hasil coran<sup>[5]</sup>:

- *Aluminum-copper* (2xxx)
- *Aluminum-silicon-copper* (3xxx)
- *Aluminum-silicon* (4xxx)
- *Aluminum-silicon-magnesium* (3xxx)
- *Aluminum-magnesium* (5xxx)
- *Aluminum-zinc-magnesium* (7xxx)
- *Aluminum-tin* (8xxx)

Penandaan huruf pada penamaan paduan aluminium hasil coran terhadap perlakuan panas:

- F : *as-fabricated*
- O : *Annealed*
- H : *Strain hardened*
- T : *Heat treated*
- T4 : *Solution treated*
- T6 : *Solution treated dan aged*

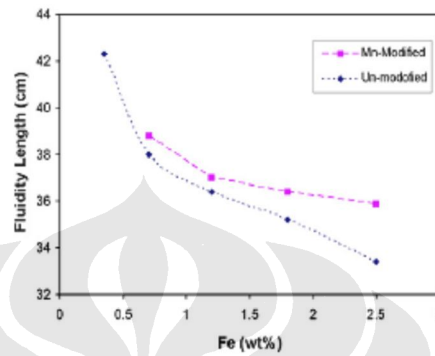
### 2.1.3 Pengaruh Unsur Paduan Aluminium

Unsur-unsur paduan ditambahkan untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis dari aluminium, seperti kekuatan, keuletan, mampu permesinan, dan lain-lain sesuai kebutuhan.<sup>[4]</sup> Unsur-unsur yang ditambahkan kedalam aluminium pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 2.1.3.4 Besi (Fe)

Unsur Fe termasuk unsur pengotor di aluminium. Fe memiliki kelarutan yang rendah didalam aluminium cair (0.05%). Penambahan unsur ini dapat meningkatkan ketahanan terhadap *hot-tear*. Namun jika kadar Fe berlebih > 0.05% akan menurunkan keuletan (*ductility*). Fe juga memberikan kecenderungan penempelan atau persambungan (efek *soldering*) dengan cetakan pada *die casting*.

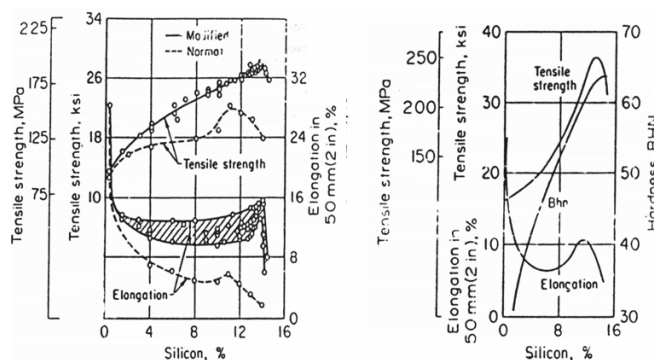
Bila kadar Fe mencapai  $> 0.05\%$ , akan membentuk fasa-fasa intermetalik tidak terlarut (*insoluble*) seperti  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{FeMnAl}_6$ ,  $\alpha\text{-AlFeSi}$  atau  $\beta\text{-AlFeSi}$ . Terbentuknya fasa ini berpengaruh pada peningkatan kekuatan khususnya pada temperatur tinggi serta mengurangi *flowability* dan fluiditas dan juga meningkatkan *embrittlement* pada struktur mikronya.<sup>[5][4]</sup>



**Gambar 2.1** Pengaruh Penambahan Fe terhadap Nilai Fluiditas Paduan 413 yang dimodifikasi dengan Mn dan tidak dimodifikasi.<sup>[6]</sup>

### 2.1.3.5 Silikon (Si)

Penambahan silikon dapat meningkatkan karakteristik casting seperti *castability (fluidity)* terutama jika  $\text{Si} = 5\text{-}13\%$ . Si juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap retak panas (*hot tear*), dan karakteristik *feeding*. Silikon berkombinasi dengan magnesium membentuk  $\text{Mg}_2\text{Si}$  yang *heat treatable*. Silikon berkombinasi dengan besi dan unsur lainnya membentuk fasa kompleks tak terlarut. Silikon juga menurunkan *specific gravity* dan koefisien ekspansi panas<sup>[5]</sup>. Si dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan, menurunkan berat jenis, dan bila  $\text{Si} > 12\%$  akan terbentuk kristal “*Primary Si*” yang keras, yang menyebabkan ekspansi termal menurun, *machinability* kurang baik, ketahanan aus baik (cocok untuk aplikasi temperatur tinggi = piston).<sup>[4]</sup>

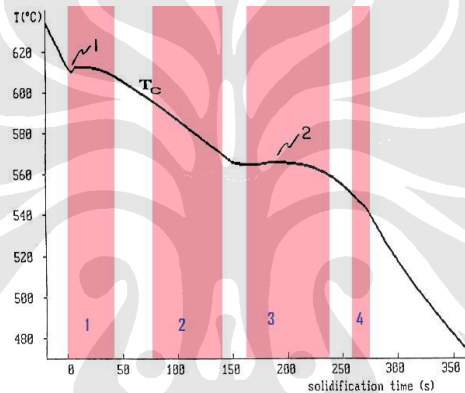


**Gambar 2.2** Pengaruh Si terhadap Aluminium.<sup>[4]</sup>

### 2.1.3.6 Stronsium (Sr)

Stronsium memodifikasi eutektik aluminium-silikon. Modifikasi yang efektif dapat tercapai ketika penambahannya sangat rendah, biasanya 0,008 – 0,04% Sr. Kosentrasi yang rendah akan sangat efektif bila diikuti kecepatan pembekuan yang tinggi. Penambahan *modifier* yang banyak akan mengakibatkan cacat *casting porosity*. Degassing dapat juga merugikan pengaruh modifikasi ketika kadar stronsium yang ditambahkan tinggi. Sebagai *modifier*, stronsium tidak efektif digunakan saat kecepatan pembekuan yang rendah. [5]

### 2.1.4 Proses Pembekuan dan Pembentukan Fasa pada Aluminium



**Gambar 2.3** Kurva pendinginan pada paduan aluminium 356 [2]

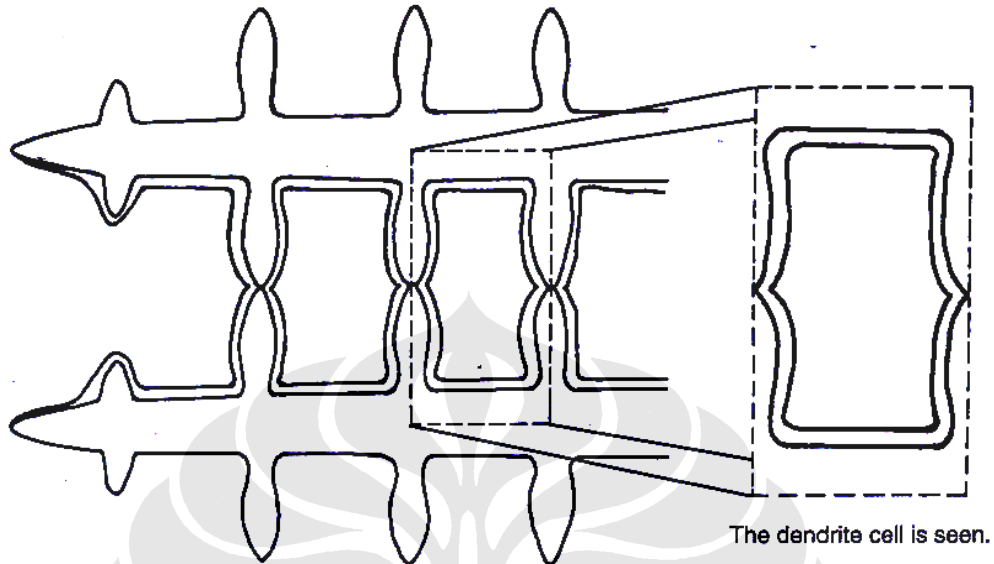
Gambar diatas menunjukkan hubungan antara temperatur dengan waktu pada kurva proses pembekuan dari paduan aluminium 356. titik 1 menunjukkan awal dari proses pembekuan, yaitu dimana terjadi pertumbuhan dari jaringan dendrit. Sedangkan titik 2, terjadi reaksi eutektik utama dimana presipitasi aluminium, silikon, dan partikel yang mengandung iron-manganese terjadi. [2]

**Tabel 2.2** Reaksi yang terjadi selama proses pembekuan. [2]

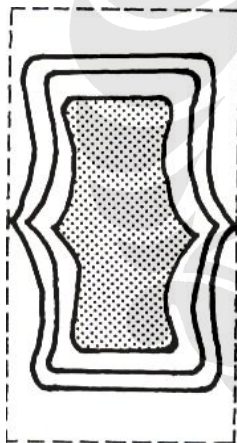
Reaksi No.	Reaksi
1	Pembentukan jaringan dendrit
2a	Liquid $\rightarrow$ Al + $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$
2b	Liquid $\rightarrow$ Al + $Al_5FeSi$
3a	Liquid $\rightarrow$ Al + Si + $Al_5FeSi$
3b	Liquid + $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2 \rightarrow$ Al + Si + $Al_5FeSi$
4	Liquid $\rightarrow$ Al + Si + $Mg_2Si$
5*	Liquid $\rightarrow$ Al + Si + $Mg_2Si$ + $Al_8FeMg_3Si_6$

\* terdeteksi hanya pada kecepatan pendinginan yang tinggi

Pembentukan fasa yang dapat menentukan hasil akhir struktur mikro paduan aluminium terjadi selama proses pembekuan. Gambar berikut memberikan ilustrasi pembentukan fasa yang terjadi saat proses pembekuan berlangsung.



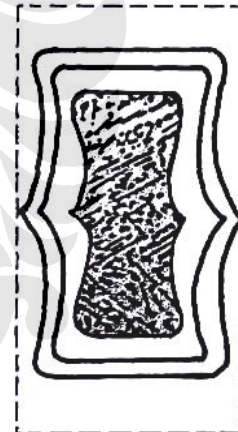
**Gambar 2.4** Model geometri pembentukan sel dendrit<sup>[7]</sup>



**Gambar 2.5** Penebalan dinding sel dendrit<sup>[7]</sup>



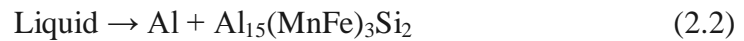
**Gambar 2.6** Pembentukan fasa intermetalik yang tersebar dalam liquid yang tertutup<sup>[7]</sup>



**Gambar 2.7** Presipitasi struktur eutektik Al-Si saat undercooling<sup>[7]</sup>

Setelah dendrite telah menjadi cukup koheren, sel interdendritik akan terbentuk (gambar 2.4). Pengkasaran jaringan dendrit diikuti dengan meningkatnya kekuatan geser, dan peningkatan ketebalan dinding sel interdendritik (gambar 2.5). Atom-atom terlarut menjadi terkonsentrasi pada liquid

yang telah terjebak dalam sel interdendritik dan dapat terjadi pembentukan fasa baru intermetalik sampai konsentrasi dan temperatur tertentu tercapai, contohnya:<sup>[7]</sup>



Fasa yang terbentuk dapat tersebar pada liquid yang tertutup dan melepaskan panas latent, dengan tidak mempengaruhi kekuatan dari jaringan dendritnya. Setelah presipitasi fasa intermetalik pre-eutektik terjadi, berikutnya paduan akan mengalami undercooling sebelum terjadi reaksi eutektik karena terjadinya kesulitan dalam nukleasi kristal silikon. Selama pembentukan kristal eutektik silikon, pertumbuhan silikon memiliki dua kontribusi. Pertama, pelepasan panas latent dari nukleasi dan pertumbuhan silikon pada *undercooled melt* mengakibatkan terjadinya pemanasan kembali (*recalescence*). Dan seiring waktu, struktur eutektik berkontribusi dalam meningkatkan kekuatan geser material semisolid.<sup>[7]</sup>

Modifikasi struktur silikon eutektik selama proses solidifikasi dapat mempengaruhi peningkatan kekuatan dalam berbagai cara. Penambahan unsur modifier dapat:

1. mempengaruhi ukuran dan persebaran butir
2. mempengaruhi tingkat undercooling sebelum reaksi eutektik dimulai
3. merubah morfologi pertumbuhan struktur silikon

Oleh karena itu, sangat penting untuk mengetahui dan mengatur tingkat modifikasi yang diberikan sehingga dapat dihasilkan material yang diinginkan.<sup>[7]</sup>

### **2.1.5 Pengaruh Struktur Mikro terhadap Sifat Mekanis Aluminium**

Penampakan struktur mikro merupakan produk dari metal chemistry dan kondisi pembekuannya. Penampakan struktur mikro, tidak termasuk cacat-cacat, yang memiliki pengaruh sangat kuat terhadap sifat mekanik adalah sebagai berikut:<sup>[5]</sup>

- Ukuran, bentuk, dan distribusi fasa intermetalik
- Dendrite arm spacing
- Ukuran dan bentukbutir
- Modifikasi eutektik dan penghalusan fasa primer



## 2.2 PADUAN ALUMINIUM SILIKON

Paduan dengan menggunakan unsur silikon sebagai unsur pokok merupakan paduan komersil yang paling penting, karena karakteristik superior castingnya. Paduan aluminium-silikon biner (443.0, 444.0, 413.0, dan A413.0) memiliki karakteristik *low-density*, *weldable*, dan tahan terhadap korosi. [5]

Paduan 443.0 digunakan sebagai komponen dimana kekuatannya kurang penting daripada keuletan, tahan korosi, dan *pressure tightness*. Paduan cetakan permanen 444.0 dan A444.0 memiliki keuletan yang tinggi dan digunakan untuk pertimbangan ketahanan impact. Paduan 413.0 dan A413.0 hampir mendekati komposisi eutektik, hasilnya, paduan ini memiliki sifat fluiditas yang sangat baik. [5]

Gambaran aplikasi dari paduan aluminium-silikon ini adalah: [5]

- Panel arsitektural
- Rumah lampu outdoor
- Deck mesin pemotong rumput halaman
- Alat panggangan outdoor
- Komponen kapal laut
- Alat masak rumah tangga
- Alat yang digunakan dalam pemrosesan makanan, susu, dan minuman
- Peralatan kedokteran dan kedokteran gigi
- Bingkai dan komponen electronic cabinet
- Tire mold
- Alat eskalator dan moving side walk
- Highway railing posts

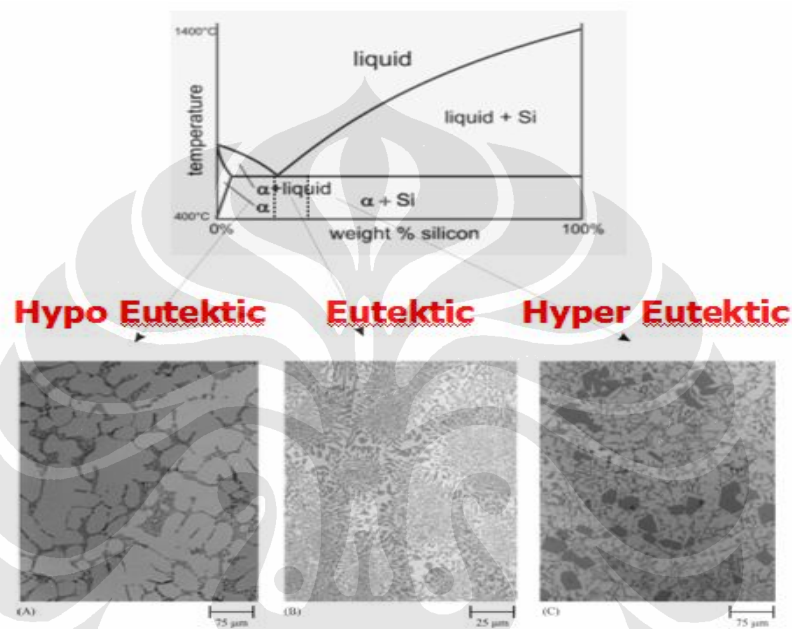
Paduan aluminium silikon yang lebih kompleks telah dikembangkan untuk dijadikan mesin fuel-efficient yang beroperasi pada temperatur tinggi. Beberapa paduan dapat menahan yield strength sampai diatas 10 ksi (70 Mpa) pada temperatur lebih dari 500°F (260°C). [5]

### 2.2.1 Pengaturan fasa silikon

Kelompok paduan aluminium foundry dominan yang banyak digunakan adalah kelompok aluminium-silikon. Paduan aluminium dengan kadar silikon 5-

20% adalah yang paling sering digunakan. Ciri-ciri karakteristik paduan ini adalah paduan ini terdiri dari fasa primer (aluminium atau silikon) dan campuran eutektik dari kedua unsur tersebut.

Komposisi eutektik mendekati 12% Si. Dibawah kadar ini, disebut paduan hipoeutektik, dimana fasa primernya adalah presipitat aluminium berbentuk dendrit yang terbentuk dari liquid. Diatas kadar ini, disebut paduan hipereutektik, dimana fasa silikon primer terbentuk dari liquid saat pendinginan.

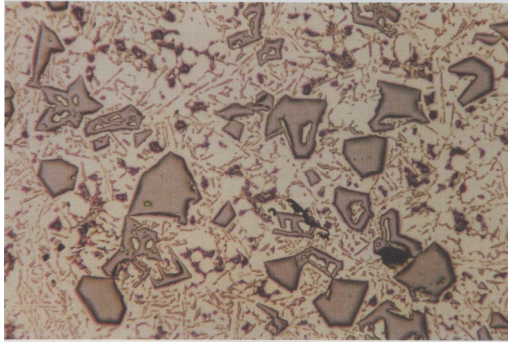


Gambar 2.8 Diagram Fasa Biner Aluminium-Silikon<sup>[4]</sup>

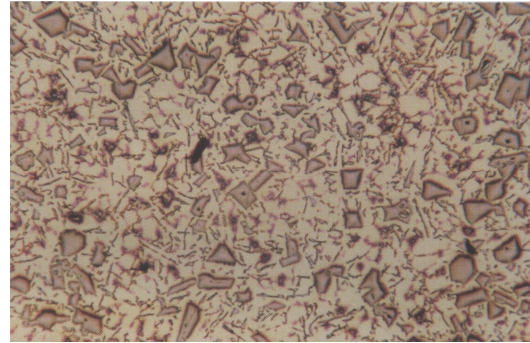
### 2.2.3 Refinement primary silicon

Jumlah dan ukuran dari fasa silikon primer pada paduan hipereutektik dapat diatur dengan penambahan unsur yang memudahkan terjadinya nukleasi kristal silikon. Salah satu *substrates* yang paling efisien untuk nukleasi silikon adalah senyawa AIP (Aluminium Phosphide), dimana sudah ada terdapat paduan aluminium-silikon secara alami. Untuk meningkatkan pengaruh nukleasi tersebut, biasanya penambahan sejumlah phosphor dilakukan sebelum *casting*, sehingga jumlah partikel AIP meningkat

Gambar dibawah ini menunjukkan ukuran partikel fasa silikon sebelum dan setelah penambahan 0,03% P pada paduan aluminium 390 yang mengandung 15% Si dan 3% Cu.



**Gambar 2.9** Partikel silikon paduan 390 (~15% Si), *unetched*, 56X<sup>[2]</sup>



**Gambar 2.10** Partikel silikon paduan 390 (~15% Si) setelah penambahan 0,03% P, *unetched*, 56X<sup>[2]</sup>

### 2.3 PADUAN ALUMINIUM BESI SILIKON (Al-Fe-Si)

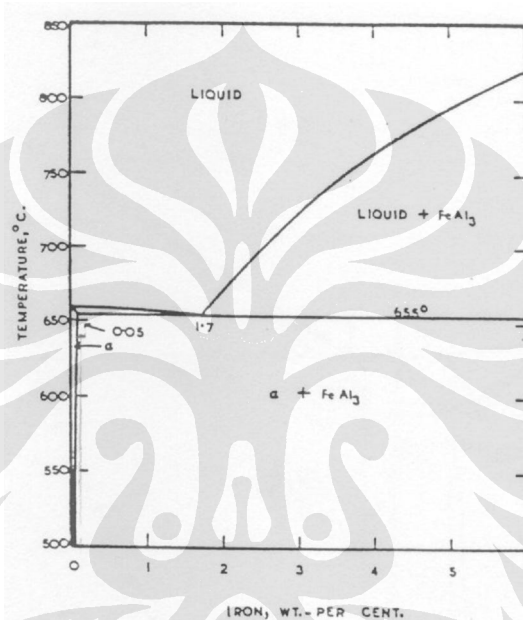
Pada aluminium, unsur besi dan silikon merupakan pengotor yang paling umum ditemukan pada paduan aluminium karena memiliki kelarutan yang rendah selama proses solidifikasi. Besi membentuk senyawa intermetalik kompleks dengan aluminium, silikon, mangan, dan kromium. Selama proses *casting* pada paduan aluminium, fasa intermetalik dapat terpresipitasi dengan jumlah yang banyak, tergantung kondisi solidifikasinya dan paduan kimianya.

Besi merupakan suatu pengotor umum pada aluminium dan paduannya yang tidak dapat dihilangkan dan dapat merugikan sifat *ductility* dan *castability*, khususnya paduan berbasis Al-Si. Namun unsur besi tidak selalu memberikan pengaruh negatif, pada beberapa paduan aluminium *wrought* (yang digunakan dalam bentuk *forged*, *extruded* atau *rolled*), besi dapat dengan sengaja ditambahkan sebagai paduan untuk meningkatkan kemampuan-prosesan paduan dan/atau kekuatan pada produk *wrought* akhir.<sup>[1]</sup>

#### 2.3.1 Sumber Fe dalam Aluminium

Besi dapat larut selama manufaktur aluminium primer melalui proses bayer yang mengkonversi bauksite (*ore*) menjadi alumina (*feedstock*) dan proses reduksi elektrolitik Hall-Heroult yang mengkonversi alumina menjadi aluminium cair (>900°C). Dengan bergantung pada kualitas *ore* dan pengaturan bermacam-macam parameter proses, aluminium primer cair biasanya mengandung kadar besi antara 0,03-0,15wt%. Besi dapat larut kedalam aluminium melalui dua mekanisme, yaitu:<sup>[1]</sup>

1. Liquid aluminium dapat melarutkan besi dari peralatan baja yang tidak terproteksi dan peralatan furnace dalam jangka waktu yang cukup lama. Kadar Fe dapat mencapai 2wt% pada temperatur melt normal  $\sim 700^{\circ}\text{C}$  (eutektik Al-Fe ada pada 1,7wt% Fe dan  $655^{\circ}\text{C}$ ). Sedangkan untuk melt yang ditahan pada  $800^{\circ}\text{C}$ , kadar Fe dapat mencapai diatas 5%.
2. Besi juga dapat larut kedalam aluminium cair dengan penambahan material paduan (*master alloy*) dengan kemurnian yang rendah, seperti Si, atau melalui penambahan *scrap* yang mengandung kadar Fe yang tinggi.

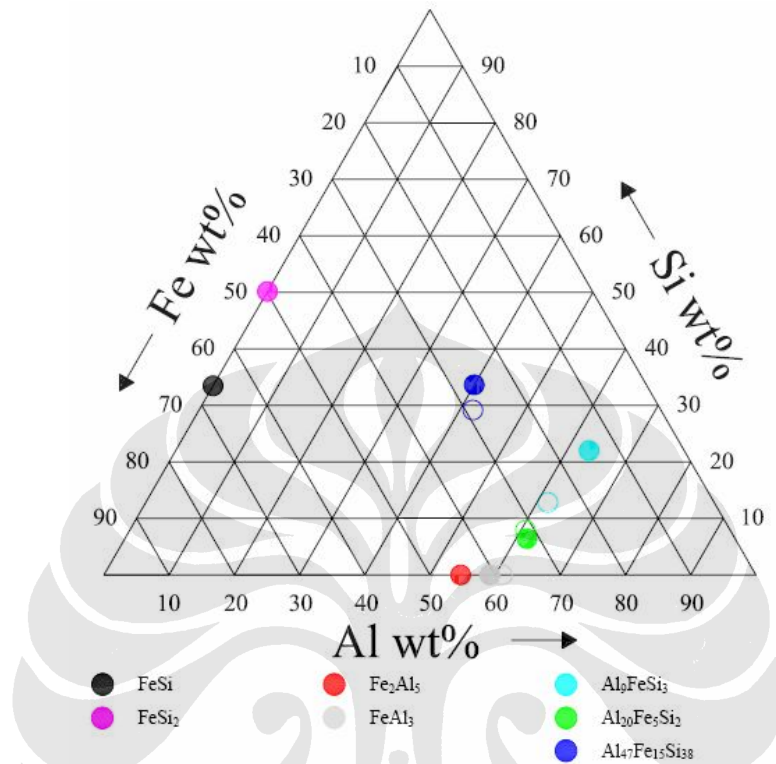


**Gambar 2.11** Diagram fasa kesetimbangan Al-Fe<sup>[1]</sup>

### 2.3.2 Fasa Intermetalik

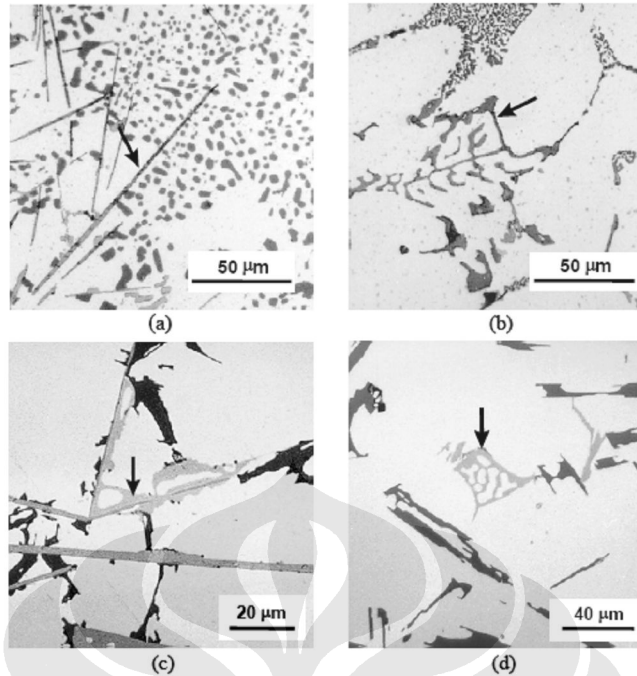
Walaupun besi sangat mudah larut dalam *liquid* aluminium dan paduannya, besi memiliki daya larut yang sangat rendah dalam *solid* aluminium. Oleh karena itu, besi cenderung untuk berkombinasi dengan unsur-unsur lain untuk membentuk fasa intermetalik. Dengan ketidakhadiran Si, fasa dominan yang terbentuk adalah  $\text{Al}_3\text{Fe}$  dan  $\text{Al}_6\text{Fe}$ , tetapi dengan keberadaan Si, fasa dominan yang terbentuk adalah  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  (yang diketahui sebagai fasa  $\alpha$ ) dan  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  (yang diketahui sebagai fasa  $\beta$ ). Jika Mg juga hadir bersama Si, fasa  $\pi$  akan terbentuk,  $\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$ . Fasa umum lain yang akan terbentuk dengan kehadiran Mn bersama Si adalah  $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ , yang juga diketahui sebagai fasa  $\alpha$ .<sup>[1]</sup>

Diagram fasa dibawah ini menunjukkan posisi daerah-daerah untuk bermacam-macam tipe fasa intermetalik stabil yang berbeda-beda yang dapat terbentuk pada paduan Al-Fe-Si. <sup>[8]</sup>



**Gambar 2.12** Diagram Fasa ternary AlFeSi dengan beberapa fasa intermetalik yang terdeteksi hasil pengujian menggunakan XRD <sup>[8]</sup>

Fasa-fasa intermetalik yang mengandung Fe dapat dibedakan berdasarkan bentuk dominan (morfologi) dan warna saat diteliti menggunakan mikroskop. Fasa  $\alpha$  terbentuk dalam morfologi seperti *script*, tetapi fasa  $\alpha$  versi Al<sub>15</sub>(Fe.Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> terlihat lebih padat dan *blocky*. Fasa  $\pi$  juga berbentuk seperti morfologi *script* dan sering kali tapi tidak selalu, berhubungan dengan fasa  $\beta$  yang berbentuk morfologi *platelets*. Walaupun fasa  $\beta$  terlihat dalam tiga dimensi berbentuk platelet, namun saat diteliti dalam gambar atau foto dua dimensi akan nampak dalam bentuk jarum. Perbedaan bentuk dari intermetalik besi pada suatu komponen dapat mempengaruhi *castability* dan sifat mekaniknya. <sup>[1]</sup>



**Gambar 2.13** Hasil foto mikro dari beberapa morfologi fasa intermetalik yang mengandung Fe pada paduan Al-5%Si-1%Cu-0,5%Mg-(Fe): (a) *platelets*  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi; (b) *script*  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si; (c) fasa  $\pi$  yang tumbuh dari  $\beta$ ; (d) *script* fasa  $\pi$ <sup>[1]</sup>

**Tabel 2.3** Beberapa fasa intermetalik pada paduan Al-Si dengan komposisi kimianya<sup>[9]</sup>

Fasa	Komposisi kimia (wt%)
Al <sub>13</sub> Fe <sub>4</sub> (Al <sub>3</sub> Fe)	Fe: 33,9-37,8; Si: 0,8-2,9
Al <sub>6</sub> Fe	Fe: 25,6-28,0
$\beta$ -Al <sub>5</sub> FeSi	Fe: 23,5-30,0; Si: 12,0-18,9
$\beta$ -Al <sub>4,5</sub> FeSi (Al <sub>9</sub> Fe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> )	Fe: 27,0-28,0; Si: 14,0-15,0
$\gamma$ -Al <sub>3</sub> FeSi	Fe: 33,0-38,0; Si: 13,0-18,9
$\delta$ -Al <sub>9</sub> FeSi <sub>3</sub>	Fe: 15,0-25,4; Si: 20,0-25,5
$\alpha$ -Al <sub>8</sub> Fe <sub>2</sub> Si	Fe: 28,2-31,6; Si: 7,9-10,5
Al <sub>9</sub> Fe <sub>0,84</sub> Mn <sub>2,16</sub> Si	Fe: 10,7; Si: 6,44; Mn: 13,0-16,0
$\pi$ -Al <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> Mg <sub>3</sub> Fe	Fe: 8,0; Si: 25,0-33,8; Mg: 13,0-16,0
$\alpha$ -Al <sub>12-15</sub> (Fe,Mn,Me) <sub>3</sub> Si <sub>1-2</sub>	Fe: 8,6-30,7; Si: 4,5-12,5; Mn: 0,52-14,0
Me=(Cr,Cu)	Cu: dari 7,5; Cr: sampai 14,4
$\alpha$ -Al <sub>12-15</sub> (Fe,Me) <sub>2-3</sub> Si <sub>2-4</sub>	Fe: 6,3-25,2; Si: 4,6-10,0; Mn: sampai 13,1;
Me=(Mn,Cr,Cu,Co,Ni)	Cu: sampai 13,0; Cr: sampai 14,4;
	Co: sampai 20,1; Ni: sampai 26,8
Al <sub>19</sub> Fe <sub>4</sub> MnSi <sub>2</sub>	Fe: 19,2; Si: 8,3; Mn: 7,8; Cu: 2,5; Cr: 0,2

### 2.3.2.1 Fasa Intermetalik $\alpha$ -AlFeSi dan $\beta$ -AlFeSi

Fasa  $\alpha$ -AlFeSi memiliki komposisi kimia  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  (32-36% Fe, 6-9,5% Si), sedangkan fasa  $\beta$ -AlFeSi komposisi kimianya adalah  $\text{Al}_5\text{FeSi}$  (27-28% Fe, 14-16% Si).<sup>[10]</sup>

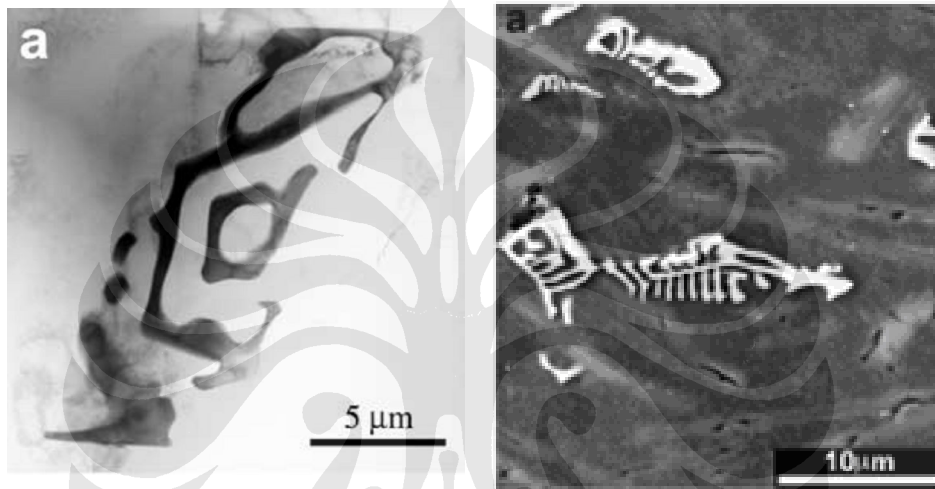
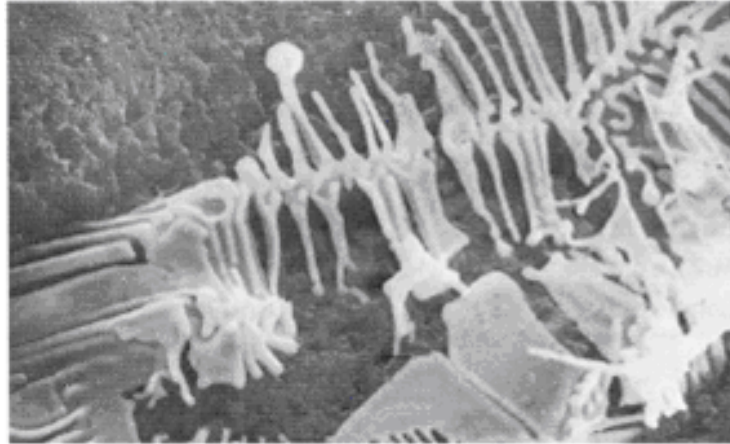
Fasa  $\alpha$ -AlFeSi memiliki struktur heksagonal dengan paramter  $a=12,3 \text{ \AA}$ ;  $c= 26,3 \text{ \AA}$ , massa jenis  $3,58 \text{ g/cm}^3$ , dan terlihat dalam bentuk partikel *chinese script*. Fasa  $\beta$ -AlFeSi memiliki struktur monoklinik dengan parameter  $a=b= 6,12 \text{ \AA}$ ;  $c= 41,5 \text{ \AA}$ ;  $A= 91^\circ$ , massa jenis  $3,30\text{-}3,35 \text{ g/cm}^3$ , dan terlihat dalam bentuk *platelets*.<sup>[11]</sup>

Fasa  $\alpha$ -AlFeSi dan  $\beta$ -AlFeSi memiliki mode pertumbuhan yang berbeda. Mulazimoglu telah mempelajari fasa intermetalik pada paduan aluminium 6021 dengan menggunakan *transmission electron microscopy* (TEM) dengan perbesaran yang tinggi. Dia menunjukkan bahwa fasa fasa  $\alpha$ -AlFeSi ( $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ ) memiliki *nonfaceted interface* dengan matriks aluminium, sehingga memiliki ikatan yang baik dengan matriks aluminium. Sedangkan fasa  $\beta$ -AlFeSi, berbentuk sangat runcing dan sangat bersegi.<sup>[12]</sup>

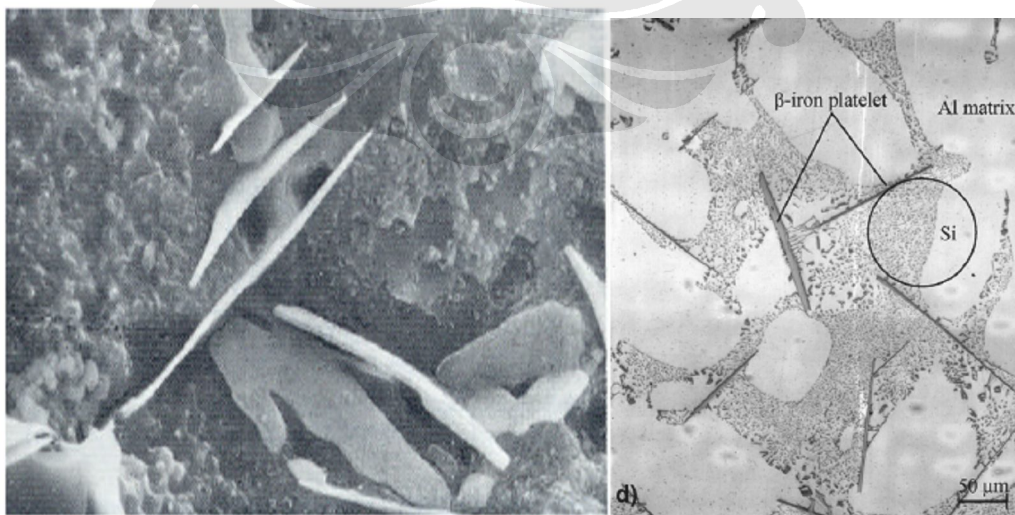
**Tabel 2.4** Beberapa jenis fasa intermetalik  $\alpha$ -AlFeSi dan  $\beta$ -AlFeSi.<sup>[13]</sup>

Phase	Structure	a (nm)	b	c	notes
<i>Alpha</i>					
$\text{Al}_{19}\text{Fe}_4\text{MnSi}$	cubic	1.256			representative of the dendritic phase in the <i>present work</i>
$\text{Al}_{12}\text{Mn}_3\text{Si}$	cubic	1.2625			dendritic, Chinese script
$\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$	cubic	1.2523			Chinese script
$\alpha\text{-Al(Fe,Mn)Si}$	cubic	1.266			
$\alpha\text{-AlFeSi}$	cubic	1.256			metastable, stabilized by Mn
$\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_5\text{Si}_2$	cubic	1.25			
$\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$	hexagonal	1.23		2.63	
<i>Beta</i>					
$\text{Al}_3\text{FeSi}_2$	tetragonal	0.607		0.95	representative of <i>plate-shaped phase</i> in the <i>present work</i>
$\text{Al}_4\text{FeSi}_2$	tetragonal	0.612		0.948	
$\text{Al}_4\text{FeSi}_3$	tetragonal	0.611		0.946	t-AlFeSi, thick tetragonal blades
$\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$	monoclinic	0.611		4.14	m-AlFeSi, tetragonal blades, $\alpha_2=91^\circ$
$\beta\text{-Al}_{15}\text{FeSi}$	monoclinic	0.5792	1.2273	4.313	$\beta=98,93^\circ$
$\text{Al}_{15}\text{FeSi}$	monoclinic	0.612		4.15	thin plates
$\beta\text{-Al}_{4,5}\text{FeSi}$	monoclinic	0.6161	0.6175	2.081	square platelets, $\beta=91^\circ$
$\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$	orthorombic	0.618	0.620	2.08	in conjunction with a tetragonal phase
$\text{Fe}_2\text{SiAl}_5$	orthorombic	0.6184	0.625	2.069	



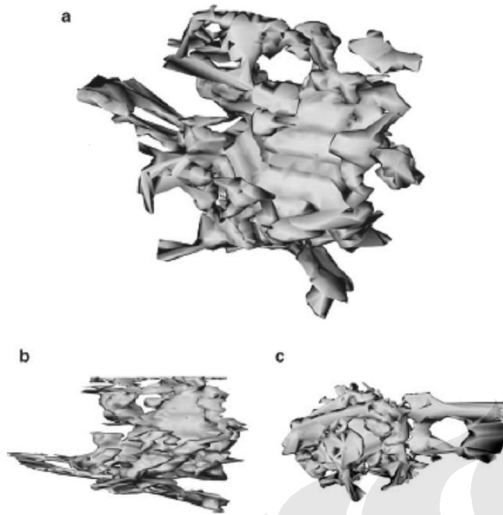


**Gambar 2.14** *Deepetches* partikel  $\alpha$ -AlFeSi pada 99,95% Al, 0,5%Fe dan 0,2%Si (kecepatan pendinginan antara 2 K/s dan 11 K/s) dan Gambar TEM yang menunjukkan “chinese script”<sup>[8][13]</sup>

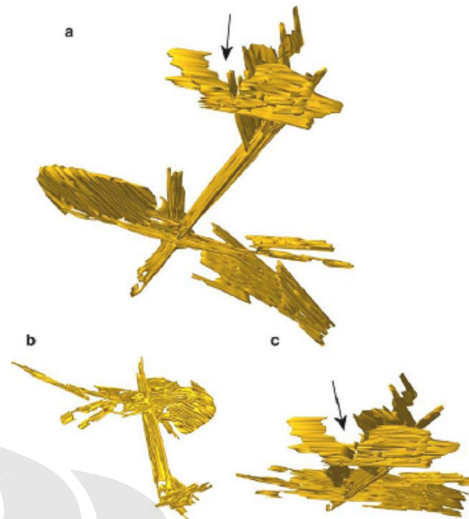


**Gambar 2.15** *Deepetches*  $\beta$ -AlFeSi pada paduan aluminium 1% Si and 0.5% Fe<sup>[8]</sup>

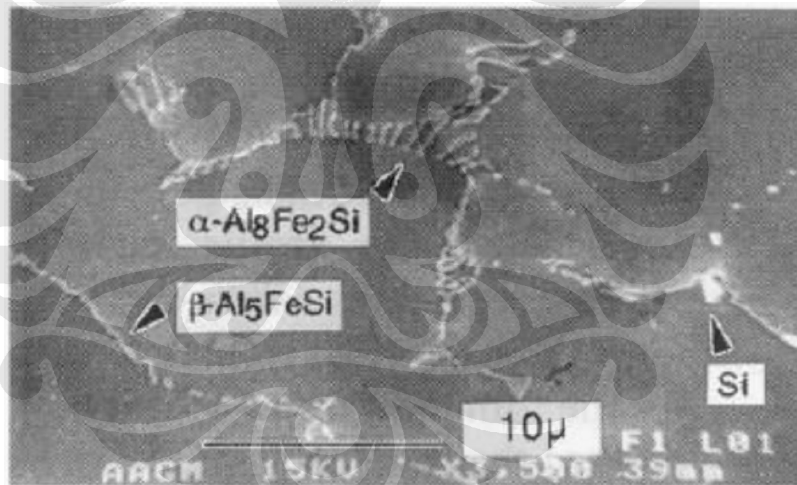




**Gambar 2.16** Rekonstruksi 3dimensi dari fasa  $\alpha$ -Al<sub>15</sub>(Fe,Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>.<sup>[14]</sup>

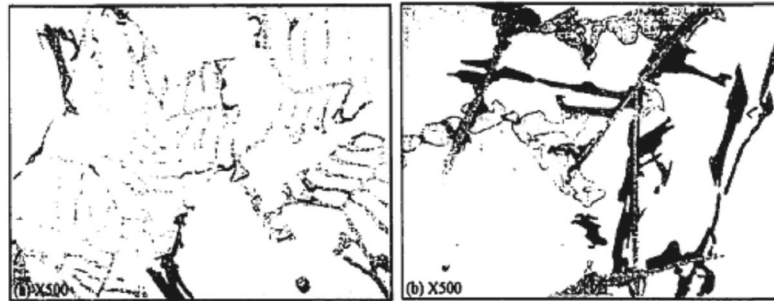


**Gambar 2.17** Rekonstruksi 3-dimensi fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi.<sup>[14]</sup>

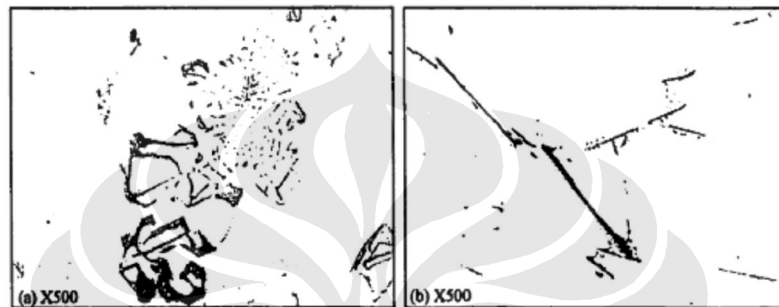


**Gambar 2.18** Hasil pengamatan SEM menunjukkan  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi berbentuk *plate like* dan  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si berbentuk *chinese script*<sup>[15]</sup>. Baik fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  terdapat dalam satu paduan. Juga terdapat fasa Si pada paduan tersebut. Kosentrasi paduan ini 0.707 wt% Fe - 0.770 wt% Si - 0.038 wt% Cu - 0.006 wt% Mn<sup>[8]</sup>

Fasa intermetalik yang ada pada paduan hasil coran lebih besar dan panjang daripada paduan *wrought*. Contoh dari fasa  $\alpha$ -AlFeSi(Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si) dan  $\beta$ -AlFeSi yang dihasilkan dari paduan hasil coran dan *wrought* dapat terlihat pada gambar dibawah ini.<sup>[16]</sup>



**Gambar 2.19** Struktur mikro paduan 319 (a) fasa  $\alpha$  dan (b) fasa  $\beta$ <sup>[16]</sup>



**Gambar 2.20** Struktur mikro dari paduan 6XXX (a) fasa  $\alpha$  dan (b) fasa  $\beta$  (hasil pengerjaan)<sup>[16]</sup>

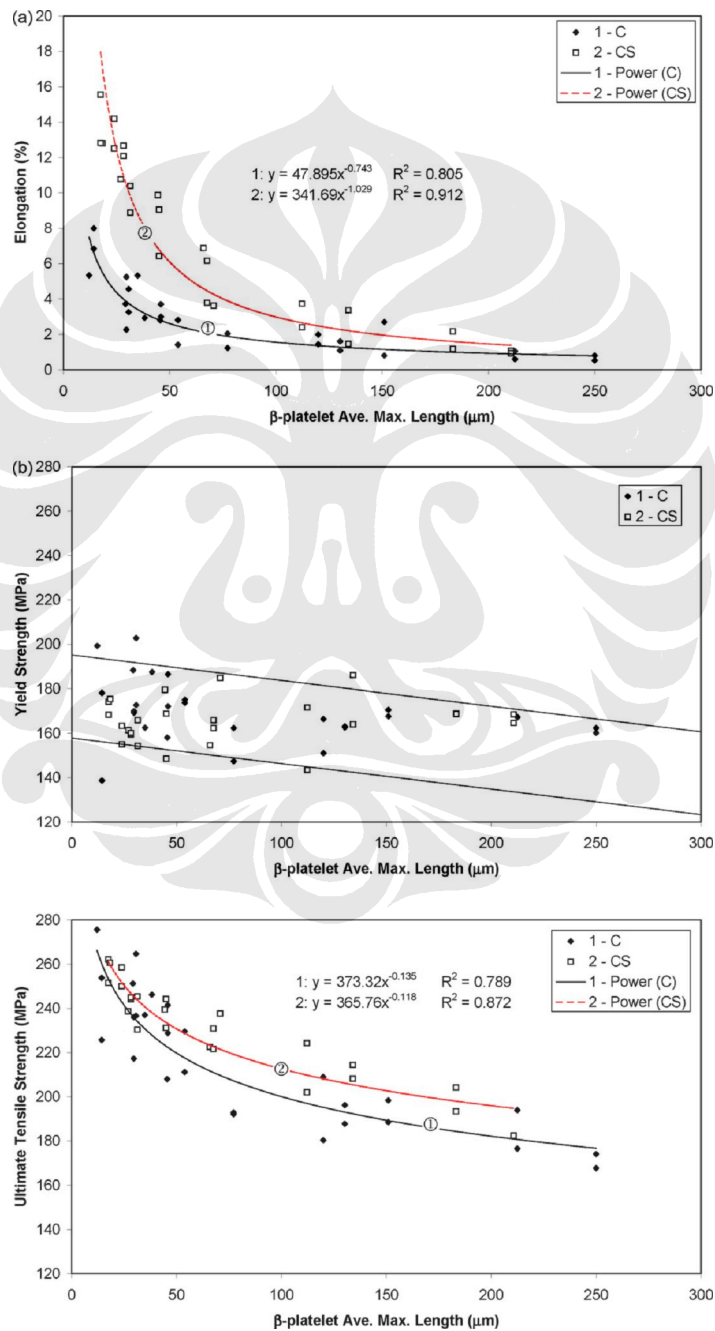
Langsrud mengatakan bahwa rasio komposisi Fe/Si [wt%/wt%] didalam paduan merupakan parameter penting dalam menentukan apakah partikel  $\alpha$  atau  $\beta$  yang akan terbentuk dalam cast. Saat rasio Fe/Si lebih besar daripada kira-kira satu selama proses pembekuan, maka akan terbentuk partikel  $\alpha$ . Dan saat rasio Fe/Si lebih rendah daripada kira-kira satu selama proses pembekuan, maka akan terbentuk partikel  $\beta$ . Pengaruh komposisi Fe/Si yang sama juga ditemukan oleh Tanihata.<sup>[8]</sup>

### 2.3.2.2 Keberadaan Fasa $\beta$ -AlFeSi terhadap Sifat Mekanik Aluminium

Keberadaan besi, walau dalam jumlah yang kecil, dapat menurunkan ductility paduan, karena terbentuk presipitasi fasa  $\beta$ -AlFeSi dalam bentuk *platelet*. Fasa ini sangat mudah pecah dan memiliki ikatan dengan matriks aluminium yang relatif lemah. Peningkatan kadar besi yang sangat progresif, akan meningkatkan panjang dari fasa tersebut, khususnya pada kadar besi lebih dari 0,7%. Presipitasi fasa-fasa ini terjadi kebanyakan pada zona liquid-solid, pada reaksi pre-eutectic.

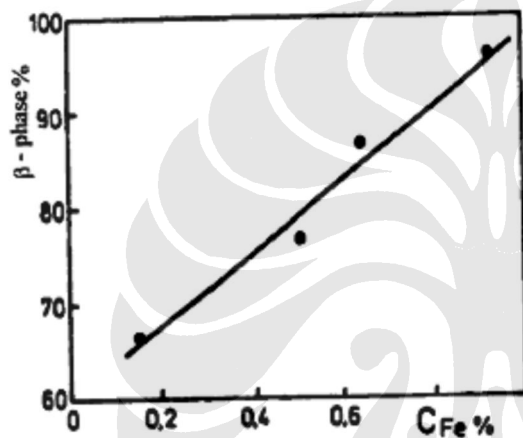
[16]

Menurut Mascré,<sup>[17]</sup> fasa platelet  $\beta$ -AlFeSi pre-eutectic dapat menurunkan sifat mekanik dari paduan. Penambahan kandungan besi lebih dari 0,5% dapat meningkatkan kekuatan paduan, namun juga dapat menurunkan *ductility*.<sup>[18][17]</sup> Pada peningkatan kandungan besi dari 0,5 sampai 1,2% pada paduan Al-13%Si, dapat menurunkan sifat mekanik khususnya elongasinya karena pembentukan fasa platelet  $\beta$ -AlFeSi.<sup>[19]</sup> Fasa platelet  $\beta$ -AlFeSi ini bertindak sebagai pembangkit tegangan yang berkontribusi terhadap sifat *brittleness* material.<sup>[11]</sup>

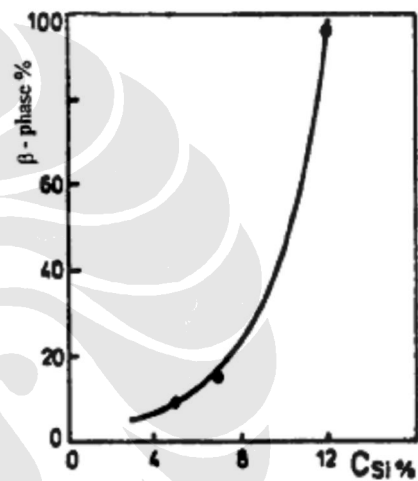


**Gambar 2.21** Pengaruh panjang maksimum fasa  $\beta$ -AlFeSi terhadap sifat mekanik paduan A356.2.<sup>[20]</sup>

Yaneva telah mempelajari penampakan dari fasa intermetalik pada paduan hasil coran aluminium dengan perbedaan konsentrasi Fe dan Mn. Dia menyimpulkan bahwa dengan kenaikan kadar konsentrasi Mn, dapat meningkatkan fasa  $\beta$ -AlFeSi secara cepat, dengan peningkatan konsentrasi unsur besi, seperti gambar 2.22a dibawah ini. Pada kadar 0,9% Fe, presipitasi unsur besi menyebabkan penurunan kekuatan fatik paduan karena pembentukan fasa  $\beta$ -AlFeSi yang semakin banyak. Gambar 2.22b menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kadar silikon menyebabkan makin banyaknya fasa  $\beta$ -AlFeSi yang terbentuk.<sup>[21]</sup>



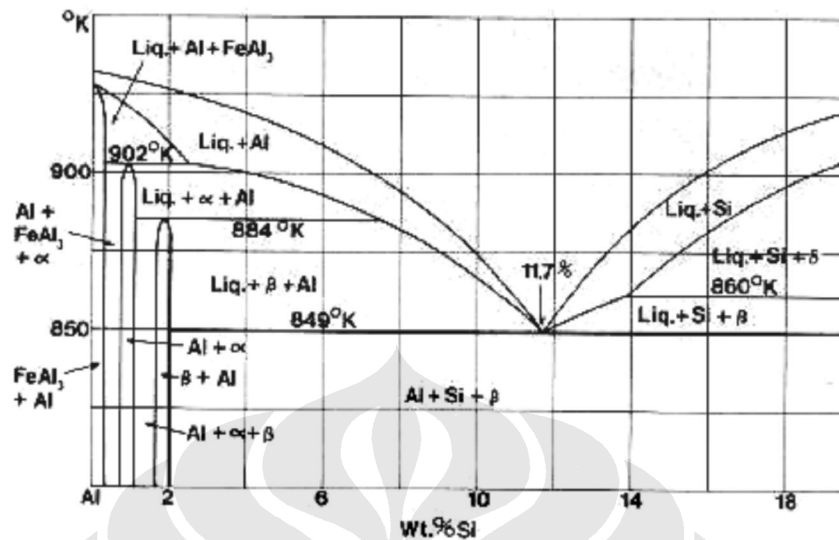
Gambar 2.22a Keberadaan fasa  $\beta$ -AlFeSi terhadap kadar iron<sup>[21]</sup>



Gambar 2.22b Keberadaan fasa  $\beta$ -AlFeSi terhadap kadar silikon<sup>[21]</sup>

Morvan<sup>[11]</sup> melakukan penelitian tentang pengaruh kecepatan pendinginan dan penambahan modifier Sr terhadap panjang maksimal fasa intermetalik  $\beta$ -AlFeSi yang terbentuk. Nilai pengurangan panjang jarum intermetalik  $\beta$ -AlFeSi karena pengaruh kecepatan pendinginan mencapai 47,8% pada *graphite vs metallic mold samples* dan 67,5% pada *graphiet mold vs gauge samples*, sedangkan pengurangan panjang maksimum jarum intermetalik  $\beta$ -AlFeSi karena pengaruh modifikasi Sr hanya 16% pada sampel *graphite mold*. Hal ini dapat disimpulkan bahwa pengaruh kecepatan pendinginan lebih efektif dalam mengurangi panjang jarum intermetalik  $\beta$ -AlFeSi daripada pengaruh modifikasi Sr. jumlah fasa intermetalik  $\alpha$ -AlFeSi meningkat sedikit karena pengaruh modifikasi Sr (dari 0% menjadi 8%), tetapi pengaruh kecepatan pendinginan tidak memberikan pengaruh terhadap peningkatan jumlah fasa intermetalik  $\alpha$ -AlFeSi.

### 2.3.2.3 Tahapan Pembentukan Fasa Intermetalik selama Proses Casting



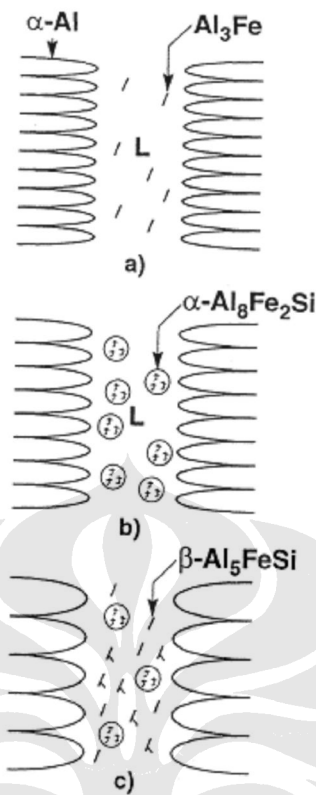
Gambar 2.23 Bagian diagram Aluminium-iron-silikon pada 0,7% Fe<sup>[8]</sup>

Gambar diatas menunjukkan bagian diagram Al-Fe-Si pada 0,7 wt% Fe. Dari gambar tersebut, dapat diperoleh bahwa reaksi yang terjadi selama proses casting adalah sebagai berikut:<sup>[8]</sup>



Temperature reaksi yang tercantum merupakan bergantung pada konsentrasi local dari matriks aluminium, sehingga temperatur reaksi tersebut dapat berbeda-beda pada paduan dengan kadar unsur yang berbeda. Oleh karena itu, temperature yang diberikan ini hanya suatu indikasi.<sup>[8]</sup>

Selama proses solidifikasi, Fe tidak dapat larut bersama dengan Al-dendrit karena memiliki kelarutan yang rendah. Fasa  $\text{Al}_3\text{Fe}$  akan terpresipitasi pertama pada liquid aluminium, kemudian diikuti presipitasi fasa  $\alpha$ . Selanjutnya fasa  $\alpha$  akan mengabsorpsi silikon dari liquid disekitarnya dan membentuk fasa  $\beta$ . Jumlah proporsi fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  yang terpresipitasi akan tergantung dari jumlah Sr yang ditambahkan kepada *melt* dan rasio Fe:Si.<sup>[11]</sup>



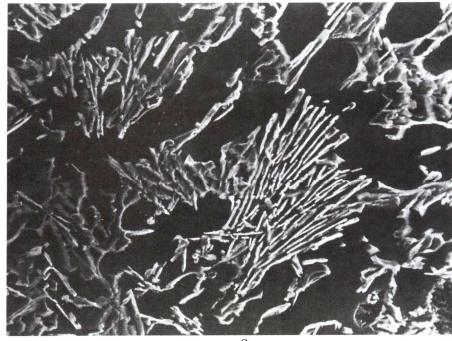
**Gambar 2.24** Skema pembentukan fasa intermetalik selama proses solidifikasi<sup>[11]</sup>

## 2.4 MODIFIKASI

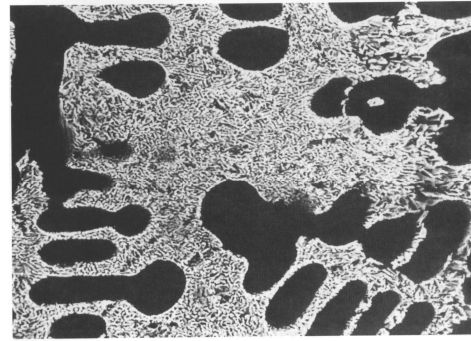
### 2.4.1 Modifikasi aluminium-silikon eutektik

Sifat dan karakteristik dari paduan aluminium-silikon hipoeutektik dapat dipengaruhi dengan memodifikasi pembentukan eutektiknya. Struktur eutektik yang lebih halus dapat diperoleh dengan meningkatkan kecepatan pembekuan dan dengan penambahan modifier kimia. Kalsium, sodium, stronsium, dan antimony telah terkenal dapat mempengaruhi derajat modifikasi eutektik yang dapat dicapai saat proses pembekuan.

Normalnya, paduan Al-Si yang tidak dimodifikasi memiliki kristal silikon berbentuk *faceted*, sebagaimana terlihat pada gambar 2.25 berikut. <sup>[2]</sup> Pada percobaan *directional solidification*, kristal silikonnya terdiri dari *silicon flakes* yang berbentuk seperti *fan-shaped*. Struktur eutektik seperti ini memberikan sifat mekanik yang buruk, material yang dihasilkannya juga menjadi getas.



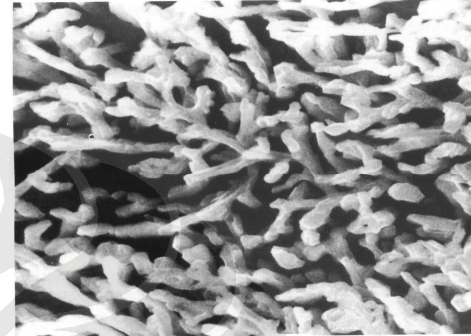
3a



a



3b



b

**Gambar 2.25** Hasil SEM kristal silikon pada paduan 356 yang tidak dimodifikasi setelah *deep etching*: a) 100X; b) 1000X. <sup>[2]</sup>

**Gambar 2.26** Hasil SEM kristal silikon pada paduan 356 yang dimodifikasi setelah *deep etching*, bentuk morfologi seperti ganggang laut: a) 100X; b) 1000X. <sup>[2]</sup>

Para ahli pengecoran telah mengetahui bahwa penambahan unsur seperti sodium, kalsium, atau stronsium dapat merubah morfologi kristal silikon eutektik dari bentuk *large flakes* menjadi struktur *fibrous*. Morfologi ini dapat dilihat pada gambar 2.26. <sup>[2]</sup>

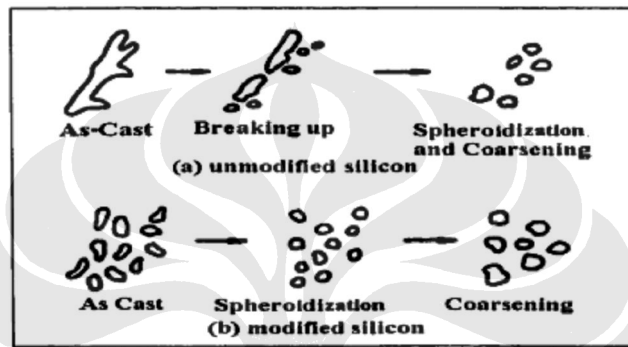
Nukleasi dan proses pertumbuhan kristal silikon eutektik ini dipengaruhi oleh penambahan unsur tersebut, dan temperatur reaksinya juga lebih rendah sekitar 10°C dibandingkan dengan material yang tidak dimodifikasi. <sup>[2]</sup>

#### 2.4.1.1 Tahapan Modifikasi Struktur Silikon oleh Sr

Perubahan ukuran dan morfologi dari fasa silikon memiliki pengaruh yang signifikan pada sifat mekanis paduan. Telah dikemukakan bahwa proses granulasi atau spheroidasi dari fasa silikon melalui perlakuan panas dua tahapan, yaitu pemecahan (*fragmentasi*) atau pembubaran dari cabang-cabang silikon eutektik dan spheroidasi dari cabang-cabang yang telah terputus. Selama perlakuan tersebut, partikel-partikel silikon mengalami perubahan ukuran dan bentuk. Pada



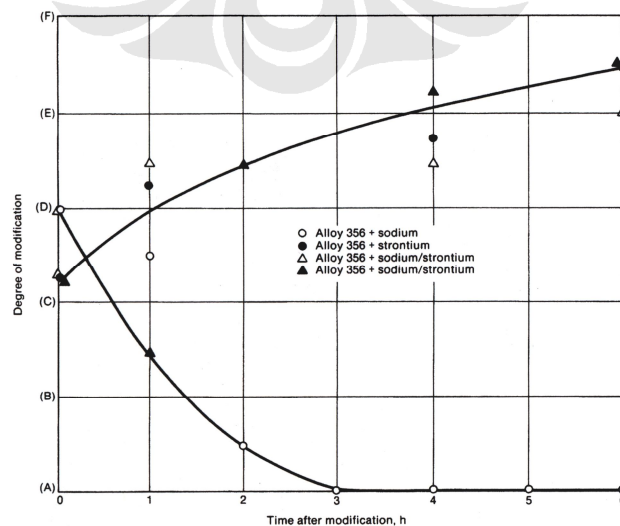
awal tahapan perlakuan panas, partikel silikon yang tidak dimodifikasi mengalami *necking* dan terputus menjadi beberapa bagian, dimana bentuknya masih mempertahankan bentuk yang aslinya, lihat Gambar 2.27(a). Setelah separasi terjadi, ukuran partikel tersebut akan mengecil yang kemudian terspheroidisasi. Proses spheroidisasi dan pengkasaran fasa Si eutektik dapat terjadi bersamaan saat tahapan kedua. Kecepatan spheroidisasi fasa silikon eutektik lebih cepat pada paduan yang dimodifikasi Sr dari pada yang tidak dimodifikasi, lihat gambar 2.27(b).<sup>[22]</sup>



**Gambar 2.27** Skema karakterisasi dari tiga tahapan proses spheroidisasi dan pengkasaran fasa silikon.<sup>[22]</sup>

#### 2.4.1.2 Modifier Na vs Sr pada Struktur Silikon

Sodium merupakan modifier yang sangat manjur, namun pengaruhnya hanya sementara karena mudah teroksidasi dan kehilangan tekanan uap. Stronsium lebih tahan lama daripada sodium, akan tetapi penambahan stronsium ini kurang efektif dilakukan pada kecepatan pembekuan yang rendah.<sup>[5]</sup>



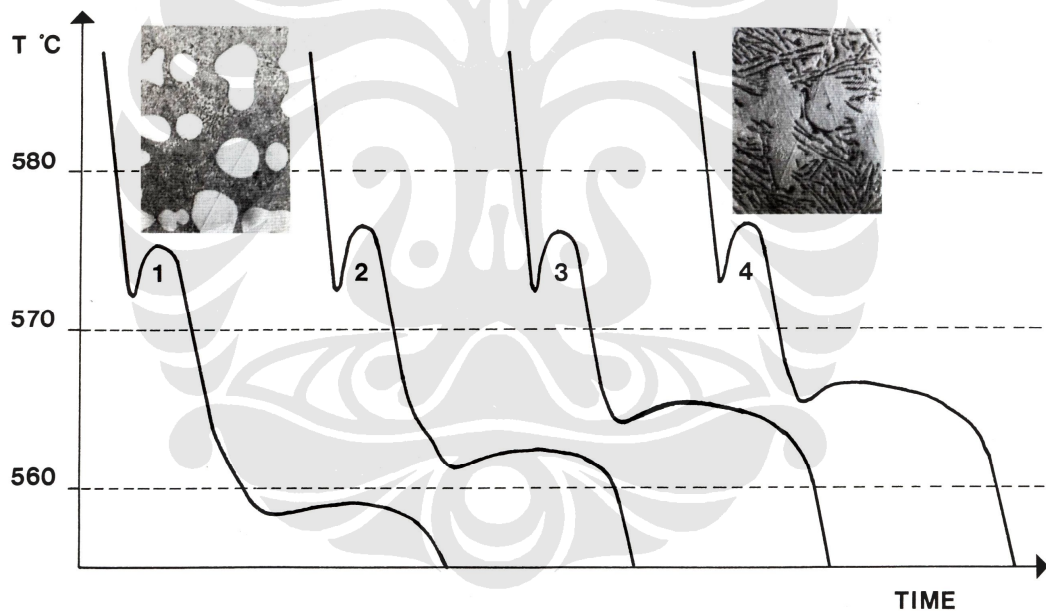
**Gambar 2.28** Keefektifan modifier sodium dan stronsium terhadap waktu<sup>[5]</sup>



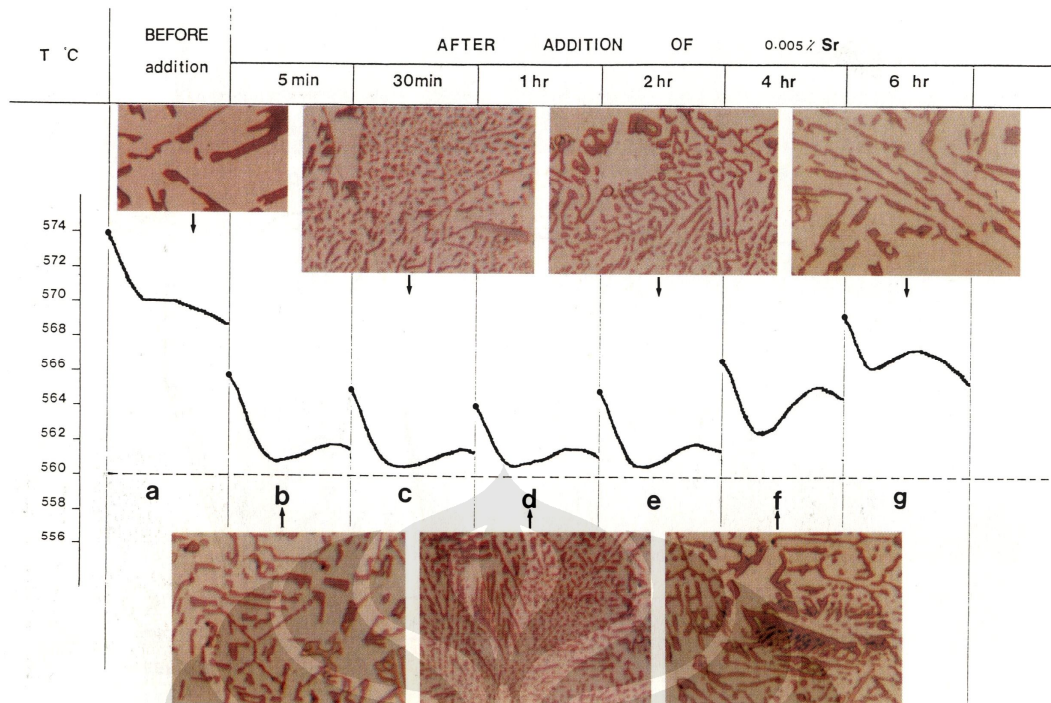
Kombinasi dari sodium dan stronsium dapat memberikan keuntungan pada keefektifan awal penambahan. Kalsium merupakan modifier yang lemah dengan tingkat komersil yang rendah. Antimony memberikan pengaruh yang terus-menerus, walaupun hasilnya lebih berupa *lamellar* halus daripada eutektik *fibrous*.<sup>[5]</sup>

Stronsium tetap aktif pada leburan aluminium dengan lebih tahan lama dibandingkan sodium. Penambahan stronsium dilakukan dengan menambahkannya melalui *master alloy*.<sup>[2]</sup>

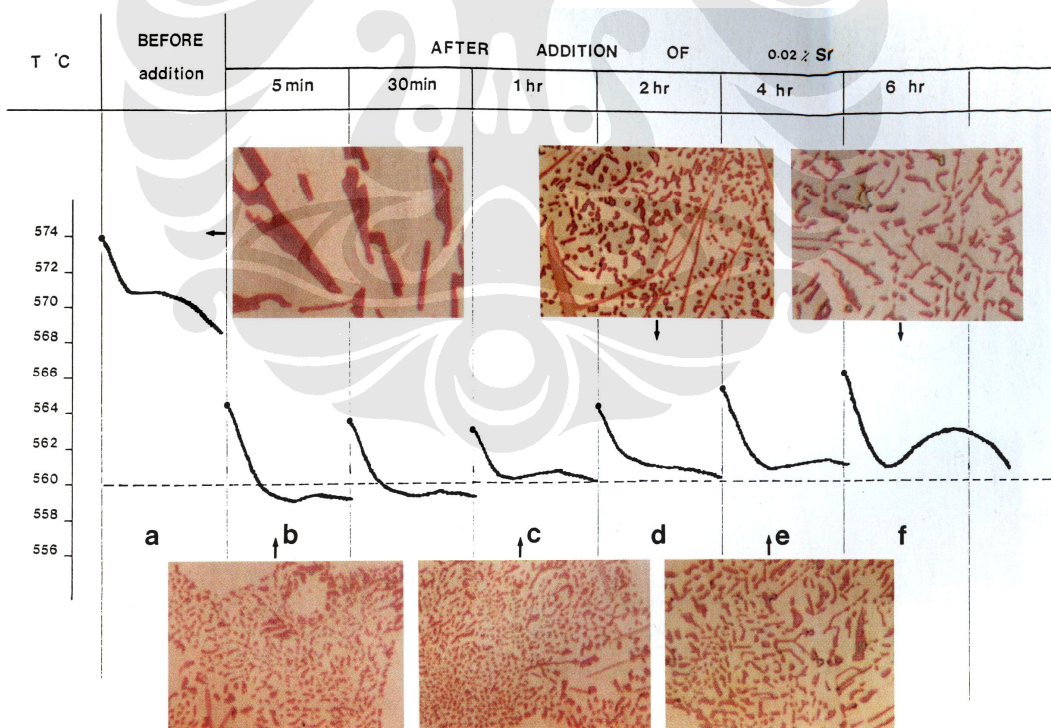
Paduan aluminium 356 dilebur pada furnace dan ditahan pada temperatur 750°C selama 6 jam untuk menghilangkan kotoran-kotoran yang ada sebelum dilakukan penambahan modifier. Setelah itu, modifier ditambahkan dengan sejumlah tertentu melalui batangan master alloy Al-3,5%Sr.<sup>[2]</sup>



**Gambar 2.29** Kurva pendinginan dan gambar mikro (220X) pada paduan dengan 9% Si.: (1) setelah dimodifikasi sodium dengan tingkat yang cukup. (2-4) setelah peleburan kembali sampai tiga kali<sup>[2]</sup>



**Gambar 2.30** Bagian dari kurva pendinginan dari paduan 356 yang ditambahkan 0,005% Sr. Gambar mikro ditampilkan pada perbesaran 560X<sup>[2]</sup>



**Gambar 2.31** Sama seperti Gambar 2.30 namun dengan penambahan 0,02% Sr, perbesaran 560X<sup>[2]</sup>

Dari gambar tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa setelah penambahan *modifier* dilakukan, temperatur nukleasi fasa silikon turun sekitar  $10^{\circ}\text{C}$ ; temperatur nukleasi terlihat menurun saat sekitar periode  $\frac{1}{2}$  sampai 2 jam setelah penambahan *modifier*; saat modifikasi optimum tercapai, kurva solidifikasi menunjukkan garis horisontal atau sedikit mengalami penurunan tanpa terjadi *undercooling* (*recalescence*); saat modifikasi mengalami pemudaran, temperatur nukleasi dan pertumbuhan mulai meningkat dan pengaruh *recalescence* semakin terlihat jelas. <sup>[2]</sup>

Saat pengaruh modifikasi optimum tercapai, kurva pendinginan paduan aluminium 356 menunjukkan: <sup>[2]</sup>

1. temperatur nukleasi yang rendah,  $\leq 565^{\circ}\text{C}$
2. temperatur pertumbuhan,  $\leq 562^{\circ}\text{C}$
3. ketidakadaan fungsi *recalescence* ( $\text{TG} - \text{Tmin} < 1^{\circ}\text{C}$ )

#### 2.4.1.3 Overmodifikasi Struktur Silikon

Penambahan kadar stronsium yang terlalu rendah, pengaruh modifikasinya akan pudar secara cepat. Sedangkan penambahan kadar stronsium yang tinggi akan membentuk fasa intermetalik  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$  yang dapat menurunkan jumlah stronsium pada larutan dan berakibat pada pengaruh modifikasi. Oleh karena itu, kadar stronsium yang memberikan pengaruh modifikasi yang optimum adalah pada kadar Sr antara 0,01-0,02% dan pada periode waktu  $\frac{1}{2}$  sampai 2 jam setelah penambahan unsur tersebut dilakukan. <sup>[2]</sup>



**Gambar 2.32** Sampel dengan kadar 0,05% Sr menunjukkan terbentuknya partikel  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ , yang tidak berkontribusi kepada pengaruh modifikasi, perbesaran  $560\times$  <sup>[2]</sup>

## 2.4.2 Modifikasi terhadap fasa intermetalik Fe

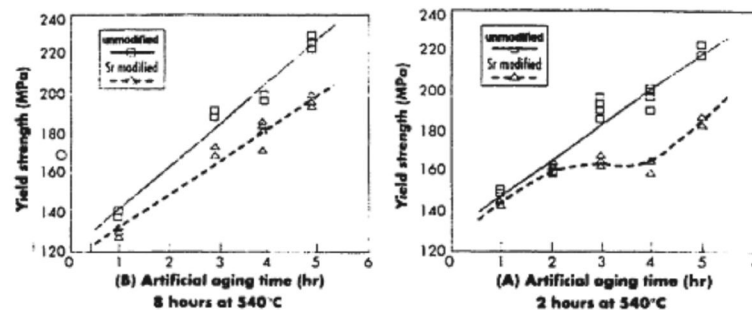
Fasa  $\beta$ -AlFeSi telah diketahui lebih berdampak buruk terhadap sifat mekanik paduan aluminium daripada fasa  $\alpha$ -AlFeSi.<sup>[14]</sup> Untuk mengurangi pengaruh buruk dari intermetalik besi pada paduan aluminium-silikon, berbagai macam metode telah banyak dikembangkan, seperti<sup>[11]</sup>:

- Modifikasi stronsium
- *Rapid solidification*
- Penambahan unsur-unsur netral
- *Grain refining*
- *Melt superheating*
- *Non-equilibrium heat treatment*

### 2.4.2.1 Modifikasi Stronsium

Stronsium, telah banyak digunakan pada paduan aluminium-silikon. Pada umumnya, Sr dapat memodifikasi bentuk dari silikon eutektik dan juga memperhalus senyawa intermetalik yang bersifat merugikan.<sup>[11]</sup>

Stronsium meningkatkan *spheroidization rate* dan menurunkan *coarsening rate* dari partikel silikon eutektik<sup>[23]</sup>. Samuel<sup>[24]</sup> telah mempelajari pengaruh stronsium terhadap pembentukan fasa  $\beta$  pada paduan 319. Menurutnya, penambahan 300 ppm stronsium dapat meningkatkan pemecahan dan pembubaran fasa  $\beta$ -AlFeSi dan pembentukan fasa intermetalik  $Al_2Cu$  *blocky* selama proses solidifikasi. Pada paduan yang dimodifikasi Sr, pemecahan fasa  $\beta$ -AlFeSi diikuti dengan peningkatan *yield strength* pada paduan. Pada paduan 413, penambahan stronsium juga dapat mengakibatkan pemecahan fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi dan meningkatkan jumlah dari fasa  $\alpha$ -AlFeSi.<sup>[25]</sup>



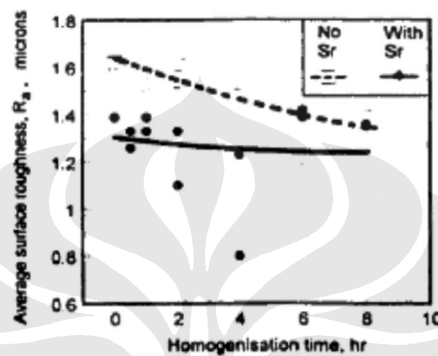
**Gambar 2.33** Variasi yield strength paduan A356 terhadap waktu artificial aging.<sup>[25]</sup>

Kulunk dan Zuliani<sup>[26]</sup> juga mempelajari pengaruh stronsium pada paduan 380 *high-pressure die-casting*. Mereka menunjukkan hasil bahwa reduksi ukuran dan jumlah fasa intermetalik Fe dapat dilakukan dengan melakukan penambahan stronsium, sehingga toleransi untuk tingginya kadar Fe yang terlarut dalam paduan dapat ditingkatkan tanpa merubah sifat mekanis paduan tersebut. Hal ini ditemukan pada penambahan 0,04-0,06% Sr kepada paduan A413, 413P, dan 413 yang memodifikasi ukuran fasa intermetalik dan meningkatkan transformasi dari fasa  $\beta$ -AlFeSi menjadi fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si.<sup>[27]</sup> Fat-halla<sup>[28]</sup> juga melaporkan bahwa dengan penambahan 0,02% stronsium pada paduan tipe Al-13%Si dapat meningkatkan %elongasi dan nilai *ultimate tensile strength* tanpa merubah *yield strength* secara signifikan.

Morris dan Miners telah menemukan bahwa penambahan stronsium dan/atau kalsium dengan jumlah total 0,01-0,5% kepada paduan ekstrusi Al-Mg-Si yang terhomogenisasi (6069) dapat merubah fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi menjadi fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si. Hasil dari penelitian Vernam dan Lifka menunjukkan bahwa dengan penambahan 0,01-0,1% Sr kepada paduan *wrought* Al-Cu-Mg-Zn dapat memperhalus fasa intermetalik termasuk Mg<sub>2</sub>Si, Al-Cu-Fe, dan Al-Cu-Mg. Dan sebagai hasilnya, paduan yang dimodifikasi Sr dapat meningkatkan ketangguhan, mempersingkat waktu homogenisasi dan ukuran butir yang lebih halus dibandingkan dengan paduan yang tidak dimodifikasi. Dimaguya mempelajari mengenai pengaruh stronsium pada paduan *wrought* 6201 dan 6063. dia melaporkan bahwa penambahan 0,015% Sr dapat meningkatkan transformasi fasa intermetalik yang ditemukan pada paduan ini, dari bentuk seperti *plate* fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi menjadi berbentuk *chinese script* fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si. Dia juga menyebutkan bahwa dengan penambahan stronsium pada paduan Al-Mg-Si menjadikannya *superior surface quality*.<sup>[11]</sup>

Modifikasi dengan stronsium menghasilkan jarak antar lengan  $\alpha$ -AlFeSi menjadi *ultra fine* pada paduan *direct chilled* (DC). Stronsium memodifikasi banyak senyawa kompleks intermetalik pada bermacam-macam paduan sistem *wrought*. Pada paduan seri 7000, stronsium memperhalus fasa intermetalik, sedangkan penambahan stronsium dan seng menurunkan jumlah fasa intermetalik paduan seri 5000.<sup>[11]</sup>

Paray telah mempelajari pengaruh stronsium pada paduan 6061. Penambahan 150-300 ppm stronsium pada paduan 6061 menghasilkan pembentukan fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si dari pada fasa  $\beta$ -AlFeSi saat proses pembekuan *billet*. Dia juga menunjukkan bahwa dengan keberadaan 180ppm stronsium dapat meningkatkan *surface finishing* paduan ini. Gambar 2.34 menunjukkan pengaruh penambahan stronsium dan waktu homogenisasi terhadap kekasaran permukaan paduan hasil ekstrusi. [29]

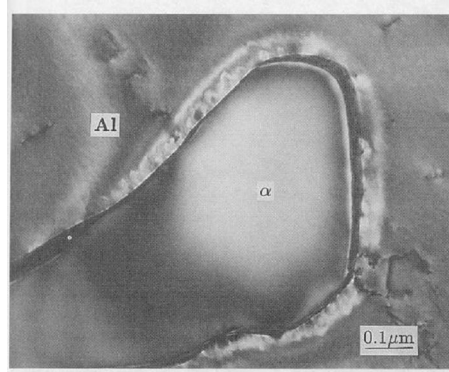


**Gambar 2.34** Pengaruh stronsium dan waktu homogenisasi terhadap kekasaran permukaan paduan 6061 [29]

Closset<sup>[30]</sup> menunjukkan bahwa pembentukan fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si ditingkatkan dengan keberadaan stronsium, dan stronsium memiliki pengaruh positif pada *tensile strength* dan *electrical resistivity* pada paduan aluminium *electrical conductor* komersial 6201 yang mengandung 0,6% magnesium dan 0,6% silikon. Mulazimoglu<sup>[31]</sup> melaporkan bahwa modifikasi stronsium pada fasa intermetalik di paduan 1XXX, 6061, dan 5182. penemuannya mengindikasikan bahwa stronsium merubah fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi yang berbentuk *plate* menjadi fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si yang berbentuk *chinese script* pada paduan sintesis 1XXX dan 6061, dan paduan komersil 6061 DC cast.

Berkenaan dengan pengaruh stronsium terhadap penstabilan fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si, Mulazimoglu telah menyatakan bahwa penyerapan stronsium pada permukaan fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si bertindak sebagai penghalang larutnya silikon kedalam fasa ini. Pada kondisi ini, transpor silikon kedalam fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si untuk membentuk fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi menjadi terlambat. Gambar 2.35 merupakan hasil TEM pada fasa  $\alpha$ -Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si yang dikelilingi suatu lapisan yang kaya akan silikon. [31]





**Gambar 2.35** Lapisan kaya silikon yang mengelilingi fasa  $\alpha$ -AlFeSi pada kehadiran stronsium<sup>[31]</sup>

**Tabel 2.5** Beberapa sifat mekanis pada paduan aluminium yang dimodifikasi dan tidak dimodifikasi.<sup>[5]</sup>

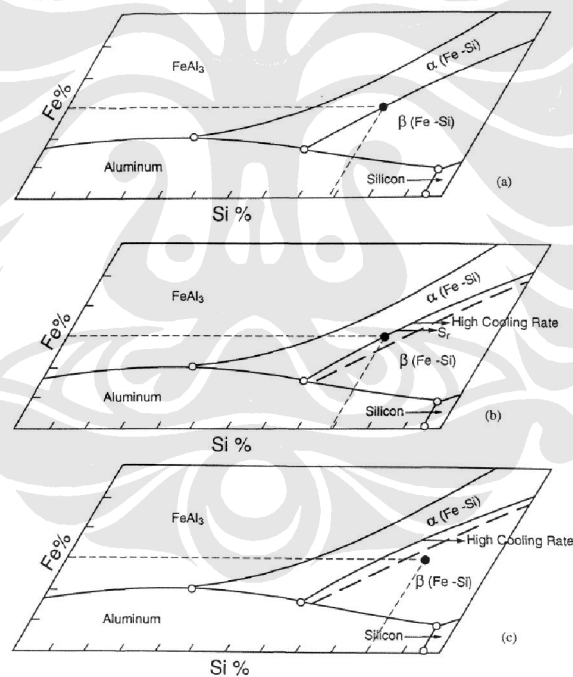
Alloy and temper	Product	Modification treatment	Tensile yield strength		Ultimate tensile strength		Elongation %
			ksi	MPa	ksi	MPa	
13% Si	Sand cast bars	None	...	...	18.0	124	2.0
		Na-modified	...	...	28.0	193	13.0
	Permanent mold test bars	None	...	...	28.0	193	3.6
		Na-modified	...	...	32.0	221	8.0
359.0	Permanent mold test bars	None	...	...	26.1	180	5.5
		0.07% Sr	...	...	30.5	210	12.0
356.0-T6	Sand cast bars	None	30.1	208	41.9	289	2.0
		0.07% Sr	34.5	238	42.5	293	3.0
	Bars cut from chilled sand casting	None	30.9	213	41.2	284	4.4
		0.07% Sr	31.6	218	42.2	291	7.2
A356.0-T6	Sand cast bars	None	26.0	179	40.0	226	4.8
		0.01% Sr	30.0	207	43.0	297	8.0
A444.0-T4	Permanent mold test bars	None	...	...	21.9	151	24.0
		0.07% Sr	...	...	21.6	149	30.0
A413.2	Sand cast bars	None	16.3	112	19.8	137	1.8
		0.005-0.05% Sr	15.6	108	23.0	159	8.4
	Permanent mold test bars	None	18.1	125	24.4	168	6.0
		0.005-0.08% Sr	18.1	125	27.7	191	12.0
	Test bar cut from auto wheel	0.05% Sr	17.5	121	28.0	193	10.6
		0.06% Sr	18.2	126	28.0	193	12.8

Penambahan stronsium biasanya terbuat dari *master alloy* yang mengandung lebih dari 10% *modifier*. Walaupun penambahan ini dibuat dengan degradasi melarut yang minimum, stronsium dapat meningkatkan kecenderungan porositas hidrogen, melalui peningkatan kelarutan hidrogen dan menurunkan tegangan permukaan.<sup>[5]</sup>

Manfaat terbaik dari modifikasi aluminium-silikon eutektik adalah saat kadar silikon pada paduan antara 5% sampai konsentrasi eutektik. Penambahan unsur-unsur *modifier* pada paduan ini menghasilkan *lamellar* yang halus atau struktur eutektik *fibrous*. Penambahan ini juga dapat menahan pertumbuhan kristal silikon pada eutektik dengan menghasilkan *lamellae* yang lebih halus. [5]

Biasanya, struktur yang telah dimodifikasi menghasilkan tensile properties yang lebih tinggi dan cukup meningkatkan keuletan ketika dibandingkan dengan struktur yang tidak dimodifikasi. [5]

Gambar berikut ini menggambarkan diagram *aluminum-rich corner* fasa Al-Fe-Si, dimana penambahan modifier Sr dan kecepatan pendinginan dapat memperluas area fasa  $\alpha$ -AlFeSi. Pada paduan yang tidak dimodifikasi dan pada kecepatan pendinginan yang rendah, konsentrasi Fe dan Si berada pada tingkat kritisnya (titik hitam) untuk membentuk fasa  $\beta$ -AlFeSi di garis border  $\alpha$ - $\beta$ . [11]

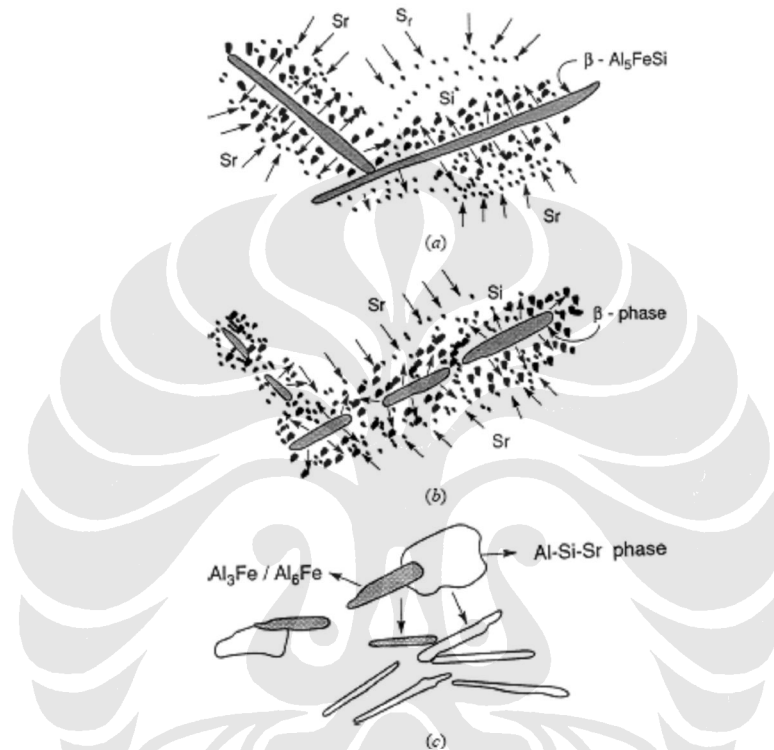


**Gambar 2.36** Diagram *aluminum rich corner* fasa Al-Fe-Si yang menjelaskan pengaruh penambahan *modifier* Sr dan kecepatan pendinginan terhadap perluasan area fasa  $\alpha$ -AlFeSi [11]

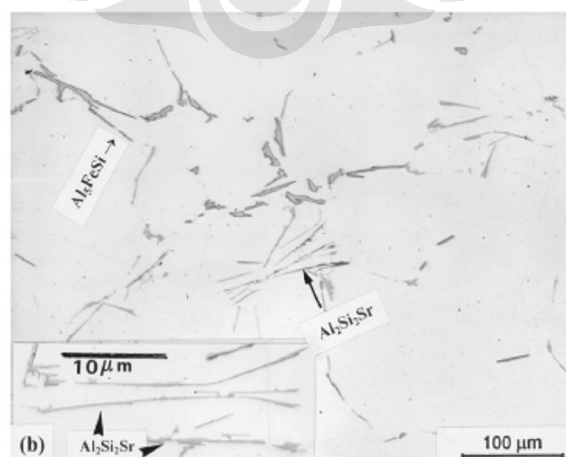
Pada kondisi ini, dengan peningkatan kadar Sr atau kecepatan pendinginan yang cepat atau keduanya, garis border  $\alpha$ - $\beta$  akan bergeser ke arah kanan. Hal ini menjelaskan tentang stabilitas fasa  $\alpha$ -AlFeSi karena penambahan modifier Sr. [11]



Dengan peningkatan kadar silikon namun masih dalam kadar Fe yang konstan pada paduan, titik hitam akan bergeser jauh ke arah area fasa  $\beta$ -AlFeSi. sehingga struktur mikro paduan yang terbentuk adalah fasa  $\beta$ -AlFeSi. Dalam beberapa kondisi, hanya kecepatan pendinginan yang tinggi yang dapat mempengaruhi terbentuknya fasa  $\alpha$ -AlFeSi pada struktur mikro akhir dimana dapat menggeser garis border  $\alpha$ - $\beta$  ke arah kanan.<sup>[2]</sup>

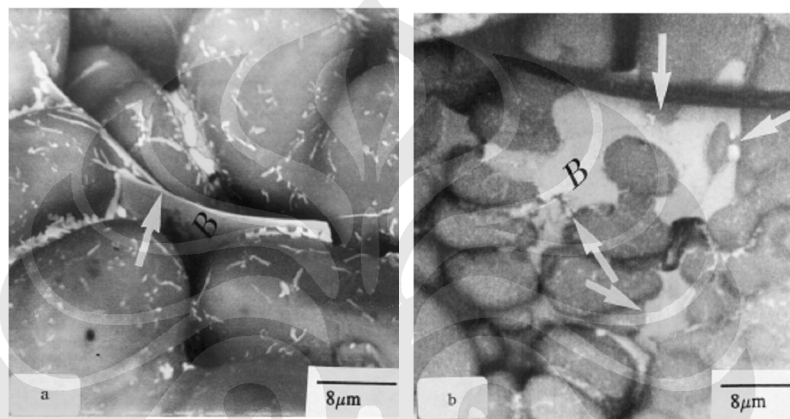


**Gambar 2.37** Skema ilustrasi terdekomposisinya fasa  $\beta$  platelets pada paduan Al-Fe-Si yang dimodifikasi Sr (rasio Fe/Si<1): (a) under modification, (b) full modification, dan (c) overmodification.<sup>[32]</sup>



**Gambar 2.38** Overmodifikasi yang membentuk fasa intermetalik Sr

Gambar tersebut mengilustrasikan terdekomposisinya fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi dan pembentukan fasa intermetalik baru yang mengandung Sr. Pengujian *under modification*, *full modification* dan *over modification* telah dilakukan untuk mengindikasikan penambahan Sr yang sedikit, cukup dan berlebih. Pada gambar 2.37a yang ditambahkan sedikit Sr fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi tidak mengalami perubahan. Pada gambar 2.37b yang ditambahkan Sr yang cukup, terjadi fragmentasi fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi menjadi bagian-bagian yang lebih pendek. Pada gambar 2.37c yang ditambahkan Sr berlebih, terjadi presipitasi intermetalik AlSiSr.<sup>[32]</sup>



**Gambar 2.39** *Scanning Electron Micrograph* morfologi fasa  $\beta$  *platelets* pada paduan Al-7%Si-0,8%Fe (a) tanpa modifikasi Sr dan (b) dengan modifikasi 250 ppm.<sup>[32]</sup>

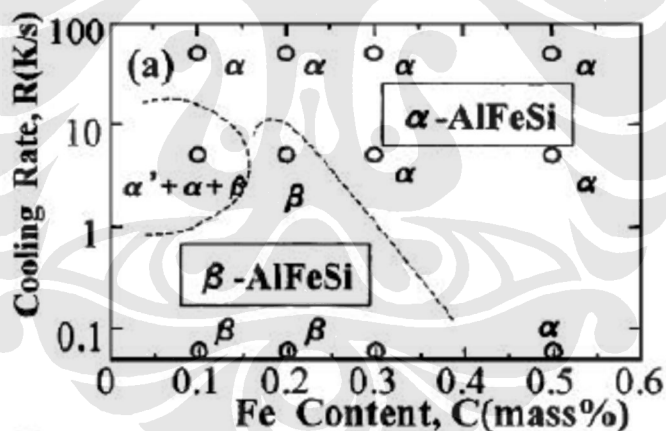
Gambar menggambarkan bentuk morfologi fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi *platelets* pada paduan aluminium dengan 7% Si dan 0,8% Fe yang ditambahkan Sr dan tidak ditambahkan Sr. Dengan ketidakhadiran Sr (gambar 2.39a), fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi tampak dalam bentuk *platelets solid* seluruhnya, sedangkan dengan kehadiran Sr (gambar 2.39b), *platelets* berbentuk lebih berlubang dari pada *solid platelets*. Hal ini dikarenakan terjadinya penolakan Si dari *platelets*.<sup>[32]</sup>

#### 2.4.2.2 Rapid Solidification

Dengan pembekuan cepat ini, besi akan larut dalam solid solution. Iglessis menyatakan bahwa konversi fasa intermetalik  $\beta$ -AlFeSi menjadi fasa  $\alpha$ -AlFeSi hanya dapat terjadi pada tingkat kadar besi dan silikon yang rendah, dan pada kecepatan pendinginan yang rendah.<sup>[33]</sup>

Awano dan Shimizu berpendapat lain, mereka menyatakan bahwa fasa *chinese script*  $\alpha$ -AlFeSi tidak dipengaruhi kecepatan pendinginan, tetapi dengan peningkatan kecepatan pendinginan akan menurunkan fraksi volume dari fasa intermetalik  $\beta$ -AlFeSi. Pada kecepatan pendinginan yang tinggi, fasa intermetalik yang terbentuk relatif lebih kecil dan lebih seragam. Akan tetapi, *rapid solidification* ini tidak mudah untuk dipraktikkan karena sangat tidak mungkin untuk mendapatkan kecepatan pembekuan yang seragam saat logam cair masuk kedalam rongga cetakan yang memiliki bentuk kompleks dan ketebalan yang berbeda-beda.<sup>[34]</sup>

Tanihata menemukan bahwa pada paduan aluminium 6063, pada kecepatan pendinginan yang biasa digunakan industri, yaitu 5 K/s dan kadar Fe 0,2% (dengan rasio Fe/Si=0,43), hanya terdapat partikel  $\beta$ -AlFeSi yang terbentuk. Sedangkan pada kecepatan pendinginan yang sama dan dengan kadar Fe 0,5% (dengan rasio Fe/Si=1,2), partikel  $\alpha$  terbentuk daripada partikel  $\beta$  dalam rentang kecepatan pendinginan yang lebar antara 0,001 K/s sampai 50 K/s.<sup>[8]</sup>



**Gambar 2.40** Jenis intermetalik yang terbentuk berdasarkan kecepatan pendinginan dan kadar Fe pada paduan Aluminium 6063<sup>[8]</sup>

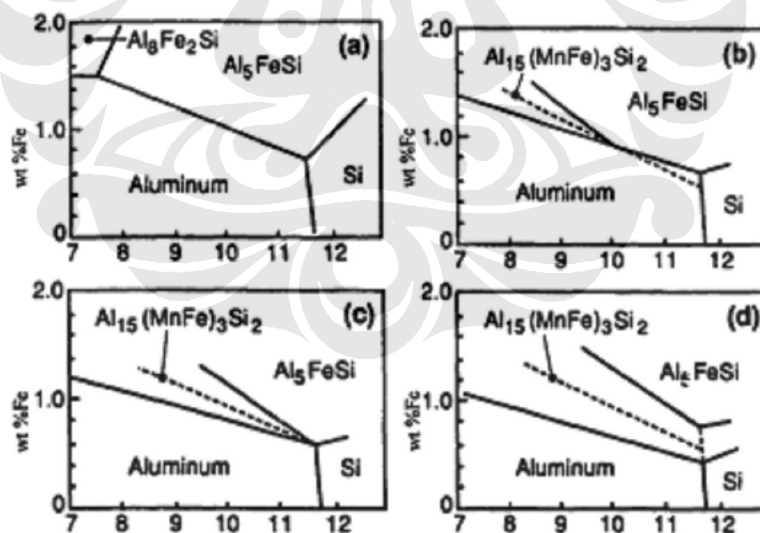
Langsrud menyatakan bahwa perubahan fasa-fasa metastabil  $\alpha$  dan  $\beta$  merupakan fungsi dari kecepatan pendinginan. Oleh karena itu, semakin banyak partikel silikon (seperti  $\beta$ ) akan terbentuk saat kecepatan pendinginan lebih tinggi. Hal ini bertentangan dengan hasil penelitian Tanihata, dimana partikel  $\alpha$  akan terbentuk pada kecepatan pendinginan yang tinggi, dimana kadar Si-nya kurang daripada partikel  $\beta$ .<sup>[8]</sup> Kecepatan pembekuan tidak hanya meningkatkan *tensile properties*, tapi juga keuletan paduan aluminium.<sup>[5]</sup>

### 2.4.2.3 Penambahan Unsur-unsur Netral

Mangan, kromium, dan berilium merupakan unsur-unsur yang biasanya ditambahkan sebagai “neutralizers” untuk mengurangi tingkat presipitasi fasa intermetalik  $\beta$ -AlFeSi dan meningkatkan pembentukan fasa intermetalik  $\alpha$ -AlFeSi. [11]

**Unsur mangan (Mn)** merupakan unsur paduan yang biasa ditambahkan untuk menetralkan pengaruh dari besi dan memodifikasi morfologi dan tipe komponen intermetalik. [15] Iglessis menunjukkan bahwa keefektifan penambahan mangan dengan adanya kehadiran Cr dapat berkontribusi dalam proses presipitasi fasa intermetalik besi dalam bentuk fasa  $\alpha$ -Chinese script  $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ . [33]

Diagram fasa dari sistem Al-Fe-Si pada beberapa kadar mangan yang konstan ditunjukkan pada gambar 2.41. dari diagram fasa tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin meningkatnya kadar Mn, maka daerah fasa intermetalik  $\alpha$ -AlFeMnSi bertambah luas. Oleh karena itu, kristalisasi fasa  $\alpha$ -AlFeMnSi akan dapat terbentuk bahkan pada tingkat kadar Fe yang tinggi. Morfologi dan komposisi kimia fasa  $\alpha$ -AlFeMnSi ini mirip dengan yang didapatkan pada fasa  $\alpha$ -AlFeSi pada paduan tanpa penambahan unsur mangan. [16]



**Gambar 2.41** Diagram fasa sistem Al-Fe-Si pada tingkat kadar mangan (Mn) yang konstan (a) 0%; (b) 0,1%; (c) 0,2%; dan (d) 0,3%. [16]

Ketika rasio Mn:Fe adalah 1:2, unsur mangan dapat mematahkan jarum-jarum panjang fasa intermetalik  $\beta$ -AlFeSi, sehingga dapat meningkatkan sifat mekanik dan *castability* dari paduan. Komiyama [35] menyatakan bahwa kadar Mn

memiliki pengaruh kuat kepada kekuatan tarik paduan hanya pada saat kadar Fe lebih dari satu persen. Narayan<sup>[36]</sup> menemukan bahwa saat kecepatan pendinginan yang rendah, morfologi dari intermetalik Fe berubah menjadi tipe *script* dengan penambahan Mn, namun sebaliknya saat kecepatan pendinginan yang cepat, kedua fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  terkristalisasi.

**Unsur kromium (Cr)** memiliki sifat yang sama dengan unsur mangan. Kromium dapat memodifikasi morfologi dan tipe fasa intermetalik pada paduan cast-aluminium. Gustafsson<sup>[15]</sup> telah menemukan bahwa dengan penambahan unsur Cr pada paduan aluminium dengan 7% Si dan 0,3% Mg yang mengandung 0,52% Fe dapat merubah morfologi  $\beta$ -AlFeSi menjadi *chinese script*. Granger<sup>[37]</sup> menghasilkan hasil pengamatan yang sama. Fasa intermetalik kompleks yang terbentuk dari aluminium, silikon, besi, mangan, dan kromium disebut “*sludge*” atau kotoran/endapan/lumpur. Partikel *sludge* memiliki titik lebur yang tinggi dan *specific gravity* yang tinggi. Untuk menghindari pembentukan *sludge*, sebuah formula hasil eksperimen yang disebut “*sludge factor*” digunakan sebagai penuntun untuk paduan jenis ini.<sup>[38]</sup>

$$\text{Sludge Factor (SF)} = \%Fe + 2(\%Mn) + 3(\%Cr) \quad (2.8)$$

Dengan *casting temperature* pada paduan *die casting* sekitar 650°C, bila nilai *sludge factor* adalah 1,8 berarti normal.

Penambahan **unsur berilium (Be)** dapat menyebabkan terjadinya presipitasi dari senyawa intermetalik “Al<sub>5</sub>BeFeSi” dengan ukuran yang lebih kecil, dan bentuk yang lebih *globular* daripada bentuk fasa Al<sub>5</sub>FeSi yang berbentuk *platelets* besar dan getas. Bentuk yang kecil dan *globular* dari senyawa yang mengandung berilium dapat mengeliminasi pengaruh *embrittlement* dan *weakening* pada *platelets*. Dengan penambahan 0,005% Be pada paduan *wrought* aluminium, dapat membuat paduan ini menjadi lebih mudah pengerjaannya dengan meningkatkan kualitas permukaan dan sifat mekanis. Sifat mampu las juga dapat ditingkatkan dengan penambahan sedikit Be. Sebagai tambahan, berilium juga dapat meningkatkan *fluidity* dan *castability*, khususnya pada aplikasi otomotif.<sup>[39]</sup>

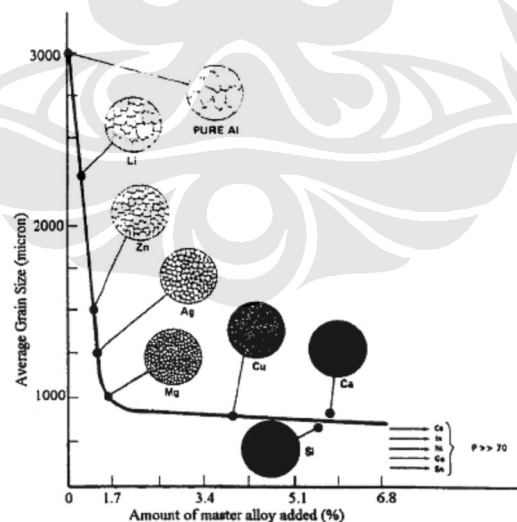
**Magnesium (Mg)** digunakan untuk meningkatkan sifat mekanis paduan melalui presipitasi Mg<sub>2</sub>Si. Samuel<sup>[40]</sup> telah menunjukkan bahwa penambahan

0,35% Mg kepada paduan aluminium komersil 319 dapat merubah fasa  $\beta$ -AlFeSi menjadi fasa  $Al_5Mg_3FeSi_6$ . Kadar magnesium lebih dari 0,5% dapat berkontribusi dalam kekuatan dan *ductility* paduan. [41]

Magnesium memiliki pengaruh yang buruk pada modifikasi stronsium, karena terbentuknya senyawa intermetalik kompleks  $Mg_2SrAl_4Si_3$  yang terbentuk sebelum reaksi eutektik terjadi. [42]

#### 2.4.2.4 Grain Refining

Telah diketahui bahwa sifat dari komponen hasil coran sangat dipengaruhi oleh struktur internal seperti ukuran butir dan morfologi struktur presipitasi. [43] Paduan aluminium dapat di *grain refined* dengan menambahkan *master alloy* titanium atau Al-Ti-B kedalam paduan untuk mengontrol *casting grain structure*. *Grain refiner* menyediakan tempat nukleasi untuk pembentukan dendrit aluminium primer dan memfasilitasikan produksi hasil coran dengan jumlah butir kecil, seragam dan *equiaxed* yang banyak. Data ukuran butir untuk paduan 319 dapat dilihat pada gambar 2.42. berikut sebagai fungsi dari konsentrasi titanium. Dapat dilihat bahwa dengan kadar titanium minimum dari 0,15-0,2% dapat diperoleh *grain refinement* yang banyak sekali. [44]



**Gambar 2.42** Variasi dari rata-rata ukuran butir pada produk hasil coran dengan konsentrasi titanium dan sebagai fungsi parameter [44]

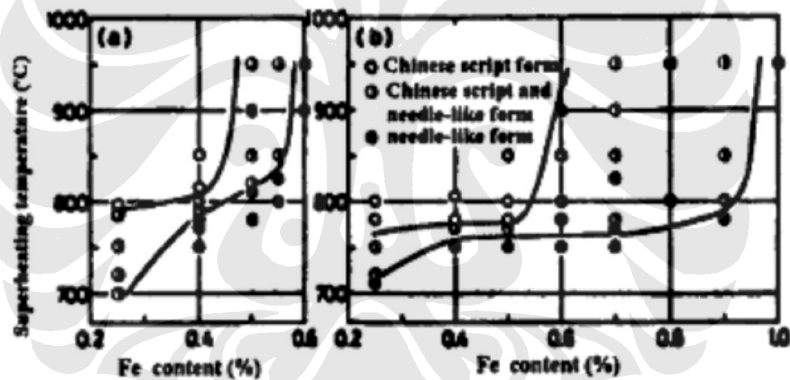
Boone, menggunakan *master alloy* aluminium yang terdiri dari aluminium-titanium-boron (Al-Ti-B) dan aluminium-stronsium (Al-Sr), menyatakan bahwa *grain refinement* dapat meningkatkan *mass feeding*

*characteristics* selama proses pengecoran dan solidifikasi. Juga ukuran butir yang halus membuat fasa kedua intermetalik menjadi lebih kecil dan lebih seragam distribusinya. [45]

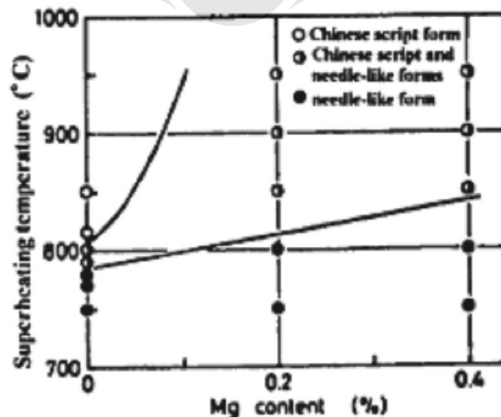
#### 2.4.2.5 Melt Superheating

Telah dilaporkan bahwa *superheating* pada *melt* dapat merubah morfologi dari fasa intermetalik iron dari bentuk *plate* menjadi *chinese script*. [46] Hasil dari penelitian Awano dan Shimizu adalah dengan paduan yang memiliki kadar Fe, Si, dan Mg yang rendah, serta kecepatan pendinginan yang tinggi, akan didapat fasa intermetalik  $\alpha$ -AlFeSi. [34]

Gambar 2.43 berikut ini menunjukkan bentuk struktur mikro yang terbentuk akibat pengaruh dari temperatur *superheating*. Gambar 2.44 menunjukkan pengaruh kadar magnesium terhadap bentuk fasa intermetalik. [34]



**Gambar 2.43** Pengaruh temperatur *superheating* dan kadar Fe terhadap bentuk fasa intermetalik Fe pada: (a) paduan Al-6%Si-Fe, (b) paduan Al-11%Si-Fe [34]



**Gambar 2.44** Pengaruh kadar magnesium terhadap bentuk fasa intermetalik Fe pada paduan Al-6% Si-Mg-0,4% Fe [34]

Xiufang telah mempelajari pengaruh superheat pada melt terhadap morfologi intermetalik Fe pada paduan aluminium dengan kadar 12,15% Si-0,52% Cu-0,33% Mg-0,3% Mn-1,8% Fe, dan menemukan bahwa fasa intermetalik  $\beta$  pada paduan berubah menjadi bentuk sferoidal sebagai hasil dari memansakan logam sampai temperatur tinggi (980°C), diikuti dengan *pouring* kedalam cetakan permanen. Dengan menggunakan teknik ini, intermetalik Fe dapat terspheroidisasi seluruhnya. <sup>[46]</sup>

#### 2.4.2.6 Non-equilibrium Heat Treatment

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

Gringer menemukan bahwa fasa  $\alpha$ -AlFeSi yang terbentuk pada paduan 1XXX bertransformasi menjadi fasa Al<sub>3</sub>Fe selama *heat treatment* pada temperatur antara 450-575°C untuk waktu yang dipanjangkan. <sup>[47]</sup>

Narayan mempelajari pengaruh dari temperatur larutan dan waktu terhadap perilaku pelarutan intermetalik Fe pada paduan aluminium dengan 6% Si-3,5% Cu-0,3% Mg-1% Fe, dan menemukan bahwa dengan meningkatnya temperatur pada larutan, maka fasa  $\beta$ -AlFeSi akan terlarut, sebaliknya fasa  $\alpha$ -AlFeSi tidak mengalami pelarutan. <sup>[36]</sup>

Velleneuve melaporkan bahwa *heat treatment* pada paduan Al-Si yang mengandung Fe dapat mempercepat pelarutan dari fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi. Panjang jarum-jarum dari fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi menjadi minimal setelah 30 jam untuk paduan yang tidak dimodifikasi dan hanya 10 jam untuk paduan yang dimodifikasi. Pelarutan fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi terjadi dengan terdekomposisinya fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi menjadi Al<sub>6</sub>Fe dan Si. Mekanisme pelarutan fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi adalah dengan penolakan Fe dan Si pada ujung-ujung (daripada sisi-sisi) jarum fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi, yang dapat menurunkan panjang jarum fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi daripada ketebalannya. <sup>[48]</sup>