

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 ALUMINIUM

Karena merupakan unsur logam yang kandungannya paling melimpah di bumi, aluminium menjadi material yang paling diperhitungkan sejak akhir abad ke-19<sup>[2]</sup>. Selain itu, karena sifat-sifatnya yang menguntungkan seperti sangat ringan, mudah difabrikasi, konduktivitas panas dan listrik yang baik, dan ketahanan korosi yang sangat baik menjadikan aluminium dan paduannya dipakai untuk berbagai penggunaan terutama di bidang otomotif<sup>[4]</sup>. Contoh aplikasi aluminium pada dunia otomotif adalah sebagai *engine block, piston, cylinder head, intake manifolds, crankcases, karburator, transmission housings, dan rocker arms*<sup>[4]</sup>.

Unsur utama yang paling sering dipadukan dengan aluminium adalah silikon. Hal tersebut disebabkan karena paduan aluminium silikon dapat menghasilkan sifat mampu cor yang baik, ketahanan aus dan ketahanan korosi yang baik, mudah dilakukan permesinan, mampu las yang baik, tahan *hot tearing*, mampu alir yang baik, spesifik gravitasi rendah, konduktivitas panas yang tinggi, serta ekspansi panas rendah<sup>[4]</sup>. Aplikasi penggunaan paduan aluminium silikon mencapai 85 – 90% dari total paduan aluminium yang sekarang diproduksi<sup>[4]</sup>.

Hal utama yang sekarang dihadapi umat manusia adalah masalah kelangkaan energi. Oleh karena itu, industri otomotif melakukan terobosan – terobosan untuk mengurangi berat kendaraan yang mereka produksi dengan cara mengurangi penggunaan material – material yang mempunyai berat jenis tinggi seperti besi dan menggantinya dengan aluminium, mengingat hal tersebut dapat mengurangi konsumsi bahan bakar<sup>[4]</sup>. Dari penelitian menunjukkan bahwa dengan mengurangi berat kendaraan sebanyak 200 kg dapat menghasilkan penghematan bahan bakar sebanyak satu liter tiap 120 km<sup>[4]</sup>. Hal tersebut berarti dapat

mengurangi konsumsi bahan bakar sampai 1000 liter selama umur pakai satu kendaraan dalam kondisi normal. Dalam penelitian yang lain menunjukkan bahwa dengan mengurangi berat kendaraan sebanyak 50 kg maka dapat menghemat bahan bakar sampai 850 kg selama periode 10 tahun<sup>[4]</sup>. Dengan melihat data tersebut maka diharapkan pada tahun 2015 penggunaan aluminium pada setiap kendaraan mencapai 250 - 340 kg dengan cara mengganti *engine blocks* yang notabene adalah bagian kendaraan yang paling berat dari besi menjadi aluminium<sup>[5]</sup>.

Akan tetapi karena terkendala harga aluminium yang masih lebih mahal dari baja maka seringkali industri otomotif menggunakan aluminium jenis *scrap* yang notabene lebih murah untuk mengurangi jumlah biaya produksi<sup>[6]</sup>. Penggunaan aluminium jenis *scrap* ini mempunyai kelemahan yaitu memiliki sifat mekanis yang lebih rendah mengingat terdapatnya banyak pengotor dalam aluminium jenis *scrap* ini seperti besi<sup>[6]</sup>.

## 2.2 PADUAN ALUMINIUM TUANG

### 2.2.1 Karakteristik Paduan Aluminium Tuang

Karena mempunyai sifat mampu cor yang baik, paduan aluminium merupakan paduan tuang yang relatif paling banyak diaplikasikan dibandingkan dengan jenis paduan tuang material lainnya. Selain karena sifat mampu cor yang baik tersebut, berikut ini adalah beberapa kelebihan aluminium lainnya<sup>[7]</sup>:

- Memiliki temperatur lebur dan temperatur tuang yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan logam lain pada umumnya sehingga dalam proses peleburannya membutuhkan energi yang lebih kecil.
- Memiliki sifat mampu alir yang baik sehingga mampu mengisi ruang dan rongga yang kecil. Dengan mempunyai sifat ini maka dapat dibuat produk dengan dimensi yang rumit dan kompleks menggunakan paduan aluminium.
- Tingkat kelarutan gas hidrogen yang dapat menyebabkan porositas dapat dikendalikan dengan metode proses yang baik.
- Transfer panas dari aluminium cair ke cetakan relatif cepat sehingga dapat mempercepat siklus penuangan pada cetakan logam dan implikasinya produktivitas dapat ditingkatkan.

- Cacat *hot shortness* (logam robek sebelum membeku) dapat diminimalisir karena cukup banyak jenis paduan aluminium tuang yang bebas dari kecenderungan cacat tersebut.
- Memiliki stabilitas kimia yang baik.
- Memiliki permukaan *as-cast* yang baik, berkilat, dan tanpa noda.

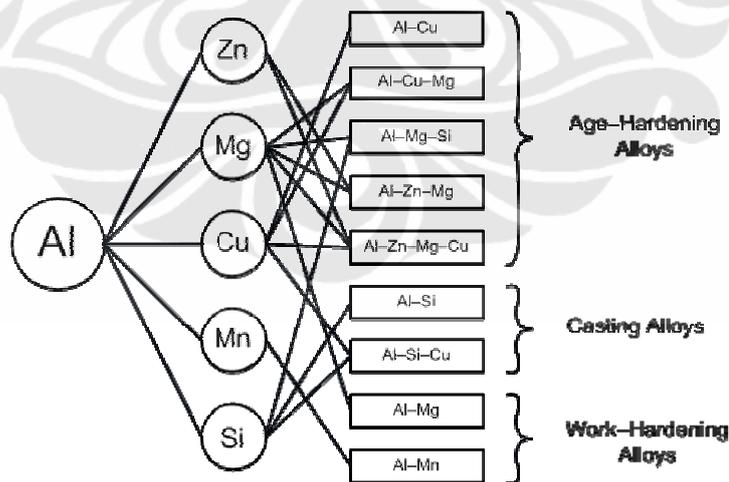
Selain memiliki beberapa kelebihan, aluminium juga mempunyai kelemahan–kelemahan sebagai berikut<sup>[8]</sup>:

- Mudah mengalami oksidasi pada proses pengecoran, mengakibatkan *dross* ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) mudah terbentuk.
- Sangat mudah mengikat gas hidrogen dalam kondisi cair  

$$3\text{H}_2\text{O} + 2\text{Al} \rightarrow 6\text{H} + \text{Al}_2\text{O}_3 \dots \dots \dots (2.1)$$
- Mengalami penyusutan yang cukup tinggi 3,5 – 8,5%

Salah satu cara untuk meminimalisir kelemahan – kelemahan tersebut adalah dengan cara memodifikasi kandungan unsur paduan dan melakukan variasi perlakuan panas<sup>[9]</sup>.

Unsur – unsur yang paling sering digunakan sebagai paduan selain silikon adalah tembaga, mangan, magnesium, dan seng<sup>[1]</sup>.



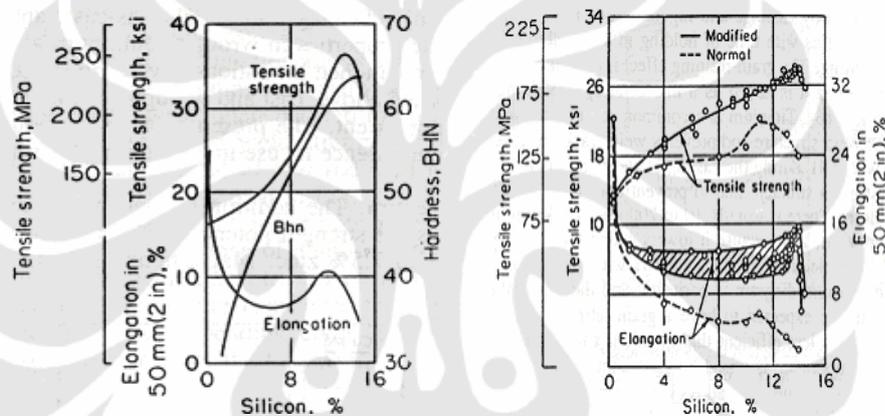
Gambar 2. 1 Prinsip dasar paduan Aluminium<sup>[1]</sup>

Pengaruh paduan dalam aluminium adalah untuk memperbaiki kelemahan–kelemahan pada sifat aluminium murni seperti kekuatan yang kurang, kelarutan hidrogen, dan *castability* (kemampuan cor) yang kurang baik.

Berikut adalah beberapa unsur paduan aluminium yang sering ditemui pada industri otomotif :

a. Silikon (Si)

Silikon adalah unsur yang paling umum digunakan pada pengecoran paduan aluminium dan mampu memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan karakteristik coran. Dengan penambahan silikon maka kekuatan, fluiditas, ketahanan terhadap *hot tear*, ketahanan korosi dan mampu cor aluminium akan meningkat<sup>[1]</sup>. Selain itu, penambahan silikon juga berdampak terhadap perubahan sifat mekanis, seperti tampak pada gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Pengaruh kandungan Si terhadap sifat mekanis paduan Al-Si dalam kondisi *as-cast* (a) kuat tarik (b) kekerasan<sup>[1]</sup>

b. Besi (Fe)

Pada paduan aluminium silikon, kadar besi harus dijaga dibawah 1.3%<sup>[1]</sup>. Pengaruh penambahan besi pada paduan paduan aluminium adalah<sup>[10]</sup>:

- Meningkatkan ketahanan terhadap *hot tearing*
- Mengurangi kecenderungan terjadinya soldering pada *die casting*
- Pada kadar yang tinggi akan menyebabkan penurunan keuletan

Besi merupakan unsur pengotor yang sering ditemukan dalam paduan aluminium. Kelarutannya yang rendah pada fase padat menjadikan hampir seluruh unsur besi yang hadir dengan jumlah yang lebih besar dari 0.05% akan membentuk fasa intermetalik seperti  $FeAl_3$ ,  $FeMnAl_6$ ,  $\alpha-AlFeSi$  dan  $\beta-AlFeSi$ . Fasa tersebut tidak larut dan akan memberikan peningkatan kekuatan terutama pada temperatur tinggi, namun juga bisa menyebabkan penggetasan pada mikrostruktur. Karena kelarutannya yang terbatas, penambahan unsur Fe biasa

dilakukan untuk aplikasi yang membutuhkan konduktivitas listrik yang baik dengan kekuatan yang baik serta ketahanan *creep* pada temperatur tinggi. Fe juga akan mengurangi kemungkinan terjadinya *die sticking* atau *soldering* pada *die casting* serta menurunkan nilai *ductility* dari paduan aluminium<sup>[11]</sup>.

Unsur paduan besi dengan penambahan mangan pada rentang komposisi sekitar eutektik akan menghasilkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan pada temperatur ruang dan terus mempertahankan kekuatannya pada temperatur tinggi. Hal ini didasari pada kehalusan butir akibat fasa intermetalik yang terdispersi halus dan merata<sup>[12]</sup>.

Penelitian yang dilakukan oleh Gowri, S. dan Samuael, F.H.<sup>[13]</sup> mengemukakan bahwa peningkatan kadar Fe dapat menurunkan nilai fluiditas aluminium cair tanpa melibatkan perubahan tegangan permukaan yang signifikan akibat meningkatnya jumlah fasa-fasa Fe tidak larut (*insoluble*) yang terbentuk dalam paduan. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Warmuzek *et.al.* menyebutkan bahwa peningkatan kandungan Fe serta unsur-unsur lainnya seperti Mn dan Cr dapat menyebabkan naiknya temperatur liquidus pada paduan Al-Si serta dapat membentuk tahap temperatur tinggi yang pertama dari pengendapan fasa  $\alpha$ -Al(Fe,Mn)Si<sup>[14]</sup>.

c. Tembaga (Cu)

Dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan fatik tanpa mempengaruhi secara signifikan mampu alir dari aluminium<sup>[15]</sup>.

d. Magnesium (Mg)

Dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, dan mampu perlakuan panas yang baik<sup>[15]</sup>.

e. Mangan (Mn)

Dapat meningkatkan kekuatan dengan membentuk fasa intermetalik antara Al – Fe – Mn – Si dengan jumlah Mn yang sedikit<sup>[15]</sup>.

f. Stronsium (Sr)

Digunakan sebagai *modifier* pada proses pengecoran aluminium dengan paduan silikon. Stronsium memodifikasi kristal silikon primer agar menjadi lebih halus<sup>[15]</sup>.

g. Titanium (Ti)

Dengan tambahan aluminium dan boron membentuk senyawa Al-Ti-B sebagai penghalus butir<sup>[15]</sup>.

### 2.2.2 Sistem Penamaan Aluminium

Seperti pada material lainnya, sistem penamaan sangat diperlukan bagi material paduan aluminium mengingat jenisnya yang sangat banyak. Hampir setiap negara industri besar memiliki standar masing-masing yang mengatur tentang penamaan material aluminium. Salah satu yang paling banyak digunakan adalah standar *Aluminium Association* (AA) yang dipakai oleh negara Amerika Serikat<sup>[8]</sup>.

Dalam sistem penamaan jenis standar *Aluminium Association* (AA) ini, terdapat 4 digit angka dengan terdapat titik diantara digit ketiga dan keempat. Masing – masing digit tersebut terdapat arti sendiri – sendiri, yaitu<sup>[8]</sup>:

- Digit pertama menunjukkan jenis paduan utama
- Digit kedua dan ketiga menunjukkan paduan tambahan yang lebih spesifik (digit angka ini tidak bersifat signifikan akan tetapi unik)
- Digit keempat: Apabila 0 berarti paduan casting dan apabila 1 atau 2 menunjukkan ingot.

Pada beberapa jenis paduan tertentu seperti 356.0 mempunyai beberapa variasi lagi sehingga ditandai dengan menggunakan huruf di depan angka pertama, yaitu seperti A356.0 atau B356.0<sup>[8]</sup>.

Paduan utama yang ditandai dengan angka pertama digolongkan sebagai berikut<sup>[8]</sup>:

- 1xx.x, aluminium murni (99% atau lebih)
- 2xx.x, aluminium-tembaga alloys
- 3xx.x, aluminium-silikon + tembaga dan/atau magnesium
- 4xx.x, aluminium-silikon
- 5xx.x, aluminium-magnesium
- 7xx.x, aluminium-seng
- 8xx.x, aluminium-timah
- 9xx.x, aluminium + elemen yang lain.
- 6xx.x, seri yang tidak terpakai

Dalam penamaan tipe 1xx.x digit kedua dan ketiga menandakan nilai minimum kadungan aluminium (99% atau lebih besar); digit ini menandakan dua nilai desimal<sup>[8]</sup>. Misalnya AA170.0 artinya mengandung minimum 99.70% aluminium. Dalam 2xx.x sampai 8xx.x digit kedua dan ketiga hanya menunjukkan identitas individu dari paduan tersebut secara spesifik.

Pada sistem penamaan *Aluminum Association Casting Temper*, masing – masing paduan aluminium dipisah – pisahkan menggunakan huruf dan angka untuk menunjukkan jenis perlakuan panas yang telah diaplikasikan<sup>[8]</sup>. Sistem penamaan tersebut diberikan sebagai berikut:

- F, hasil pengecoran tanpa perlakuan panas tambahan (*as cast*)
- O, dipanaskan sampai suhu tertentu (*annealed*)
- T4, *solution heat treated* dan penuaan alami pada temperatur ruang
- T5, *precipitation hardened*
- T6, *solution treated, quenched, dan precipitation hardened*
- T7, *solution heat treated, quenched, dan overaged*

Jenis perlakuan panasnya diberikan langsung mengikuti nama paduan misalnya AA333-T4.

### 2.2.3 Paduan Aluminium Silikon

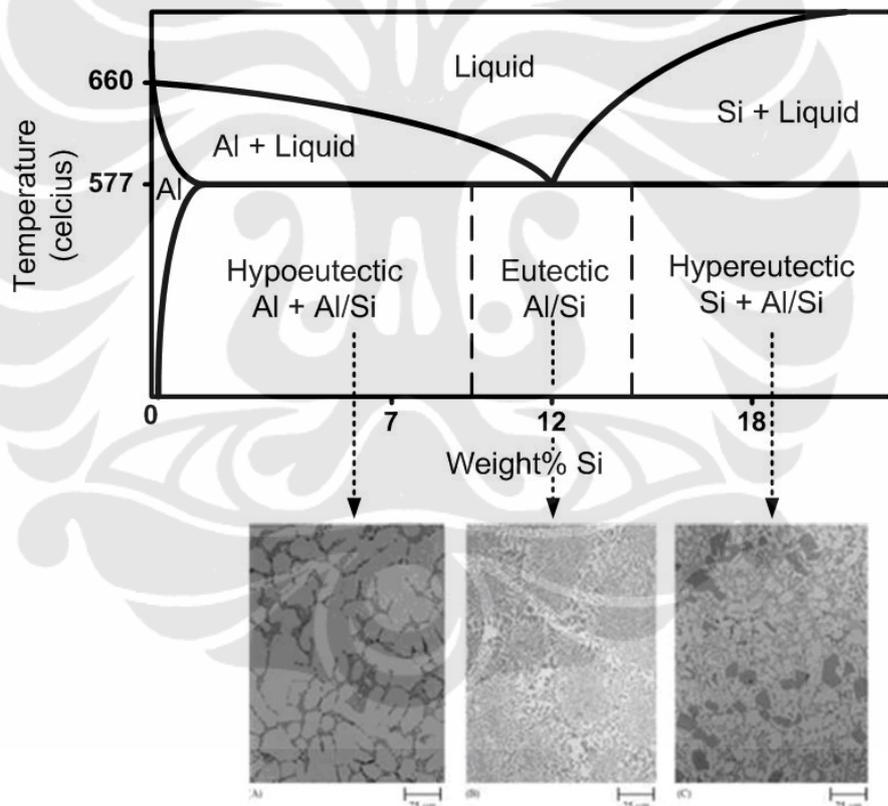
Berdasarkan diagram fasa Al-Si, maka paduan aluminium silikon dapat dibagi menjadi tiga daerah utama, yaitu hipoeutektik, eutektik, dan hipereutektik. Melihat diagram fasa tersebut, maka paduan aluminium silikon disebut hipoeutektik jika kandungan silikonnya kurang dari 12%, eutektik jika kandungan silikonnya 12%, dan hipereutektik jika kandungan silikonnya lebih dari 12%<sup>[16]</sup>.

Pada Al-Si komposisi hipoeutektik, pembekuan terjadi melalui fasa cair–padat (lumpur). Struktur akhir komposisi ini adalah struktur yang kaya akan aluminium, dan sebagai fasa utamanya adalah fasa  $\alpha$  dengan struktur eutektik sebagai unsur tambahan<sup>[6]</sup>. Contoh paduan aluminium komposisi hipoeutektik ini adalah paduan 443.0<sup>[4]</sup>.

Komposisi eutektik merupakan daerah dimana paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya tanpa harus melalui fasa lumpur terlebih dahulu<sup>[6]</sup>. Paduan 413.0 merupakan salah satu jenis paduan aluminium jenis ini<sup>[4]</sup>.

Sedangkan pada komposisi hipereutektik karena memiliki kandungan Si yang lebih besar dari 12% maka komposisi ini memiliki struktur yang kaya akan Si dengan fasa eutektik sebagai tambahan<sup>[6]</sup>. Pada komposisi hipereutektik ini, Si primer yang terbentuk memiliki bentuk yang kasar sehingga sifat mekanisnya relatif berkurang<sup>[16]</sup>. Contoh paduan aluminium komposisi hipereutektik ini adalah paduan 390.0 dan 393.0<sup>[4]</sup>.

Struktur utama dari ketiga komposisi paduan ini adalah berupa fasa  $\alpha$ -Al yang memiliki konsentrasi aluminium sangat besar<sup>[6]</sup>. Selain fasa  $\alpha$ -Al, terdapat juga fasa  $\beta$ -Al yang merupakan partikel – partikel Si yang tidak larut dalam fasa  $\alpha$ -Al. Sifat struktur fasa  $\alpha$ -Al dan  $\beta$ -Al ini akan selalu terpisah dari fasa padatnya baik dalam paduan hipoeutektik, eutektik, maupun hipereutektik.



**Gambar 2.3** Diagram fasa paduan aluminium-silikon beserta skematis fasa yang terbentuk pada struktur mikronya<sup>[16]</sup>

### 2.3 INTERMETALIK BESI (Fe) PADA PADUAN Al-Si

Fe merupakan salah satu pengotor yang selalu muncul pada paduan Al-Si<sup>[17]</sup>. Sumber utama munculnya Fe dalam proses pengecoran adalah dari peralatan peleburan dan dari *scrap* yang dilebur ulang. Penggunaan *scrap* dalam

produksi komponen utama yang bertujuan untuk mengurangi biaya produksi paduan dapat meningkatkan kadar Fe mencapai 1.5 - 2.0% pada paduan tersebut<sup>[2]</sup>. Fe juga tidak dapat dihilangkan begitu saja dari aluminium cair dengan cara perlakuan pengecoran biasa. Akan tetapi dengan netralisasi dan/atau metode modifikasi dapat mengurangi efek negatif dari intermetalik Fe<sup>[2]</sup>.

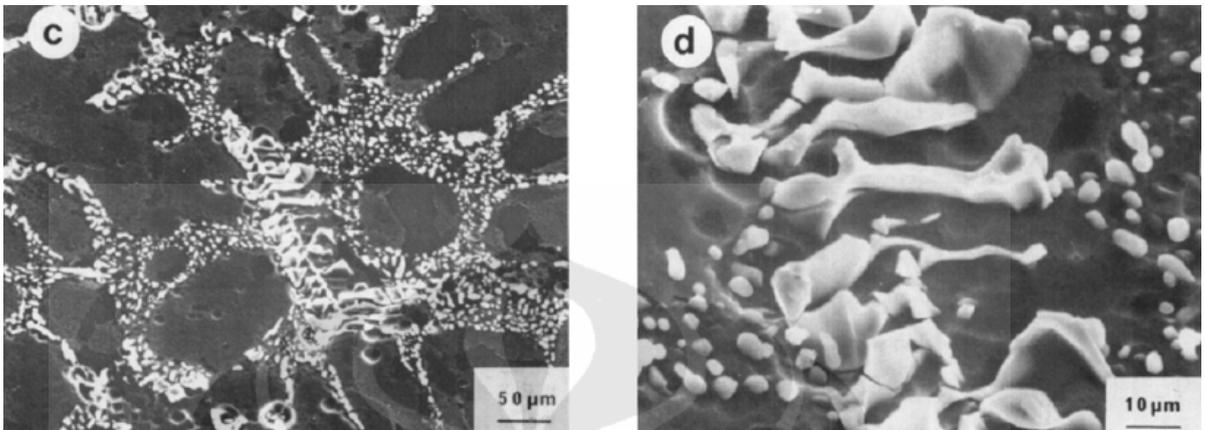
Karena mempunyai kelarutan yang sangat tinggi dalam aluminium cair, maka Fe dapat larut dalam cairan aluminium dalam semua tahapan produksi lelehan aluminium cair. Akan tetapi Fe mempunyai kelarutan yang rendah dalam Al solid (~0,05%), sehingga sampai akhir pembekuan sisa Fe akan membeku dalam bentuk intermetalik fasa kedua (*second phase intermetallic*) dan berkombinasi dengan aluminium maupun unsur lain, dimana walaupun dalam jumlah yang sedikit dapat menyebabkan efek yang buruk pada sifat – sifat mekanis<sup>[1]</sup>. Pada paduan AlSi, walaupun hanya dalam jumlah yang kecil, kehadiran besi dapat menurunkan keuletan dari paduan yang disebabkan presipitasi fasa  $\beta$ -AlFeSi<sup>[18]</sup> (detail dari fasa ini akan dijelaskan pada bagian berikutnya) dalam bentuk *platelet* yang tertahan (*intercepted platelets*). *Platelet*  $\beta$ -AlFeSi ini berperan dalam munculnya tegangan baru, dimana dapat menyebabkan material paduan tersebut menjadi rapuh<sup>[18]</sup>.

### 2.3.1 Komposisi Kimia dan Morfologi Fasa Intermetalik

Diantara beberapa jenis intermetalik yang terdapat dalam paduan Al-Si, yang paling banyak menyita perhatian adalah fasa  $\alpha$ -AlFeSi dan fasa  $\beta$ -AlFeSi. Bentuk atau morfologi dari fasa intermetalik yang mengandung Fe disebut sebagai penyebab efek negatif pada paduan ini, dimana fasa yang berbentuk jarum, yaitu fasa  $\beta$ -AlFeSi, cenderung lebih memberikan efek yang buruk dibandingkan dengan fasa *chinese script*, yaitu fasa  $\alpha$ -AlFeSi<sup>[2]</sup>.

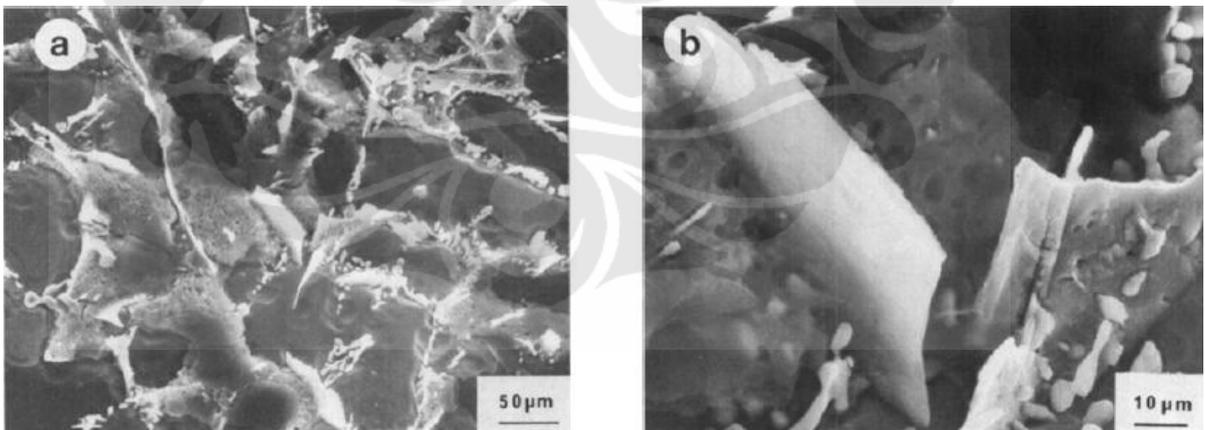
Komposisi fasa  $\alpha$ -AlFeSi adalah  $Al_8Fe_2Si$  (31.6% Fe, 7.8% Si) dan dalam beberapa literatur ada yang menyebutkan  $Al_{15}Fe_3Si_2$  (30.7% Fe, 10.2% Si), dimana komposisi Fe dan Si biasanya berkisar antara 30 - 33% Fe dan 6 - 12% Si<sup>[2]</sup>. Fasa  $\alpha$ -AlFeSi tersebut mempunyai struktur heksagonal dengan parameter  $a = 12.3 \text{ \AA}$ ,  $c = 23.6 \text{ \AA}$ , dan berat jenisnya  $3.58 \text{ g/cm}^3$ . Fasa ini membentuk morfologi seperti tulisan china dan biasa disebut "*chinese script*" dan memiliki

ikatan dengan matrix Al yang lebih kuat jika dibandingkan dengan fasa  $\beta$ -AlFeSi<sup>[3]</sup>.



**Gambar 2. 4** Gambar mikrostruktur fasa  $\alpha$ -Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sup>[19]</sup>.

Komposisi fasa  $\beta$ -AlFeSi adalah Al<sub>5</sub>FeSi (25.6% Fe, 12.8% Si). Pada literatur lain menyebutkan bahwa komposisi fasa beta adalah 27% Fe dan 13.5% Si (dengan interval 25-30% Fe, 12-15% Si)<sup>[2]</sup>. Fasa  $\beta$ -AlFeSi tersebut mempunyai struktur monoklinik dengan parameter  $a = b = 6.12 \text{ \AA}$ ,  $c = 41.5 \text{ \AA}$ ,  $\angle = 91^\circ$ , dan berat jenisnya  $3.30 - 3.35 \text{ g/cm}^3$ . Mikrostruktur fasa  $\beta$ -AlFeSi tersebut bentuknya terlihat seperti *platelet* tipis (jarum - jarum).



**Gambar 2. 5** Gambar mikrostruktur fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi<sup>[19]</sup>.

Fasa  $\alpha$ -AlFeSi dan  $\beta$ -AlFeSi memiliki jenis pertumbuhan yang berbeda<sup>[2]</sup>. Fasa  $\alpha$ -AlFeSi terlihat tidak beraturan, pertumbuhan kristal tersebut menyesuaikan dengan bentuk yang rumit dari ruang antar dendrit yang terbentuk selama pembekuan. Fasa  $\alpha$ -AlFeSi tersebut mempunyai bentuk yang tidak bersegi sehingga menghasilkan sifat ikatan yang lebih baik dengan aluminium matriks.

Bentuk dari partikel fasa ini dikontrol oleh temperatur gradien dan oleh difusi atom yang masuk ke aluminium cair<sup>[2]</sup>. Terjadinya tipe pertumbuhan ini terjadi pada kecepatan pendinginan yang tinggi.

Fasa  $\beta$ -AlFeSi tumbuh dengan menyamping dan bersudut dimana mempunyai daya ikat yang lemah dengan matriks aluminium. tipe pertumbuhan ini terjadi pada saat kecepatan pembekuan relatif lambat<sup>[2]</sup>.

### 2.3.2 Pengaruh Unsur Lain terhadap Pembentukan Fasa Intermetalik

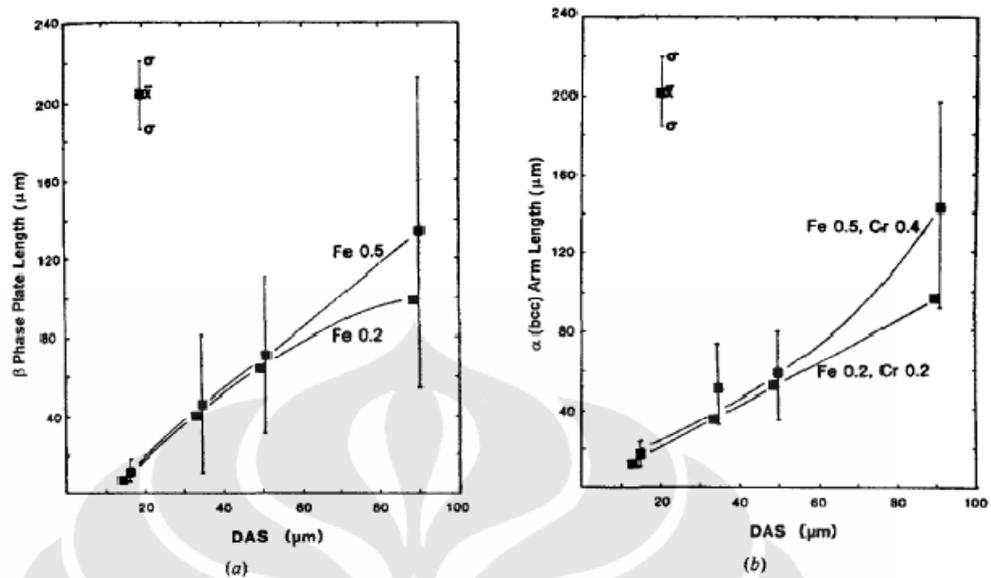
Dalam bagian ini akan dibahas mengenai pembentukan fasa intermetalik yang dipengaruhi oleh beberapa unsur paduan, aditif, dan kehadiran pengotor dalam paduan. Diantara hal tersebut, besi merupakan hal yang paling mempunyai pengaruh besar. Selain itu, unsur lain seperti mangan, kromium, berilium, dan magnesium juga mempunyai pengaruh yang cukup signifikan<sup>[2]</sup>.

#### 2.3.2.1 Pengaruh kadar Fe

Pada umumnya, panjang fasa  $\beta$ -AlFeSi meningkat apabila terjadi peningkatan kadar Fe dan panjangnya akan berkurang apabila terjadi penurunan waktu pendinginan<sup>[19]</sup>.

Dengan meningkatnya kadar Fe sebanding dengan meningkatnya fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi terutama pada kandungan Fe diatas 0.7 wt.% Fe<sup>[20]</sup>. Efek negatif dari Fe dapat diminimalisasi dengan beberapa teknik seperti *superheating*, penambahan unsur Mn, Sr, maupun K.

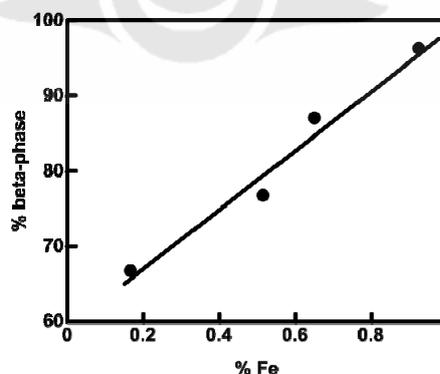
Gustaffson *et. al.* menginvestigasi mikrostruktur pada paduan aluminium (Al-7 pct Si-0.3 pct Mg, atau A356) sebagai fungsi dari kadar Fe dan Cr dan kecepatan pembekuan. Mereka meneliti bahwa panjang platelet fasa  $\beta$ -AlFeSi dan lengan  $\alpha$ -AlFeSi akan meningkat jika kadar Fe ditingkatkan dan kecepatan pendinginan diturunkan<sup>[19]</sup>. Pernyataan tersebut digambarkan pada grafik 2.6, dimana kecepatan pendinginan diindikasikan dengan istilah *dendrite arm spacing* (DAS). Jika kadar besi dinaikkan, maka jumlah platelet fasa  $\beta$ -AlFeSi tidak akan terjadi peningkatan yang signifikan, akan tetapi ukurannya akan meningkat. Dan apabila kadar Fe lebih dari 0.7% akan membentuk partikel yang sangat besar.



**Gambar 2.6** Perhitungan panjang platelet  $\alpha$  dan  $\beta$ : (a) platelet  $\beta$  pada paduan A356 dengan variasi kadar Fe; (b) platelet  $\alpha$  pada paduan A356 dengan variasi kadar Fe dan kromium<sup>[19]</sup>.

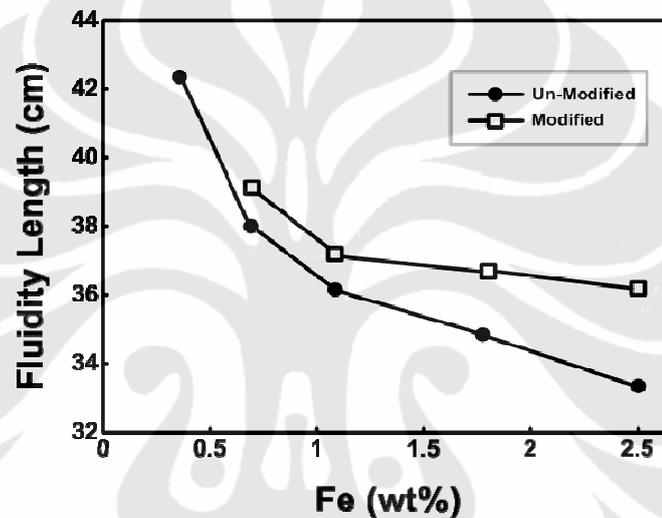
Evensen dan Pedersen meneliti pengaruh besi dalam mikrostruktur paduan  $\text{AlSi}_7\text{Mg}_{0.3}$  dengan menambahkan besi dengan kadar 0.15 sampai 0.8%. Dari pengujian dihasilkan ukuran dan volume dari fasa  $\beta$ -AlFeSi yang terbentuk akan meningkat seiring meningkatnya kadar besi dan kecepatan pembekuan<sup>[2]</sup>.

Yaneva *et. al.* meneliti betuk dari fasa intermetalik pada paduan Al-Si dengan penambahan Fe dan Mn dengan kadar yang berbeda – beda. Hasil dari penelitian tersebut adalah bahwa presentase dari fasa  $\beta$ -AlFeSi yang terbentuk akan meningkat dengan cepat apabila terjadi peningkatan kadar Fe sesuai dengan gambar 2.7<sup>[2]</sup>



**Gambar 2.7** Hubungan antara presentase kadar besi dengan presentase fasa  $\beta$  pada paduan Al-Si<sup>[2]</sup>.

Pada studi mengenai paduan Al-Si-Cu, Samuel *et. al.* menerangkan bahwa dengan meningkatnya kadar besi maka dapat menghasilkan terjadinya presipitasi fasa  $\beta$ -AlFeSi yang panjang dan tipis dan jarum – jarum. Mereka juga menemukan bahwa jarum – jarum tersebut sering bercabang dan membentuk jarum – jarum yang lainnya sehingga dapat membentuk lubang – lubang *shrinkage* karena ketidakmampuan aluminium cair untuk masuk diantara cabang – cabang jarum tersebut<sup>[21]</sup>, sehingga sifat mampu alirnya akan berkurang.



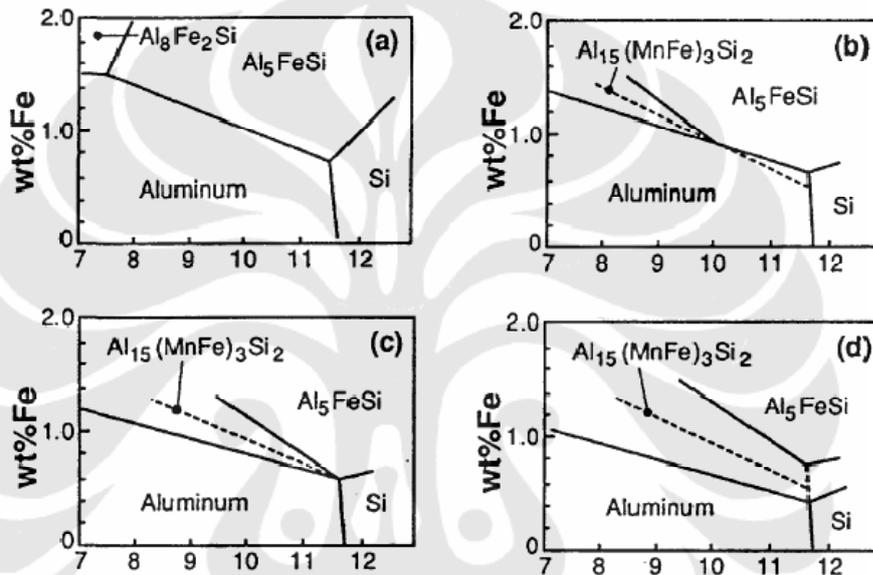
**Gambar 2. 8** Pengaruh Fe terhadap fluiditas pada paduan aluminium 413 dengan penambahan modifier Sr<sup>[21]</sup>.

### 2.3.2.2 Pengaruh unsur lain

#### a. Mangan

Mangan merupakan unsur yang biasa ditambahkan untuk menjadi aditif yang berguna untuk menetralisasi efek negatif dari besi dan memodifikasi morfologi dan tipe intermetalik yang terbentuk<sup>[19]</sup>. Mangan merupakan aditif yang paling baik untuk melakukan netralisasi efek negatif Fe diantara unsur lainnya seperti kromium (Cr), kobalt (Co), molibdenum (Mo), dan nikel (Ni)<sup>[2]</sup>. Penambahan mangan dengan efektif dapat berkontribusi dalam presipitasi intermetalik besi dan membentuk fasal  $\alpha$ -AlFeSi-*chinese script*  $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ , atau membentuk endapan partikel jika ditambahkan kromium<sup>[2]</sup>.

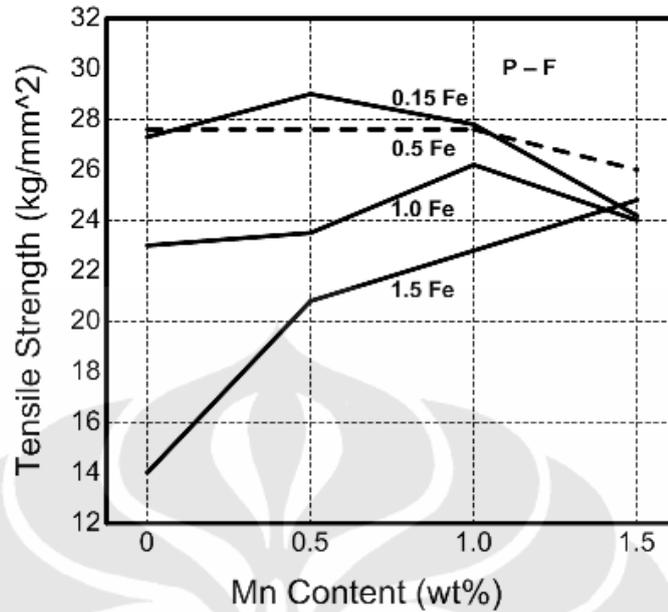
Dari diagram fasa Al-Si-Fe dibawah, dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya kadar Mn maka dapat meningkatkan lebar daerah fasa  $\alpha$ -AlFeMnSi pada diagram tersebut<sup>[22]</sup>. Dan sebagai hasilnya maka kristalisasi fasa  $\alpha$ -AlFeMnSi dapat terjadi meskipun dengan kadar besi yang tinggi. Morfologi dan komposisi kimia fasa ini sangat mirip dengan fasa  $\alpha$ -AlFeSi yang terbentuk tanpa mangan, kecuali beberapa larutan mangan yang ditemukan dalam kasus – kasus sebelumnya.



**Gambar 2.9** Perubahan diagram fasa Al-Fe-Si pada penambahan Mn (a) 0 % dan (b) 0.4 % Mn<sup>[22]</sup>.

Apabila berdasar pada spesifikasi ANSI/ASTM maka apabila kadar Fe melebihi 0.45% maka kadar Mn tidak boleh kurang dari setengah kadar Fe tersebut<sup>[23]</sup>. Disebutkan bahwa jika kadar Mn setengah dari kadar Fe maka dapat memecahkan jarum – jarum panjang dari fasa  $\beta$  menjadi lebih pendek – pendek sehingga dapat meningkatkan sifat – sifat mekanis dan sifat mampu cor.

Mn juga diketahui dapat mengubah morfologi senyawa Fe menjadi *chinese script* dimana menyebabkan kurangnya porositas yang terbentuk dan meningkatkan *feedability* dari paduan dimana implikasinya adalah dapat mengurangi terjadinya *solidification shrinkage*<sup>[2]</sup>.



**Gambar 2.10** Efek kadar Mn terhadap kekuatan tarik pada paduan Al-9,2Si-4Cu-0,5Mg dengan variasi kadar Fe<sup>[2]</sup>.

Selain itu, dengan ditambahkan Mn dapat meningkatkan kekuatan tarik pada paduan Al-Si akan tetapi hanya pada kadar Fe lebih dari 1%<sup>[2]</sup>. Namun apabila rasio Mn/Fe lebih dari batas yang ditentukan maka dapat menyebabkan efek negatif seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.10 diatas.

b. Kromium

Kromium memiliki efek yang sama seperti Mangan. Gustafson *et. al.* menyebutkan bahwa morfologi fasa  $\beta$ -AlFeSi dapat diubah menjadi *Chinese script* dengan penambahan kromium pada paduan Al-7Si-0.3Mg dan kadar Fe sebesar 0.52%<sup>[19]</sup>. Disebutkan pula bahwa dengan penambahan kromium maka dapat terbentuk intermetalik kompleks yang disebut “*sludge*” yang terbentuk oleh aluminium, silikon, besi, mangan, dan kromium<sup>[24]</sup>. Partikel *sludge* ini memiliki titik lebur yang tinggi dan mempunyai sifat *high specific gravity*. Untuk menghindari terbentuknya *sludge* tersebut, maka cara “*sludge factor*” dapat digunakan. Dengan temperature pengecoran sekitar 650 °C maka *sludge factor* normalnya adalah 1.8.

$$Sludge\ Factor\ (SF) = \%Fe + 2 (\%Mn) + 3 (\%Cr) \dots \dots \dots (2.2)$$

c. Berilium

Karena sifat *physicochemical*-nya yang unik, berilium selalu ditambahkan pada pengecoran aluminium untuk mengurangi tingkat oksidasi pada aluminium cair sehingga akan didapatkan paduan yang lebih bersih dan murni<sup>[3]</sup>. Berilium apabila dibandingkan dengan Mg akan mempunyai diameter atom yang paling kecil dan titik leburnya paling tinggi. Hal tersebut menyebabkan mudahnya difusi ion berilium ke lapisan oksida pada permukaan lelehan dan akan menyebabkan kontraksi oksida tersebut, sehingga implikasinya akan mempertebal lapisan tersebut dan akan meningkatkan perlindungan yang lebih baik dari serangan oksigen dan nitrogen dari atmosfer.

Penambahan berilium juga dapat menyebabkan timbulnya presipitasi intermetalik Fe yaitu  $\text{Al}_5\text{BeFeSi}$  yang bentuknya lebih kecil dan lebih bulat apabila dibandingkan dengan bentuk morfologi  $\text{Al}_5\text{FeSi}$ <sup>[3]</sup>. Penambahan berilium juga dapat memodifikasi  $\beta\text{-AlFeSi}$  menjadi *chinese script*.

Sifat mekanis paduan aluminium juga akan berubah seiring dengan penambahan berilium. Disebutkan bahwa dengan penambahan sedikit berilium pada  $\text{Al-7\%Si-0.3\%Mg-0.6\%Fe}$  dapat membentuk fasa Be-Fe yang baru yaitu  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{SiBe}$  yang morfologinya berbentuk heksagonal atau *chinese script*, dan hanya akan terlihat di dalam dendrite  $\alpha\text{-Al}$ <sup>[25]</sup>. Mekanisme nukleasi fasa baru ini cukup berbeda dengan fasa  $\beta\text{-AlFeSi}$  dan akan menghasilkan sifat – sifat mekanik yang sangat baik. Kehadiran Be juga menghasilkan terjadinya proses penghalusan butir. Akan tetapi berilium mempunyai kelemahan yaitu sifatnya yang beracun sehingga hanya bisa ditambahkan dalam kadar yang sangat kecil.

d. Magnesium

Magnesium biasanya digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik paduan melalui terbentuknya presipitasi intermetalik  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Disebutkan bahwa dengan penambahan 0.35% Mg pada paduan aluminium 319 dapat mengubah fasa  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  menjadi fasa  $\text{Al}_5\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$ <sup>[22]</sup>. Dengan meningkatnya kadar Mg maka fraksi volume juga akan meningkat pada fasa ini.

Samuel *et. al.* menjelaskan bahwa dengan penambahan magnesium mencapai 0.7 wt% dalam paduan Al-0.05 wt% Si-0.11 wt% Fe menyebabkan timbulnya presipitasi pada fasa  $\alpha$ -AlFeSi<sup>[26]</sup>. Magnesium juga memiliki kecenderungan untuk mengurangi tegangan permukaan dari partikel fasa  $\alpha$ -AlFeSi, sehingga menghasilkan bentuk yang lebih *rounded*<sup>[27]</sup>.

**Tabel 2. 1** Pengaruh berbagai unsur paduan terhadap fasa intermetalik Al-Fe-Si<sup>[28]</sup>

Parameter	Efek yang mungkin terjadi
Fe	Membentuk fasa intermetalik (terutama fasa $\beta$ )
Mn, Cr, Be, Ni, etc	Mengubah fasa $\beta$ menjadi $\alpha$ , tetapi meningkatkan total jumlah fasa intermetalik yang kaya akan Fe
Mg	Mengubah fasa $\beta$ menjadi $\pi$
P	Mendorong pembentukan fasa $\beta$
Sr	Mendorong pemutusan dan perubahan fasa jarum yang panjang menjadi lebih pendek pada paduan yang kaya akan intermetalik fasa $\beta$
Cooling rate	Kecepatan pendinginan yang rendah akan mendorong terbentuknya fasa $\beta$
Melt superheating	Menghaluskan dan mengurangi fasa intermetalik serta menghindari terbentuknya fasa lumpur

### 2.3.3 Modifikasi Fasa Intermetalik *Monoclinic $\beta$ $\rightarrow$ Cubic $\alpha$*

#### 2.3.3.1 Teori Modifikasi

Prinsip dasar dari proses modifikasi adalah memperbaiki bentuk fasa paduan aluminium silikon dengan cara memberikan unsur tertentu yang disebut *modifier*. Mekanisme modifikasi yang terjadi pada paduan komposisi hipoeutektik Al – Si adalah dengan menurunkan tegangan antarmuka yang akan memperbesar sudut kontak antara paduan tersebut. Hal ini berimbas pada terhambatnya pertumbuhan kristal silikon karena terperangkap oleh matriks aluminium<sup>[4]</sup>. Selain itu, dengan meningkatkan kecepatan pembekuan maka dapat menghasilkan mikrostruktur yang sama seperti hasil modifikasi.

Unsur – unsur yang biasa digunakan untuk *modifier* adalah Stronsium (Sr), Sodium (Na), Fosfor (P), dan Antimony (Sb)<sup>[10]</sup>. Tiap unsur tersebut memiliki

karakteristik dan aplikasi penggunaan masing – masing. Pada paduan Al-Si hipoeutektik biasanya menggunakan Stronsium (Sr) dan Natrium (Na), sedangkan pada paduan Al-Si hipereutektik menggunakan Fosfor (P) dan Antimoni (Sb)<sup>[33]</sup>. Pada pembahasan selanjutnya, ruang lingkup dipersempit hanya pada modifikasi paduan Al-Si hipoeutektik, khususnya stronsium.

Stronsium merupakan unsur yang sudah sangat dikenal sebagai aditif dalam pengecoran aluminium silikon. Stronsium tersebut biasanya digunakan untuk memodifikasi bentuk dari silikon eutektik dari *acicular* menjadi *fibrous* dan disebut *eutectic modification* yang bertujuan untuk meningkatkan sifat – sifat mekanik. Stronsium juga dapat mengubah fasa  $\beta$ -AlFeSi yang partikelnya berbentuk *acicular* menjadi  $\alpha$ -AlFeSi yang bentuknya *chinese script*. Mulazimoglu *et. al.* menyebutkan bahwa dengan hanya menambahkan 0.015% Sr maka dapat menetralkan 0.5% Fe, dimana hal tersebut apabila dibandingkan dengan penambahan Mn atau Cr masih yang paling sedikit<sup>[29]</sup>.

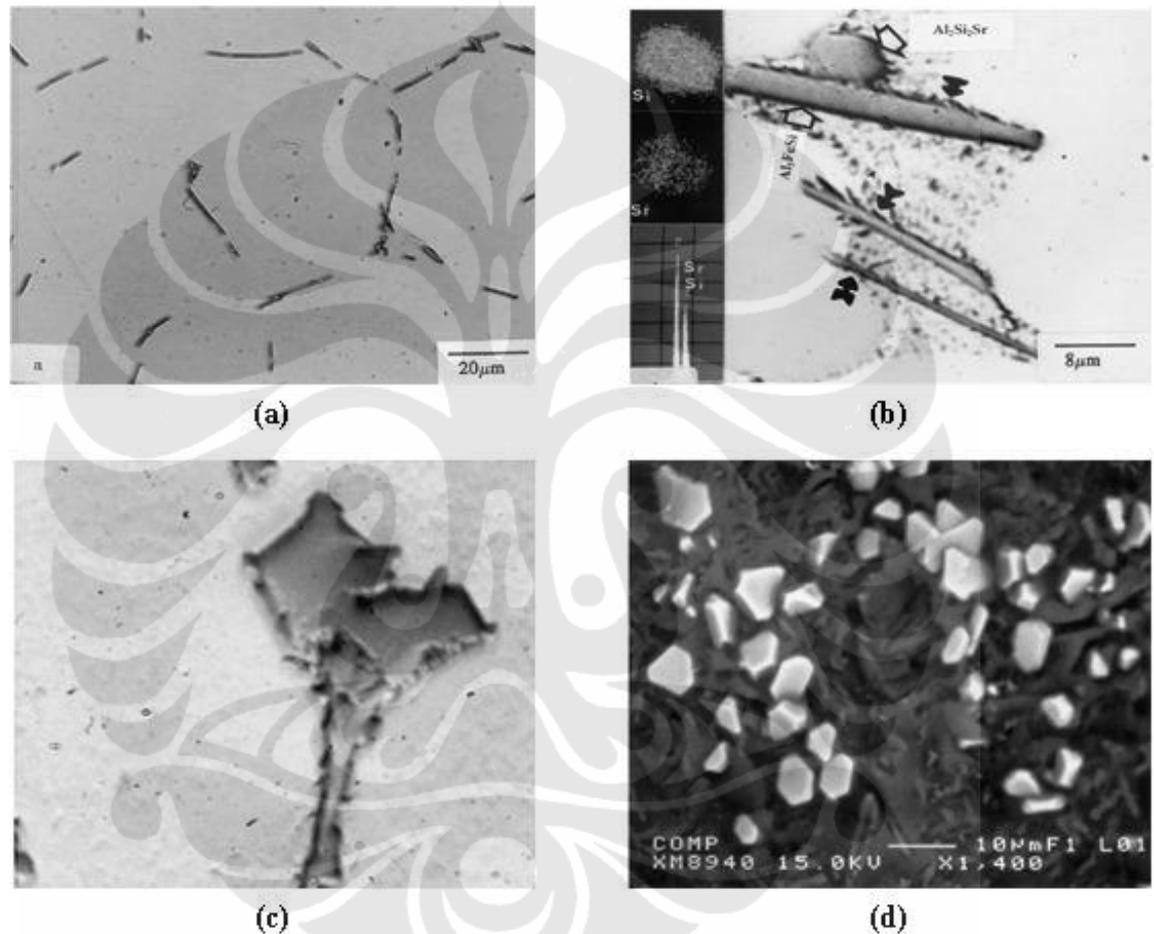
Samuel *et.al.* menjelaskan mekanisme *modifier* Sr yaitu bahwa dengan ditambahkan *modifier* Sr pada paduan aluminium 1xxx dan 6xxx akan terjadi proses adsorpsi Sr pada permukaan fasa  $\alpha$ -AlFeSi yang kemudian dapat mencegah difusi Si pada fasa ini yang implikasinya dapat mengurangi munculnya fasa  $\beta$ -AlFeSi pada mikrostruktur<sup>[30]</sup>.

Dengan penambahan 300 ppm stronsium pada paduan aluminium jenis 319 maka dapat mempercepat fragmentasi dan disolusi fasa  $\beta$ -AlFeSi dan formasi fasa intermetalik  $\text{CuAl}_2$  selama proses pembekuan<sup>[30]</sup>. Fragmentasi fasa  $\beta$ -AlFeSi tersebut dapat dikaitkan dengan peningkatan kekuatan luluh.

Pengaruh stronsium lainnya adalah dapat meningkatkan toleransi paduan aluminium dengan konsentrasi Fe tanpa pengurangan sifat mekanis yang berarti yang disebabkan oleh pengurangan ukuran dan jumlah dari intermetalik besi tersebut. Pada pengujian lain disebutkan bahwa penambahan 0.04% - 0.06% Sr pada paduan A413, 413P, dan 413 dapat memodifikasi ukuran fasa intermetalik dan meningkatkan transformasi fasa  $\beta$ -AlFeSi menjadi  $\alpha$ -AlFeSi<sup>[2]</sup>.

Stronsium memiliki waktu *fading* yang cukup lama hingga sekitar 6 jam untuk kehilangan setengahnya, tetapi untuk konsentrasi Sr yang sedikit, waktu *fading* bisa lebih lama<sup>[27]</sup>. *Fading* merupakan fungsi efektifitas reaksi antara

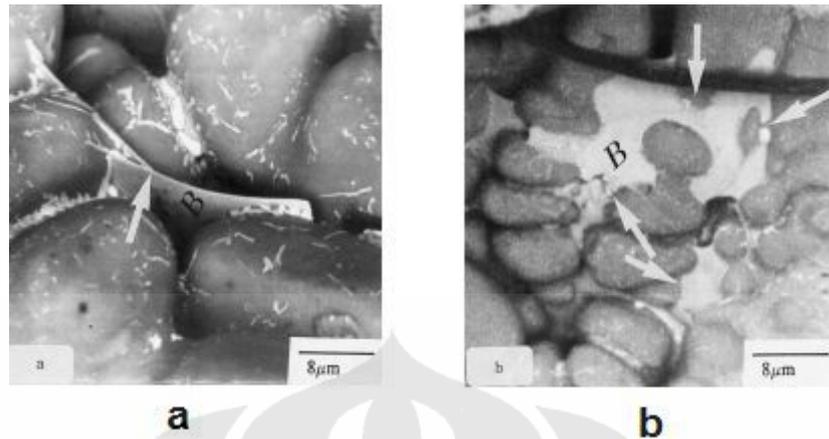
*modifier* dengan logam cair. Efek penambahan stronsium umumnya berhubungan dengan kenaikan porositas hidrogen, hal ini ditandai dengan meningkatnya kelarutan hidrogen atau berkurangnya tegangan permukaan<sup>[38]</sup>. Stronsium biasanya tidak ditambahkan dalam bentuk Sr murni untuk meminimalkan kontak dengan atmosfer (*higroskopis*). Oleh karena itu, Sr biasanya ditambahkan dalam bentuk paduan Al-Sr.



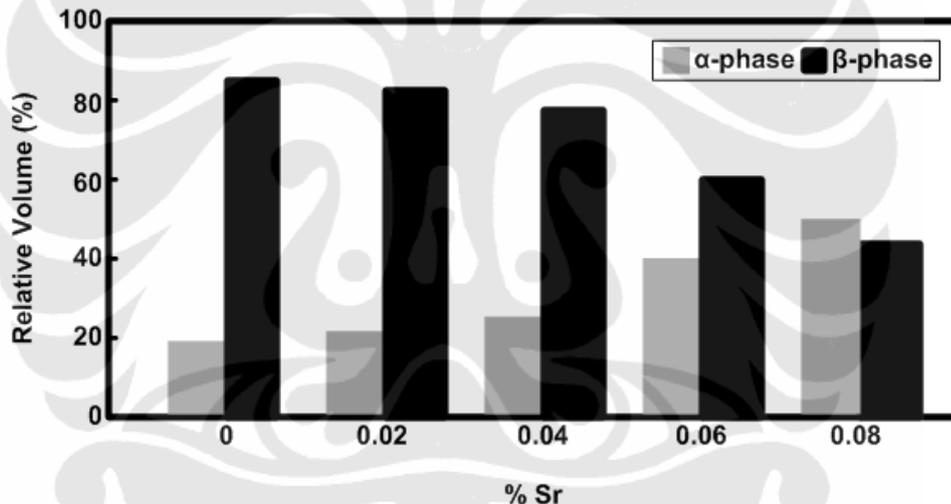
**Gambar 2.11** (a) Paduan Al-0.5Si-0.14Fe dengan Sr 0.001%, memperlihatkan presipitasi fasa  $\beta$ -AlFeSi yang bentuknya jarum – jarum; (b) paduan Al-0.5Si-0.14Fe dengan Sr 0.03%, memperlihatkan bentuk mikrostruktur fasa  $\beta$ -AlFeSi yang bergerigi (*jagged*) (panah hitam), menolak difusi partikel Si didepan antarmuka fasa  $\beta$ -AlFeSi/matriks Al dan membentuk partikel  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ ; (c) paduan Al-0.5Si-0.14Fe dengan Sr 0.05% memperlihatkan presipitasi partikel  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$  yang berbentuk poligonal; dan (d) gambar hasil SEM yang memperlihatkan morfologi dari partikel  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ <sup>[31]</sup>.

Akan tetapi, peningkatan konsentrasi Sr sampai 800 ppm dapat menyebabkan terbentuknya intermetalik baru, seperti  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$  yang berbentuk tajam – tajam seperti jarum<sup>[31]</sup>. Mekanisme pembentukan  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$  ini berdasar





**Gambar 2. 13** Gambar SEM yang memperlihatkan morfologi fasa  $\beta$ -AlFeSi; (a) tanpa penambahan modifier Sr; (b) dengan penambahan 250 ppm Sr<sup>[31]</sup>



**Gambar 2. 14** Persen kadar fasa  $\alpha$ -AlFeSi dan  $\beta$ -AlFeSi sebagai fungsi dari penambahan Strontium pada paduan Aluminium 413<sup>[2]</sup>

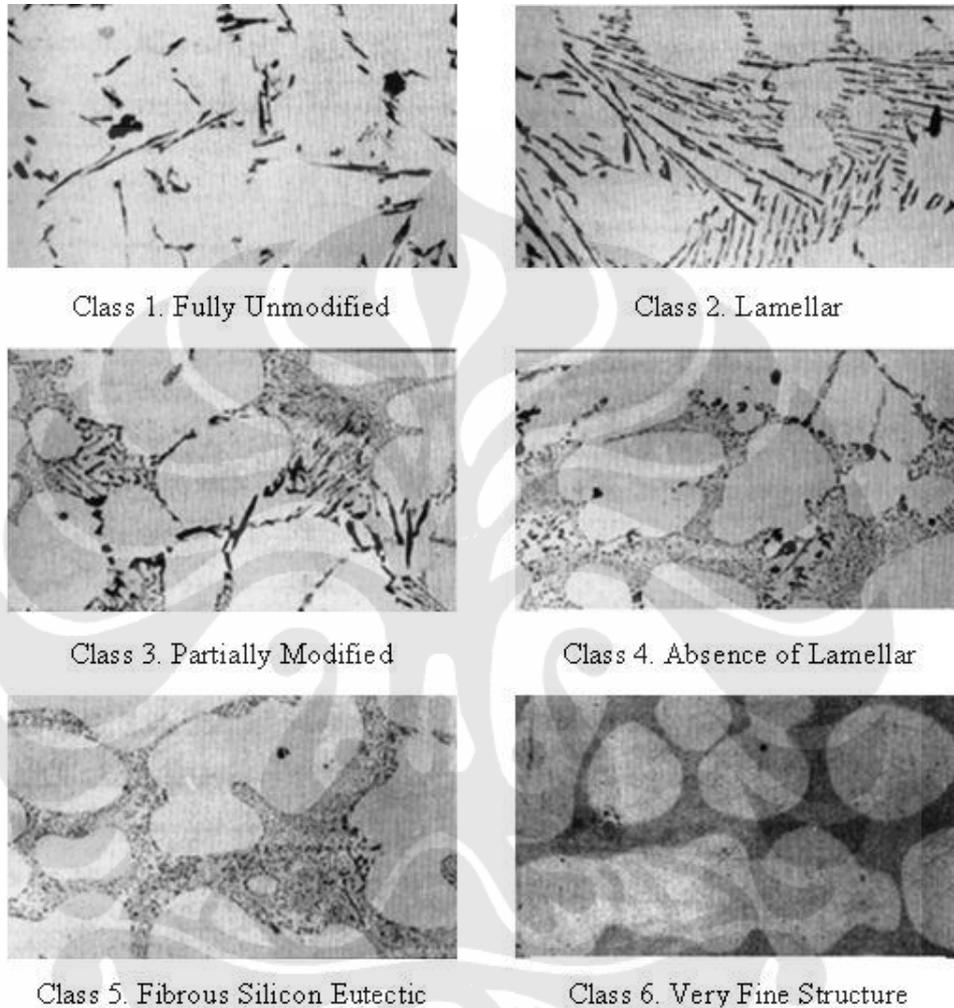
### 2.3.3.2 Pengaruh Modifier

#### a. Pengaruh modifier pada mikrostruktur

Penggunaan *modifier* pada paduan aluminium tuang menyebabkan terjadinya perubahan sifat-sifat paduan aluminium tuang yang disebabkan karena *modifier* tersebut mengubah mikrostruktur dari paduan aluminium tuang. Sifat mekanik suatu material sangat ditentukan oleh mikrostrukturnya yang meliputi<sup>[32]</sup>:

- Ukuran, bentuk, dan distribusi fasa intermetalik.

- Jarak antar lengan dendrit (DAS).
- Ukuran dan bentuk butir.
- Modifikasi fasa eutektik dan penghalusan fasa primer.



**Gambar 2. 15** Sistem kelas pada mikrostruktur modifikasi<sup>[4]</sup>

Mikrostruktur yang mungkin terjadi pada modifikasi paduan hipoeutektik diperlihatkan pada gambar 2.15. Struktur ini dibagi menjadi 6 kelas, dimana kelas 5 merupakan kelas dengan struktur modifikasi yang paling baik, *undermodified* masuk kedalam kelas 2-4, struktur *lamellar* terjadi pada kelas 2<sup>[32]</sup>. Pembentukan struktur yang sangat halus (*supermodified*) terjadi pada kelas 6. Kebanyakan struktur yang terbentuk setelah pengecoran adalah kelas 1-5.

Hal – hal yang mempengaruhi bentuk mikrostruktur hasil modifikasi<sup>[32]</sup>:

- Tipe *modifier*

Seperti disebutkan sebelumnya, masing – masing unsur yang digunakan sebagai *modifier* memiliki karakteristik yang berbeda – beda. Karakteristik yang berbeda – beda tersebut berakibat pada perbedaan mikrostruktur yang dihasilkan dari proses modifikasi .

- Kehadiran pengotor

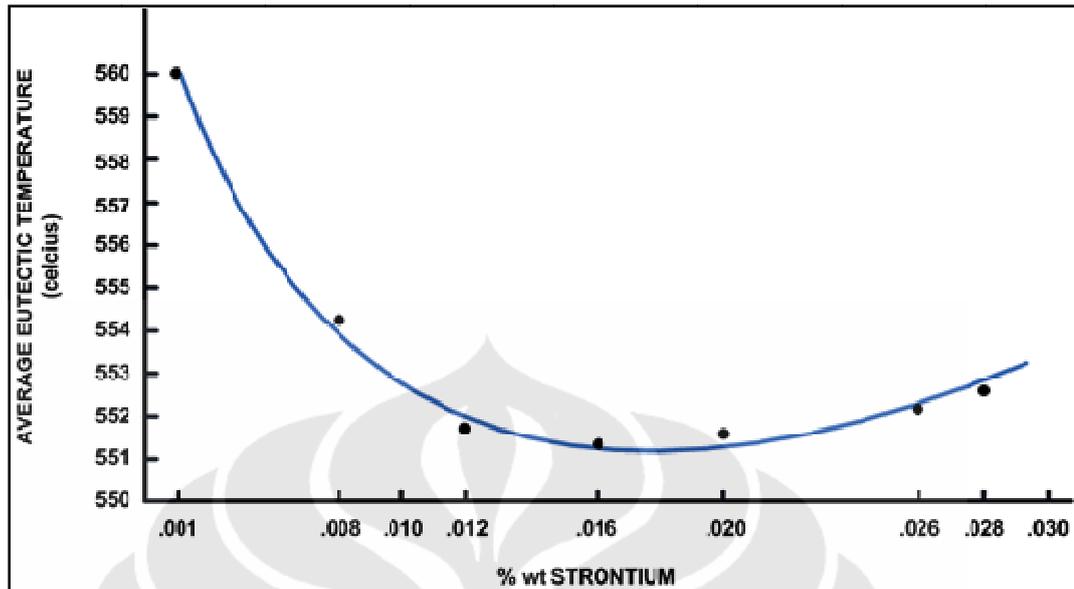
Salah satu pengotor yang harus dihindari pada proses modifikasi adalah fosfor. Jika lelehan aluminium mengandung lebih banyak fosfor, maka akan dibutuhkan modifier yang lebih banyak, dimana akan berimplikasi pada berubahnya waktu tahan (*holding time*) yang dibutuhkan sehingga mikrostruktur hasil *modifier* yang didapat pun tidak maksimal<sup>[32]</sup>.

- Jumlah *modifier* yang digunakan

Pada umumnya, modifier dengan konsentrasi yang lebih tinggi akan menghasilkan mikrostruktur yang lebih baik, paling tidak sampai kelas 5. Apabila terlalu tinggi, maka akan menyebabkan terjadinya overmodifikasi<sup>[32]</sup>.

Banyak penelitian mengenai kadar modifier yang paling tepat. Salah satu penelitian menunjukkan hubungan antara kadar modifier stronsium dengan temperatur eutektik yang dijelaskan seperti pada gambar 2.16. Dari diagram tersebut terlihat bahwa temperatur eutektik menurun sampai kadar stronsium sekitar 0.016% dan kemudian meningkat lagi seiring dengan peningkatan kadar stronsium.

Selain itu, konsentrasi Sr sangat berperan penting dalam mengurangi efek negatif yang dihasilkan oleh fasa intermetalik  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi. Dengan konsentrasi Sr sebesar 250 – 350 ppm dapat mengurangi ukuran fasa intermetalik  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi dengan cara fragmentasi maupun disolusi<sup>[34]</sup>.



Gambar 2. 16 Pengaruh kadar Sr terhadap temperatur eutektik pada paduan 319<sup>[4]</sup>.

- Kecepatan pembekuan

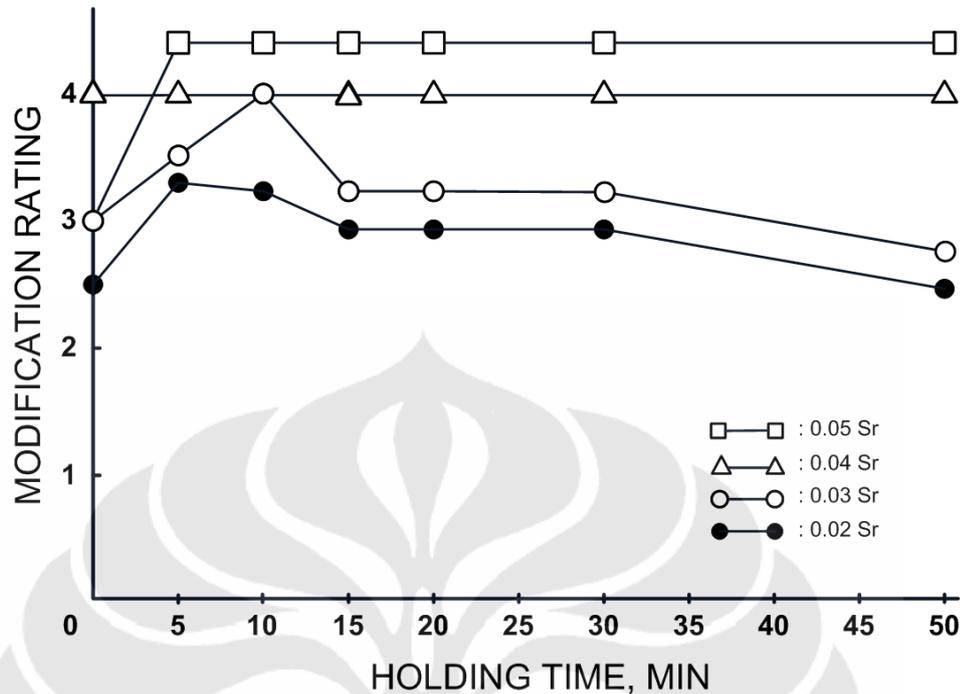
Seperti disebutkan sebelumnya, bahwa struktur yang sama seperti hasil modifikasi dapat dihasilkan dengan kecepatan pendinginan yang sangat tinggi. Hal tersebut berarti bahwa dengan meningkatnya kecepatan pendinginan maka dapat membantu proses modifikasi. Pernyataan itulah yang menyebabkan modifikasi tidak pernah digunakan pada *die casting* karena pada *die casting* proses pembekuannya yang sangat cepat sehingga menghasilkan struktur yang sudah cukup halus<sup>[32]</sup>.

- Kadar silikon pada paduan

Semakin besar konsentrasi silikon, maka semakin banyak *modifier* yang harus ditambahkan untuk menghasilkan modifikasi yang sempurna. Dibutuhkan penambahan modifier stronsium sampai 50% apabila dilakukan peningkatan konsentrasi silikon dari 7% ke 11%<sup>[4]</sup>.

- Waktu tahan

Waktu tahan juga merupakan salah satu variabel yang harus dipertimbangkan dalam proses modifikasi. Dari gambar 2.17 dibawah diperlihatkan hubungan antara waktu tahan dengan beberapa jenis konsentrasi stronsium. Pada grafik dapat dilihat bahwa waktu tahan paling efektif untuk mendapatkan tingkat modifikasi yang paling baik adalah sekitar 5 – 10 menit<sup>[32]</sup>.



Gambar 2. 17 Pengaruh waktu tahan terhadap kualitas modifikasi dengan variasi penambahan Sr<sup>[32]</sup>

b. Pengaruh modifier pada cacat pengecoran

Apabila berdasar pada pengujian radiografi, dengan penambahan bahan modifikasi seperti Sr atau Na tidak terlalu mempengaruhi terhadap kualitas<sup>[4]</sup>. Kualitas disini lebih dihubungkan pada porositas yang dihasilkan.

Bahkan pada *permanent mold casting*, berdasarkan pada pengujian X-rays hasil pengecoran dengan *modifier* memiliki tingkat *reject* yang lebih tinggi jika dibandingkan yang tanpa modifikasi<sup>[4]</sup>. Pada suatu pengujian disebutkan bahwa presentase *reject* pada hasil pengecoran tanpa *modifier* rata – rata adalah 16%, sedangkan pada hasil modifikasi presentasi *reject*-nya mencapai 49.53, dan 65% pada 0.002, 0.02, dan 0.08% Sr<sup>[32]</sup>.

Hal tersebut mungkin disebabkan lelehan aluminium yang mengandung stronsium mempunyai tingkat absorpsi terhadap gas di sekelilingnya yang lebih tinggi, yang kemungkinan disebabkan oleh lapisan yang lebih permeabel<sup>[33]</sup>. Selain itu, strontium mempunyai peranan dalam meningkatkan jumlah kemampuan inklusi untuk melakukan nukleasi dan inilah yang mungkin menyebabkan meningkatnya porositas<sup>[34]</sup>.

c. Pengaruh modifier terhadap sifat mekanis paduan Al-Si

Mikrostruktur yang dihasilkan dari modifikasi menghasilkan peningkatan kekuatan tarik baik pada cetakan pasir maupun cetakan logam. Pada pengujian tarik, patahan yang dihasilkan oleh paduan non modifikasi berbentuk getas, sedangkan pada modifikasi ulet<sup>[35]</sup>.

Pada pengujian paduan Al-12Si-0.1 Cu nilai UTS berubah yaitu dari 204.58 N/mm<sup>2</sup> menjadi 236.61 N/mm<sup>2</sup> dan persen elongasinya dari 4.5% menjadi 10%<sup>[17]</sup>.

Kori *et.al.* menjelaskan bahwa dengan penambahan modifier dan/atau *grain refiner* maka dapat meningkatkan sifat mekanis pada paduan Al-7Si seperti UTS dan elongasi<sup>[45]</sup>.

**Tabel 2. 2** Pengaruh penambahan modifier dan/atau grain refiner pada paduan Al-7Si<sup>[45]</sup>

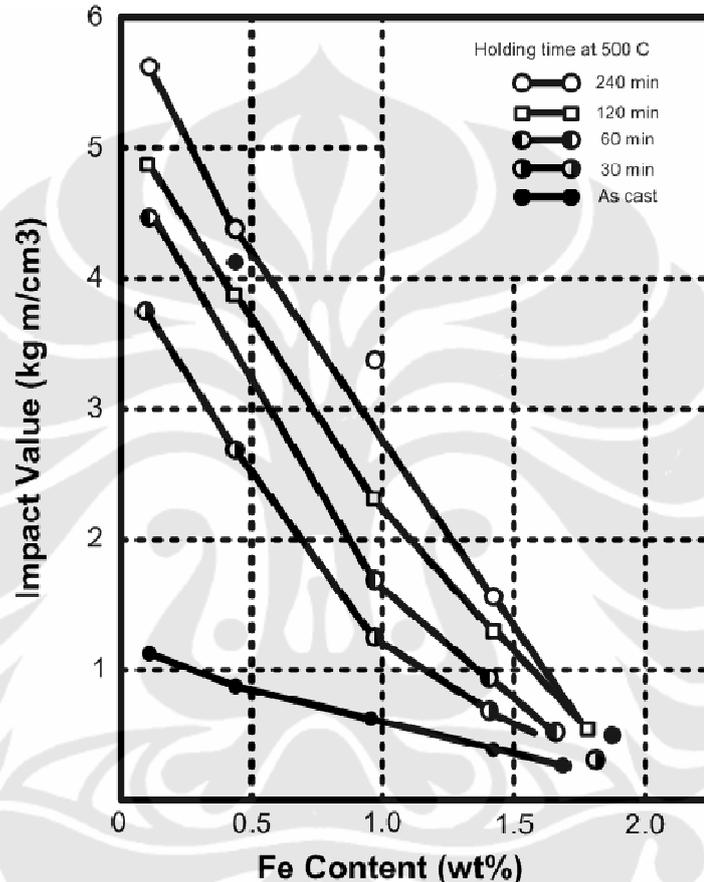
Alloy	Addition level Grain Refiner	%Sr	0.2% Proof stress (MPa)	UTS (MPa)	% Elong-ation
Al	–	–	35.5	68.5	44.0
Al	0.2% M51	–	39.2	73.7	54.0
Al-7Si	–	–	52.0	144.8	08.0
Al-7Si	1.0% M03	–	55.8	153.0	10.0
Al-7Si	–	0.02	57.8	158.6	12.0
Al-7Si	1.0% M03	0.02	60.0	159.5	14.0
Al-7Si	1.0% M13	–	57.0	156.0	11.0
Al-7Si	1.0% M13	0.02	61.5	161.0	15.0

2.3.4 Pengaruh Intermetalik Besi terhadap Sifat Mekanis

Banyak sekali eksperimen yang meneliti mengenai pengaruh penambahan Fe terhadap sifat mekanis paduan Al-Si. Inti dari eksperimen tersebut kebanyakan menyebutkan bahwa dengan penambahan Fe pada aluminium silikon dapat menurunkan sifat – sifat mekanis dari paduan aluminium silikon. Dengan meningkatnya kadar Fe dari 0.5 menjadi 1.2 % pada Al-13%Si dapat menurunkan sifat – sifat mekanis paduan tersebut secara signifikan, seperti keuletan, karena pembentukan fasa  $\beta$ <sup>[2]</sup>. Selain itu, fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi ini memiliki ikatan yang lemah dengan matriks aluminium sehingga dapat menurunkan kekuatan tarik.

Kehadiran fasa  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi itu juga menyebabkan *stress cracking* dan kosongnya formasi (*void formation*) pada paduan Al-10Si-Mg<sup>[2]</sup>. Walaupun peningkatan kadar Fe sampai 0.2% dapat meningkatkan kekuatan tarik, akan tetapi dengan kadar yang lebih tinggi dari itu dapat menurunkan kekuatan tarik

dan elongasi, walaupun pada sisi lain dapat meningkatkan kekerasan. Ketahanan impak juga ikut berpengaruh dengan kehadiran Fe. Ketahanan impak tersebut akan menurun karena pembentukan kristal  $\text{FeAl}_3$ , seperti dijelaskan pada grafik dibawah ini.



**Gambar 2.18** Efek kadar Mn terhadap kekuatan impak pada paduan Al-11Si dengan variasi kadar waktu tahan pada 500 °C<sup>[2]</sup>

Mikrostruktur yang dihasilkan dari modifikasi menghasilkan peningkatan kekuatan tarik baik pada cetakan pasir maupun cetakan logam. Pada pengujian tarik, patahan yang dihasilkan oleh paduan non modifikasi berbentuk getas, sedangkan pada modifikasi ulet<sup>[35]</sup>.

Lu *et.al.* menjelaskan bahwa morfologi fasa beta yang berbentuk platelet menyebabkan sulitnya dalam melakukan proses pendinginan dan meningkatkan kecenderungan terdapatnya porositas. Porositas pada paduan aluminium dengan kadar Fe yang tinggi terjadi karena presipitasi oleh fasa  $\beta\text{-AlFeSi}$  yang

berbentuk *coarse platelets* dan menghalangi aliran *interdendritic flow channels*<sup>[36]</sup>. Selain itu, *large beta platelets* pada kadar Fe yang tinggi menyebabkan nukleasi eutektik Si, dimana menyebabkan memburuknya permeabilitas interdendritik.

