

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 ALUMINIUM

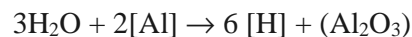
Sejak reduksi elektrolitik alumina ditemukan secara terpisah oleh Charles Hall dari Ohio dan Pault Heroult dari Perancis, yang selanjutnya dikenal dengan proses Hall-Heroult, mesin kendaraan dengan pembakaran internal yang pertama mulai dikenal dan aluminium memegang peranan penting sebagai material otomotif^[5]. Aluminium memiliki sifat-sifat penting yang membuat logam ini banyak digunakan dalam industri otomotif. Salah satunya aluminium bersifat ringan, dengan berat jenis rendah (2.7 gr/cm^3) yang hanya sepertiga dari berat jenis baja. Karena bersifat ringan, maka penggunaan aluminium dalam bidang otomotif diharapkan dapat mengurangi penggunaan bahan bakar kendaraan.

Sifat-sifat penting aluminium lainnya antara lain^[6] :

- § Memiliki *high strength to weight ratio*
- § Temperatur leburnya rendah ($\pm 660^\circ\text{C}$) sehingga peralatan peleburan lebih sederhana
- § Sifat mampu cor (*castability*) sangat baik
- § Sifat mampu mesin (*machinability*) baik
- § Sifat permukaan (*surface finish*) baik
- § Ketahanan korosi baik
- § Konduktor panas dan listrik yang baik
- § Mudah dipadu (*alloying*) dengan unsur lain untuk menghasilkan sifat yang diinginkan

Selain sifat-sifat positif yang telah disebutkan di atas, aluminium tuang juga memiliki sifat-sifat negatif antara lain :

- § mudah tercampur dengan pengotor (*dross*) oksida karena memiliki berat jenis rendah
- § sangat mudah mengikat gas hidrogen dalam kondisi cair



§ mengalami penyusutan (*shrinkage*) yang cukup tinggi antara 3.5% sampai 8.5% (rata-rata 6%)

Aluminium digunakan secara luas dalam industri otomotif. Komponen otomotif yang dibuat dari aluminium misalnya *engine blocks, pistons, cylinder heads, intake manifolds, crankcases* dan *cylinder comb*. Sebagian besar paduan aluminium tuang diproduksi dengan proses *sand casting, permanent mold (gravity die) casting* dan *cold chamber pressure die casting* ^[7].

2.1.1 Sistem Penamaan Paduan Aluminium

Ada beberapa sistem dalam penamaan aluminium tuang. Setiap negara memiliki sistem penamaan sendiri untuk klasifikasi paduan aluminium tuang ini. Sistem penamaan yang umum dipakai yaitu sistem penamaan dari Aluminium Association dari Amerika Serikat ^[5]. Komposisi aluminium tuang dideskripsikan dengan sistem empat digit angka. Digit terakhir dipisah dengan 3 digit sebelumnya dengan tanda titik desimal. Angka pertama dimulai dari 1 sampai 9 menunjukkan grup atau kelompok paduan. Famili paduan dan unsur paduan utama yang terkandung di dalamnya untuk aluminium tuang yaitu :

- § 1xx.x : Aluminium murni
- § 2xx.x : Tembaga (Cu)
- § 3xx.x : Si + Cu/Mg
- § 4xx.x : Silikon (Si)
- § 5xx.x : Magnesium (Mg)
- § 6xx.x : Tidak terpakai
- § 7xx.x : Seng (Zn) + Cu/Mg
- § 8xx.x : Timah (Sn)
- § 9xx.x : Tidak terpakai

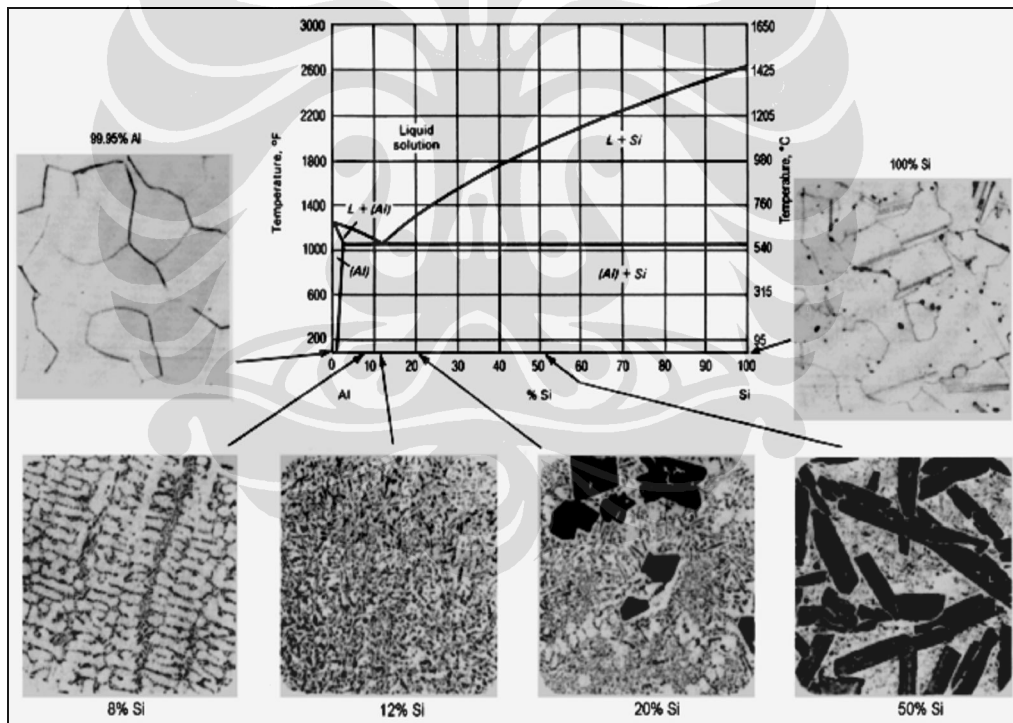
Untuk grup 1xx.x, dua digit setelah digit pertama mengindikasikan persentase minimum aluminium. Digit terakhir menunjukkan bentuk produk : 1xx.0 merupakan produk tuang sedangkan 1xx.1 adalah produk ingot.

Sedangkan untuk aluminium seri 2xx.x sampai dengan 9xx.x, dua digit setelah digit pertama menunjukkan nomer identifikasi paduan yang berbeda-beda dalam grup. Sama seperti halnya seri 1xx.x, angka terakhir menunjukkan bentuk produk : xxx.0 untuk produk tuang dan xxx.1 untuk produk ingot.

2.1.2 Paduan Aluminium Silikon

Aluminium dengan silikon sebagai unsur paduan utama merupakan paduan aluminium tuang yang paling penting. Hal ini dikarenakan paduan Al-Si memiliki fluiditas tinggi oleh adanya volume yang besar dari Al-Si eutektik. Kelebihan lainnya dari paduan aluminium silikon ini yaitu memiliki ketahanan korosi yang tinggi, sifat mampu las yang baik serta memiliki koefisien ekspansi termal rendah karena adanya silikon. Akan tetapi, kehadiran partikel silikon yang keras dalam mikrostrukturnya, membuat paduan aluminium silikon ini susah dalam proses permesinannya [7].

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



Gambar 2.1 Diagram Fasa Al-Si [5]

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

Paduan aluminium silikon hipereutektik, mengandung silikon lebih dari 12.7%. Mikrostruktur paduan ini terdiri dari endapan partikel silikon primer dalam matriks eutektik. Karena adanya endapan partikel silikon, maka paduan aluminium silikon hipereutektik memiliki ketahanan aus yang sangat baik ^[8]. Akan tetapi kekuatan tarik dan keuletannya lebih rendah dibandingkan dengan aluminium silikon hipoeutektik. Selain itu, adanya endapan partikel silikon ini membuat masalah pada proses pemesinannya.

Sedangkan paduan Al-Si eutektik, memiliki kadar silikon sebesar 12-12.7%. Eutektik terbentuk antara larutan padat aluminium yang mengandung sedikit silikon dan silikon murni sebagai fasa kedua. Komposisi eutektik telah menjadi perdebatan sejak lama, akan tetapi sekarang secara umum telah disepakati sebesar 12.7% Si ^[7]. Pembekuan yang lambat dari paduan Al-Si menghasilkan mikrostruktur yang sangat kasar dimana eutektik terdiri dari *large plates* atau jarum-jarum silikon dalam matriks aluminium yang kontinyu.

2.2 PENGARUH UNSUR PADUAN

Aluminium murni bersifat lunak dan tidak kuat. Oleh karena itu perlu ditambahkan unsur-unsur paduan untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis dari aluminium tuang seperti kekuatan, keuletan, mampu pemesinan dan sifat-sifat lainnya sesuai dengan kebutuhan. Unsur paduan dalam aluminium ada yang larut, ada yang berdiri sendiri contohnya partikel silikon dan ada yang membentuk senyawa misalnya presipitat Mg_2Si atau intermetalik Al-Fe-Si ^[6]. Unsur-unsur paduan yang penting antara lain Si, Cu, Mg, Zn dan Mn. Pada umumnya penambahan unsur paduan ini untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan. Selain itu juga terdapat *minor element* dalam jumlah yang kecil seperti Ti, C, Ce.

Pengaruh Unsur Silikon (Si)

Silikon pada paduan Al-Si dapat meningkatkan sifat mampu cor (terutama pada kadar silikon 5-13% silikon meningkatkan fluiditas dan ketahanan terhadap retak panas), meningkatkan kekuatan dan kekerasan serta menurunkan berat jenis. Bila kadar Si > 12%, maka akan terbentuk kristal silikon primer yang bersifat keras, memiliki ekspansi termal rendah, ketahanan ausnya baik sehingga cocok untuk aplikasi temperatur tinggi seperti piston. Akan tetapi sifat mampu permesinannya kurang baik.

Pengaruh Unsur Tembaga (Cu)

Tembaga sebagai unsur paduan pada aluminium, dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baik dalam kondisi *as cast* maupun *heat treatment* (membentuk Cu_2Al). Pengaruh buruknya, tembaga dapat mengurangi ketahanan retak panas, mengurangi sifat mampu cor (menurunkan fluiditas) serta menurunkan ketangguhan (keuletan menurun). Tembaga memiliki kelarutan sebesar 5.65% pada temperatur 550°C.

Pengaruh Unsur Magnesium (Mg)

Magnesium memiliki kelarutan 17.4% pada 450°C. Unsur paduan magnesium berpengaruh meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada perlakuan panas paduan Al-Si karena terbentuk endapan Mg_2Si . Pada kadar 0.1-1.3% Mg ini dapat membentuk endapan Mg_2Si yang optimal sebagai penguatan fasa akibat endapan. Pengaruh Mg lainnya antara lain meningkatkan ketahanan korosi akan tetapi Mg berpengaruh buruk menurunkan sifat mampu cor (*castability*).

Pengaruh Unsur Seng (Zn)

Seng pada temperatur 443°C bisa larut 88.8%. Bila dipadu dengan tembaga (Cu) dan/atau magnesium (Mg), maka seng berpengaruh meningkatkan kekerasan dan kekuatan, menghasilkan paduan yang dapat dilakukan perlakuan panas. Akan tetapi pengaruh buruk penambahan Zn ini dapat meningkatkan kegetasan, menurunkan ketangguhan serta menurunkan ketahanan korosi. Oleh karena itu, kandungan Zn pada paduan Al-Si dibatasi < 1%, bahkan ada yang maksimum 0.1%.

Pengaruh Unsur Besi (Fe)

Unsur besi merupakan pengotor yang sering ditemukan di aluminium. Unsur besi ini memiliki kelarutan yang relatif kecil pada aluminium cair yaitu 0.05% pada temperatur 655°C. Pada kadar 0.005%, Fe dapat membentuk fasa-fasa yang tidak terlarut (*insoluble*) seperti FeAl_3 , FeMnAl_6 dan αAlFeSi . Fe berpengaruh positif dalam meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap retak panas. Akan tetapi, Fe memiliki pengaruh negatif menurunkan keuletan dan mengurangi *flowability* (*fluidity*) serta memberikan kecenderungan penempelan atau persambungan (efek *soldering*) dengan cetakan pada *die casting*. Oleh karena itu umumnya kadar Fe dibatasi maksimum hanya 1%.

Pengaruh Unsur Mangan (Mn)

Mangan larut dalam Al sebesar 1.82% pada suhu 658°C. Unsur mangan berpengaruh meningkatkan kekuatan dan kekerasan, meningkatkan ketahanan temperatur tinggi dan ketahanan korosi. Tapi unsur Mn ini berpengaruh buruk menurunkan sifat mampu cor (*castability*).

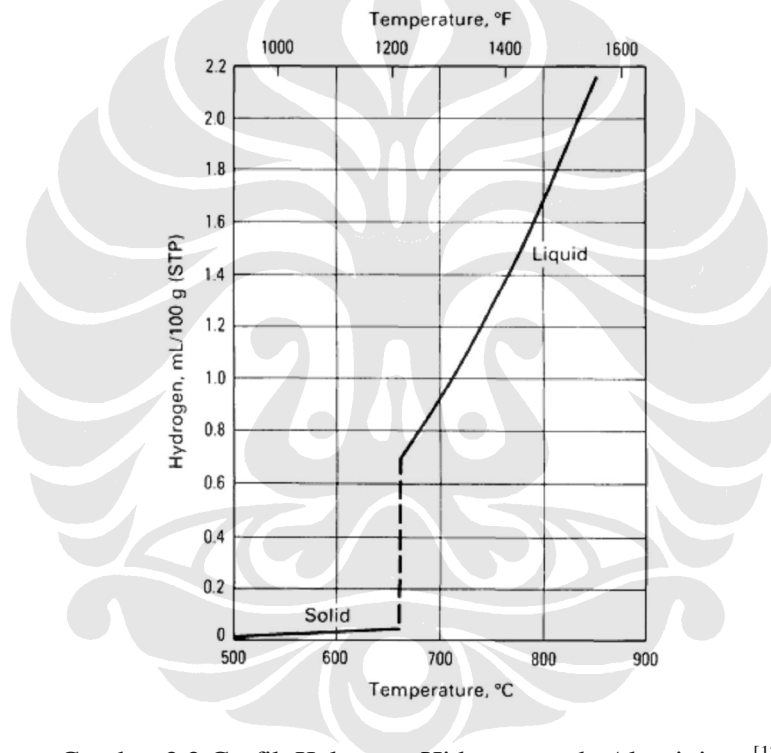
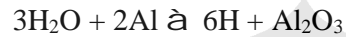
Pengaruh Minor Element

Selain unsur paduan, terdapat pula minor element dalam jumlah yang relatif kecil pada paduan aluminium tuang. Walaupun jumlah kandungannya sedikit, akan tetapi minor element ini dapat memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap paduan aluminium tuang. Yang termasuk minor element antara lain Ti, B, Sr, Na, Sb, P, Cd, Pb, Ce dan C.

Titanium (Ti) dalam kadar 0.05%-0.15% dan Boron (B) sebesar 0.04% berpengaruh sebagai penghalus butir (*grain refinement*). Kedua unsur ini akan membentuk nukleasi contohnya TiAl_3 , AlB_2 atau $(\text{Al,Ti})\text{B}_2$. Unsur Sr, Na, Sb berpengaruh membuat partikel Si pada paduan Al-Si hipoeutektik menjadi lebih halus. Unsur P membentuk nukleasi AlP_3 untuk modifikasi Al-Si hipereutektik agar terbentuk kristal Si primer berbentuk agak bulat/kecil. Unsur Cd dan Pb berguna untuk memperbaiki *machinability*. Sedangkan unsur Ce dapat meningkatkan fluiditas tapi juga meningkatkan *die sticking*. Carbon (C) merupakan *impurities* (pengotor) pada aluminium (membentuk Al_4C_3).

2.3 HIDROGEN PADA ALUMINIUM

Aluminium dan paduannya sangat rentan terhadap absorpsi hidrogen dalam kondisi cair. Kelarutan hidrogen ini lebih rendah pada keadaan solid. Hidrogen ini merupakan satu-satunya gas yang memiliki kelarutan cukup besar pada aluminium cair. Karena afinitas logam terhadap oksigen, prinsip sumber absorpsi hidrogen berasal dari reduksi uap air dari atmosfer yang kontak dengan logam cair ^[4]:

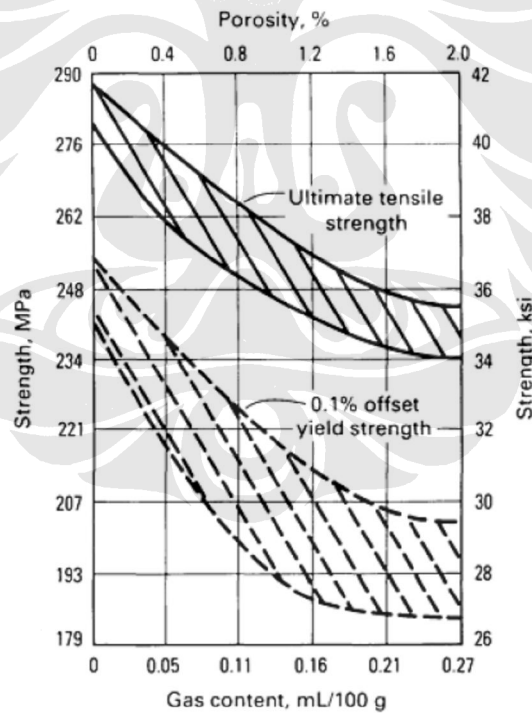


Gambar 2.2 Grafik Kelarutan Hidrogen pada Aluminium ^[17]

Kelarutan gas hidrogen akan meningkat secara eksponensial seiring kenaikan temperatur. Oleh karena itu, temperatur yang terlalu tinggi dalam peleburan harus dihindari untuk meminimalkan absorpsi gas.

2.3.1 Efek Hidrogen

Ketika hidrogen yang terlarut dalam aluminium cair tidak dapat dikeluarkan sepenuhnya sampai coran membeku, maka akan menghasilkan cacat porositas. Porositas dapat berbentuk sangat halus, tersebar merata atau terlokalisasi pada daerah coran yang terakhir membeku jika konsentrasi gas yang terperangkap relatif kecil. Sebaliknya, beberapa cacat porositas gas dapat berukuran agak besar dan terlihat sebagai *blowhole* dan crack. Cacat porositas berpengaruh menurunkan sifat-sifat mekanis dari paduan aluminium. Seperti yang terlihat pada grafik dibawah ini, adanya cacat porositas pada coran akan menurunkan *tensile strength* dan *yield strength* dari paduan aluminium [4]. Semakin besar kandungan gas yang terdapat pada coran, maka *tensile strength* dan *yield strength* akan semakin menurun.



Gambar 2.3 Pengaruh Kandungan Gas
Pada *Tensile* dan *Yield Strength* Paduan Aluminium [17]

2. 4 PADUAN ALUMINIUM AC8A

Penamaan paduan aluminium AC8A adalah sistem penamaan dengan menggunakan standar JIS yang dipakai di negara Jepang. Paduan aluminium AC8A pada standar AA adalah aluminium seri 332.0

Tabel 2.1 Konversi Standarisasi Aluminium Alloys ^[10]

JIS	USA		
	AA	ASTM	SAE
AC1A	295.0	C4A	38
AC2A	-----	-----	-----
AC2B	319.0	SC64D	326
AC3A	-----	-----	-----
AC4A	-----	SG91A	-----
AC4B	333.0	SC94A	331
AC4C	356.0	SG70A	323
AC4D	355.0	SC51A	322
AC5A	242.0	CN42A	39
AC7A	514.0	G4A	320
AC7B	520.0	G10A	324
AC8A	AA332.0	SN122A	321
AC8B	-----	-----	-----
AC8C	F332.0	SC103A	332

Paduan AC8A merupakan tipe paduan Al-Si tuang yang banyak dipakai pada industri pengecoran komponen otomotif. Piston merupakan contoh komponen otomotif yang menggunakan material AC8A ini.

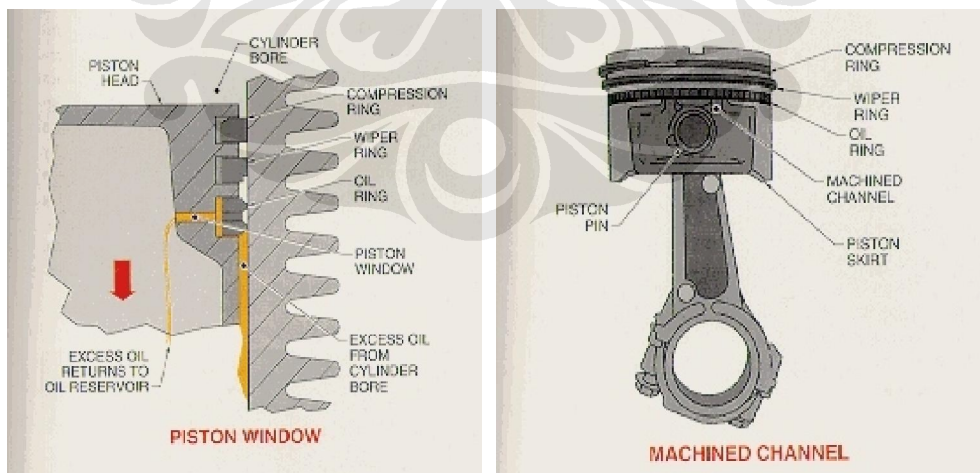
Komposisi kimia dari paduan AC8A dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2.2 Komposisi AC8A berdasarkan JIS ^[9]

Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn	Cr
11.0-13.0	0.8-1.3	0.7-1.3	0.8 max	0.15 max	0.8-1.5	0.15 max	0.2 max	0.05 max	0.05 max	0.10 max

2.4.1 Piston dan Material untuk Piston

Piston merupakan komponen mesin yang berbentuk silindris yang bergerak naik turun dalam lubang silinder oleh gaya yang dihasilkan selama proses pembakaran ^[2]. Piston bertindak sebagai bagian akhir yang dapat digerakkan dari ruang pembakaran, sedangkan bagian akhir ruang pembakaran yang bersifat tetap yaitu *cylinder head*. Piston merupakan komponen dari mesin, pompa dan kompresor gas ^[11]. Piston terletak dalam sebuah silinder dan dibuat terinsulasi dari gas oleh adanya *piston ring*. Dalam sebuah mesin, fungsi piston adalah mentransfer gaya dari gas yang berekspansi dalam silinder ke *crankshaft* melalui *piston rod* atau *connecting rod*. Dalam sebuah pompa, kebalikan dari kegunaannya dalam mesin, gaya ditransfer dari *crankshaft* ke piston sebagai penekan fluida dalam silinder. Dalam beberapa mesin, piston juga bertindak sebagai katup (*valve*) yang menutup dan membuka *port* dari dinding silinder.



Gambar 2.4 Struktur Piston ^[2]

Piston biasanya terbuat dari paduan aluminium tuang untuk mendapatkan sifat konduktivitas termal yang baik. Konduktivitas termal merupakan kemampuan

material untuk menghantarkan dan mentransfer panas. Aluminium berekspansi ketika dipanaskan dan dibutuhkan jarak ruang yang sesuai untuk mempertahankan gerakan piston secara bebas dalam *cylinder bore*. Jarak ruang yang tidak cukup dapat menyebabkan piston terperangkap dalam silinder. Sedangkan jarak ruang yang terlalu longgar dapat menyebabkan daya kompresi yang kurang dan meningkatkan kebisingan piston. Bagian-bagian piston terdiri dari *piston head*, *piston pin bore*, *piston pin*, *skirt*, *ring grooves*, *ring land* dan *piston ring*.

Piston bekerja pada suhu yang tinggi dan mengalami gesekan terus-menerus. Oleh karena itu diperlukan persyaratan material yang dapat mendukung kinerja piston. Standar international untuk material piston antara lain memiliki ^[1] :

- § *Specific gravity* rendah
- § Ekspansi termal rendah
- § Kekuatan pada temperatur elevasi
- § Konduktivitas termal yang rendah
- § Gaya inersia rendah sehingga kecepatan mesin lebih besar, mengurangi persyaratan *bearing*
- § Bersifat ringan

Syarat-syarat utama material untuk pembuatan piston antara lain ^[12] :

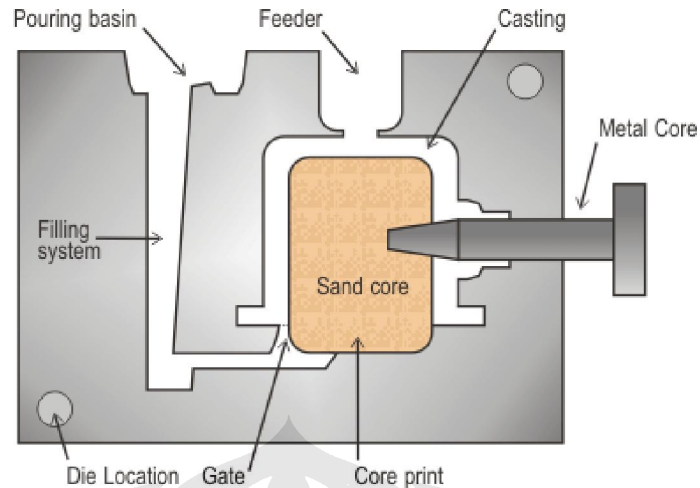
- 1) Ringan, material yang ringan akan dapat mengurangi beban inersia yang akan dialami piston.
- 2) Kekuatan pada temperatur tinggi, dengan material yang memiliki kekuatan pada temperatur tinggi tentunya material tersebut akan tahan terhadap temperatur yang tinggi sekitar 300⁰ C dalam ruang bakar sehingga tidak mudah rusak.
- 3) Ketahanan aus dan ketahanan korosi, syarat ini diperlukan karena aplikasi piston berada dalam lingkungan ruang bakar dan juga gerakan piston yang bergerak secara terus menerus.
- 4) Mudah dalam pengecoran dan permesinan, sebagai hasil coran tentunya material ini harus memiliki mampu cor dan juga mampu mesin.
- 5) Memiliki koefisien panas yang rendah untuk menjaga stabilitas dimensi.

Pada umumnya piston otomotif dari aluminium dibuat dengan proses *gravity casting* atau bisa disebut juga *permanent mold casting*. Piston yang dibuat dengan proses casting ini biasanya memiliki sifat-sifat unggul dari segi ekonomi dan fleksibilitas desain. Biasanya proses pengecoran piston diikuti dengan *heat treatment* untuk meningkatkan kekerasan, sifat mampu permesinan dan mengeliminasi perubahan dimensi secara permanen.

2.4.2 Gravity Casting (Permanent Mold Casting)

Gravity casting merupakan proses pengecoran dengan cetakan logam dimana logam cair masuk ke dalam cetakan dengan gaya gravitasi ^[6]. Proses pengecoran ini dilakukan dengan menuangkan logam cair langsung ke dalam cetakan seperti pada pengecoran dengan cetakan pasir. Cara pengecoran ini tidak dipergunakan tekanan dari luar, hanya tekanan yang berasal dari tinggi cairan logam dalam cetakan. Sebagai bahan cetakan terutama dipakai baja khusus atau besi cor paduan. Teknik pengecoran ini dapat digunakan untuk membuat produk cor dengan tingkat ketelitian tinggi dan kualitas yang baik. Umumnya bahan yang akan dicor berupa paduan *non-ferrous* yang memiliki titik cair rendah seperti paduan aluminium, magnesium atau tembaga.

Dalam teknik *gravity casting*, logam cair yang dituang didinginkan secara cepat oleh cetakan logam sehingga menghasilkan struktur yang lebih halus. Beberapa hal penting yang perlu diperhatikan untuk menghasilkan benda coran dengan kualitas tinggi antara lain komposisi dan temperatur logam cair, bahan, ketebalan dinding, bahan pelapis dan temperatur dari cetakan. Bahan pelapis atau *coating* diperlukan untuk memudahkan proses pengambilan benda cor dari cetakan dan memperpanjang umur cetakan.



Gambar 2.5 Skema *Gravity Casting* ^[13]

Keuntungan dari proses *gravity casting* antara lain ^[14] :

- § Ketelitian ukuran yang dihasilkan cukup baik
- § Permukaan coran yang dihasilkan lebih halus
- § Hasil coran memiliki struktur yang lebih halus sehingga sifat-sifat mekanisnya cukup baik
- § Produktivitas tinggi sehingga cocok digunakan untuk produksi massal

Sedangkan kelemahan dari teknik *gravity casting* antara lain :

- § Tidak sesuai untuk produksi dalam jumlah kecil karena tingginya biaya pembuatan cetakan logam
- § Sukar untuk membuat coran yang berbentuk rumit
- § Perbaikan cetakan logam susah dilakukan dan biayanya mahal. Oleh karena itu sukar dilakukan perubahan rencana pengecoran.

2.5 MODIFIKASI PADA PADUAN ALUMINIUM TUANG

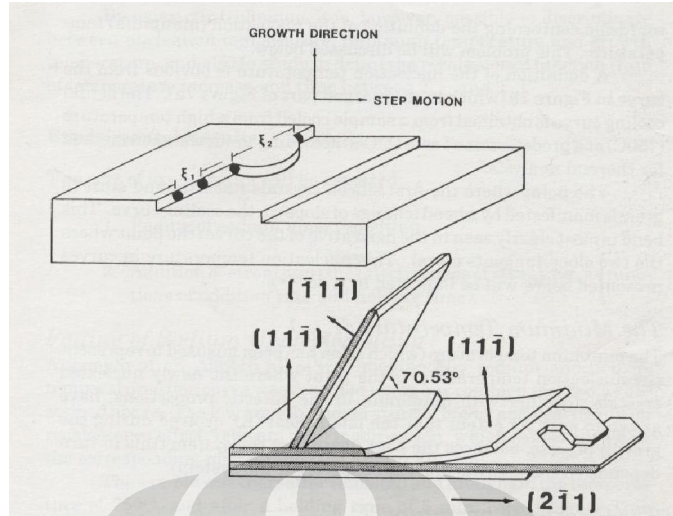
Penggunaan secara luas paduan aluminium untuk berbagai jenis casting dimulai dari penemuan oleh Pacz tahun 1920 bahwa penghalusan atau modifikasi struktur mikro yang sama seperti yang diperoleh ketika pembekuan cepat, terjadi ketika alkali fluorida tertentu ditambahkan terlebih dahulu ke dalam aluminium cair ketika akan dituang^[7]. Penambahan unsur-unsur tertentu seperti kalsium, sodium, stronsium dan antimoni terhadap aluminium hipoeutektik menghasilkan jaringan *lamellar* atau *fibrous* yang lebih halus. Struktur ini juga dapat diperoleh melalui peningkatan kecepatan pembekuan.

2.5.1 Mekanisme Modifikasi

Dalam paduan Al-Si, fasa silikon memegang peranan penting dalam proses pemodifikasian. Silikon adalah unsur non logam dan memiliki bentuk kristal dalam paduan aluminium. Kristal silikon memiliki suatu keunikan dalam pertumbuhannya, keunikan pertumbuhan dari silikon disebut dengan *faceted manner*^[15]. Maksudnya adalah bahwa kristal silikon hanya memiliki arah kristalografi tertentu dalam pertumbuhannya, kristal silikon memiliki arah bidang $\langle 211 \rangle$, dan arah pertumbuhan $\langle 111 \rangle$. Selain itu, silikon juga memiliki sifat lain yang unik, yaitu mudahnya terbentuk bidang kembar (berpasangan). Bidang ini merupakan salah satu bentuk cacat kristalografi yang dapat terbentuk pada saat sekumpulan atom silikon mengalami pergeseran posisi melewati suatu bidang kristalografi.

Selanjutnya saat proses pembekuan, dapat diilustrasikan seperti bentuk anak tangga, dimana terjadi penambahan atom pada antar muka solid-liquid yang berlangsung pada setiap arah pertumbuhannya^[15]. Akibat dari fenomena ini, maka kemungkinan terjadinya cabang pada struktur kristal silikon sangat kecil.

Pada saat ditambahkan *modifier*, dihasilkan struktur kristalografi dengan jumlah bidang kembar (*twinning*) yang lebih banyak daripada tanpa penambahan modifier. Mekanisme modifikasi ini biasa disebut sebagai *impurity induced twinning*, dimana secara singkat bahwa adanya elemen modifikasi akan mengganggu tahapan pertumbuhan silikon sehingga menyebabkan *twinning*.



Gambar 2.6 Adsorpsi Atom *Impurities* pada Pertumbuhan Kristal Silikon yang Menyebabkan Terjadinya Mekanisme *Twinning* ^[30]

Elemen *modifier* harus memiliki afinitas terhadap silikon dan dapat membentuk persenyawaan dengan silikon dengan baik. Hal ini akan memfasilitasi adsorpsi pada permukaan kristal silikon yang tumbuh pada aluminium cair. Rasio ukuran atom *modifier* terhadap silikon untuk mendapatkan tingkat *twinning* yang optimum adalah sebesar ~ 1.65 ^[30].

2.5.2 Unsur-Unsur *Modifier*

2.5.2.1 Paduan Al-Si Hipoeutektik

Pada umumnya paduan Al-Si hipoeutektik dimodifikasi dengan penambahan unsur sodium (Na), stronsium (Sr), kalsium (Ca) atau antimoni (Sb) ^[4].

Sodium (Na)

Biasanya sodium ditambahkan dalam bentuk metalik, dipadukan dengan aluminium untuk mencegah sifat alaminya yang mudah terbakar dalam udara. Sodium harus dicelupkan dalam logam cair dan diaduk dengan hati-hati dalam waktu yang singkat untuk mendapatkan pelarutan dan persebaran yang baik. Alternatif lain bisa ditambahkan dalam bentuk tablet flux garam yang mengandung sodium. Tindakan pencegahan untuk menghindari oksidasi sodium bisa dilakukan dengan penyimpanan yang sesuai, penggunaan peralatan yang bersih dan kering. *Fading* atau *loss of modification* meningkat dengan tingkat pengadukan yang berlebih, *degassing*, waktu tahan yang terlalu lama dan temperatur yang terlalu tinggi. Pada umumnya sodium ditambahkan sekitar

0.015% sampai dengan 0.020% untuk mendapatkan modifikasi yang memadai, dengan menghasikan tingkat sisa sodium dalam coran sebesar 0.002%. Sodium sebaiknya tidak digunakan dalam paduan aluminium dengan kadar Mg lebih dari 1% karena kemungkinan dapat menyebabkan penggetasan.

Stronsium

Tidak seperti sodium, stronsium tidak membutuhkan penyimpanan yang khusus atau menimbulkan masalah dalam penanganannya. Biasanya ditambahkan dalam bentuk Al-10Sr-14Si atau ingot *master alloy* aluminium stronsium, tersedia juga batang Al-10Sr *master alloy* yang dapat larut lebih cepat. Penambahan stronsium pada paduan Al-Si hipoeutektik cukup diberikan sebesar 0.01% sampai 0.02% dengan tingkat sisa stronsium sebesar 0.008%. Secara umum, modifikasi dengan stronsium lebih tahan terhadap *fading* dibandingkan dengan sodium. Konsentrasi stronsium yang lebih rendah cukup efektif digunakan dengan kecepatan pembekuan yang lebih tinggi. Penambahan stronsium dalam konsentrasi yang lebih tinggi akan menyebabkan porositas pada hasil coran. Konsentrasi stronsium yang lebih tinggi juga berpengaruh merugikan terhadap efisiensi *degassing*.

Kalsium (Ca)

Kalsium ditambahkan sebagai *modifier* dalam bentuk *master alloy* yang mengandung 5% Si. Kadar penambahan kalsium biasanya sekitar 0.01%. Kalsium juga lebih tahan terhadap *fading* dibandingkan dengan sodium, walaupun *holding* yang terlalu lama akan menyebabkan kehilangan kalsium (*calcium loss*).

Antimoni

Antimoni merupakan unsur *modifier* yang banyak digunakan di Eropa dan Jepang. Unsur *modifier* ini biasanya ditambahkan sekitar 0.12% dan akan menjadi unsur paduan yang permanen pada paduan aluminium. Oleh karena itu sudah ditambahkan oleh penyuplai dalam ingot pengecoran dan tidak perlu ditambahkan lagi ketika proses pengecoran. Antimoni tidak dipengaruhi oleh waktu *holding*, *remelting* atau *degassing*. Paduan aluminium yang dimodifikasi dengan antimoni memiliki *susceptibility* terhadap gas lebih rendah dibanding modifikasi dengan sodium atau stronsium. Akan tetapi, kelemahannya sering terjadi masalah kontaminasi dan antimoni ini bersifat racun.

2.5.2.2 Paduan Al-Si Hipereutektik

Walaupun berbagai jenis unsur diketahui dapat digunakan untuk memodifikasi paduan aluminium hipereutektik, akan tetapi hanya fosfor yang bersifat komersial dan ekonomis. Unsur-unsur lainnya misalnya magnesium, tungsten, sulfur dan lanthanum dilaporkan efektif sebagai *modifier*, akan tetapi penggunaannya kurang ekonomis dan komersial ^[4].

Fosfor

Fosfor sebagai *modifier* paduan Al-Si hipereutektik tersedia dalam bentuk master alloy (phoscopper), aluminium fosfat, silikon fosfat, fosfor pentaklorida atau berbagai campuran garam fosfor. Penambahan fosfor dalam rentang kadar 0.020% sampai dengan 0.025%. Penambahan fosfor harus dilakukan dengan hati-hati dengan peralatan yang kering. Fosfor bernukleasi sebagai AlP_3 dan menghaluskan fasa silikon primer pada paduan Al-Si hipereutektik. Pada konsentrasi ppm, fosfor mengkasarkan struktur paduan Al-Si hipoeutektik dan mengurangi keefektifan *modifier* sodium dan stronsium.

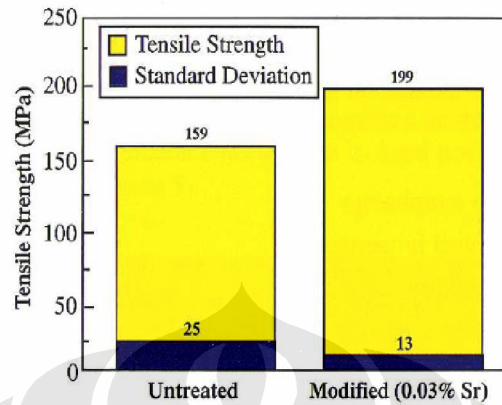
2.5.3 Kegunaan *Modifier*

Modifier ditambahkan ke dalam paduan aluminium silikon untuk mengurangi *scrap rate* dan meningkatkan produktivitas dengan ^[16]:

- § Mengontrol morfologi silikon
- § Meningkatkan sifat-sifat mekanis
- § Meningkatkan sifat mampu permesinan (*machinability*)
- § Mengurangi retak panas (*hot tear*)
- § Mengurangi waktu perlakuan panas (*heat treatment*)
- § Mengontrol distribusi porositas
- § Meningkatkan *die filling*
- § Menekan pembentukan silikon primer
- § Mengurangi *die sticking*

Beberapa sifat-sifat seperti *tensile strength* dan sifat mampu permesinan dapat dihubungkan dengan perubahan ukuran dan morfologi silikon, dari *acircular* yang kasar menjadi *fibrous* yang halus setelah dimodifikasi. Sebagai

contoh pada grafik di bawah, menunjukkan *tensile strength* pada paduan paduan Al-Si yang dimodifikasi dan tidak dimodifikasi :



Gambar 2.7 Efek Modifikasi Pada *Tensile Strength* Pada Paduan Al-Si8Cu3 Hasil HPDC ^[16]

Modifikasi tidak hanya menghasilkan peningkatan *tensile strength*, tetapi juga mengurangi variabilitas hasil coran yang ditunjukkan dengan lebih kecilnya standar deviasi. Pada proses permesinan paduan aluminium yang dimodifikasi, umur pakai dari *tool* akan lebih lama karena adanya penghalusan partikel silikon yang bersifat keras.

2.5.4 Overmodifikasi

Overmodifikasi merupakan peristiwa penambahan *modifier* yang berlebih sehingga menghasilkan struktur silikon yang kembali menjadi bentuk jarum yang kasar atau terbentuknya fasa intermetalik yang menyebabkan tumbuhnya silikon primer kasar dan saling terhubung ^[18]. Penambahan sodium lebih dari 0.02% menyebabkan overmodifikasi yang berhubungan dengan pembentukan senyawa AlSiNa dan menurunkan sifat-sifat mekanis paduan ^[17]. Stronsium tidak menunjukkan perilaku overmodifikasi yang kompleks, akan tetapi terbentuknya senyawa Al_2SrSi_2 yang tidak diinginkan pada penambahan Sr lebih dari 0.05% akan menurunkan sifat-sifat mekanis paduan. Pada *gravity casting*, overmodifikasi akan meningkatkan kecenderungan terjadinya cacat *misrun* sehingga dapat menurunkan sifat mekanis coran.

2.5.5 Modifier Fading

Setelah ditambahkan ke dalam aluminium cair, sifat *modifier* secara berkala akan menghilang atau memudar, disebut sebagai *fading*. Fenomena *fading* ini disebabkan oleh penguapan karena tekanan uap pada aluminium cair yang tinggi atau karena *modifier* teroksidasi^[18]. Bisa juga *fading* ini disebabkan karena *modifier* berikatan dengan unsur lain dalam bentuk persenyawaan sehingga tidak efektif lagi sebagai *modifier*. *Modifier* yang baik adalah dalam bentuk atom bebas. Level *fading* sodium dan stronsium menurun dengan bertambahnya waktu tunggu (*holding time*). *Fading* pada stronsium lebih lambat dibandingkan dengan sodium karena sifat stronsium yang tidak mudah menguap. Berdasarkan penelitian, waktu *fading* untuk stronsium sekitar 3-4 jam^[6].

2.6 MODIFIER STRONSIUM

Stronsium bisa ditambahkan ke dalam paduan Al-Si baik sebagai logam murni maupun dalam bentuk *master alloy*. Penggunaan stronsium murni memiliki beberapa keterbatasan. Logam akan segera teroksidasi dalam atmosfer yang lembab dan adanya lapisan oksida dapat menghambat kecepatan pelarutan stronsium ke dalam logam cair^[20].

2.6.1 Pengaruh Sr Terhadap paduan Al-Si Hipoeutektik

2.6.1.1 Pengaruh Sr Terhadap Mikrostruktur Paduan Al-Si Hipoeutektik

Penggunaan Sr sebagai *modifier* pada paduan aluminium tuang dapat mengubah sifat-sifat mekanis paduan. Perubahan sifat-sifat mekanis ini disebabkan karena Sr mengubah mikrostruktur dari paduan aluminium tuang. Mikrostruktural yang mempengaruhi sifat-sifat mekanis antara lain :

- § Ukuran, bentuk dan distribusi fasa intermetalik
- § Jarak antar lengan dendrit (*Dendrite Arm Spacing/DAS*)
- § Ukuran dan bentuk butir
- § Modifikasi eutektik dan penghalusan fasa primer

Terdapat lima (5) variabel yang mempengaruhi mikrostruktur suatu paduan Al-Si hipoeutektik, yaitu^[18]:

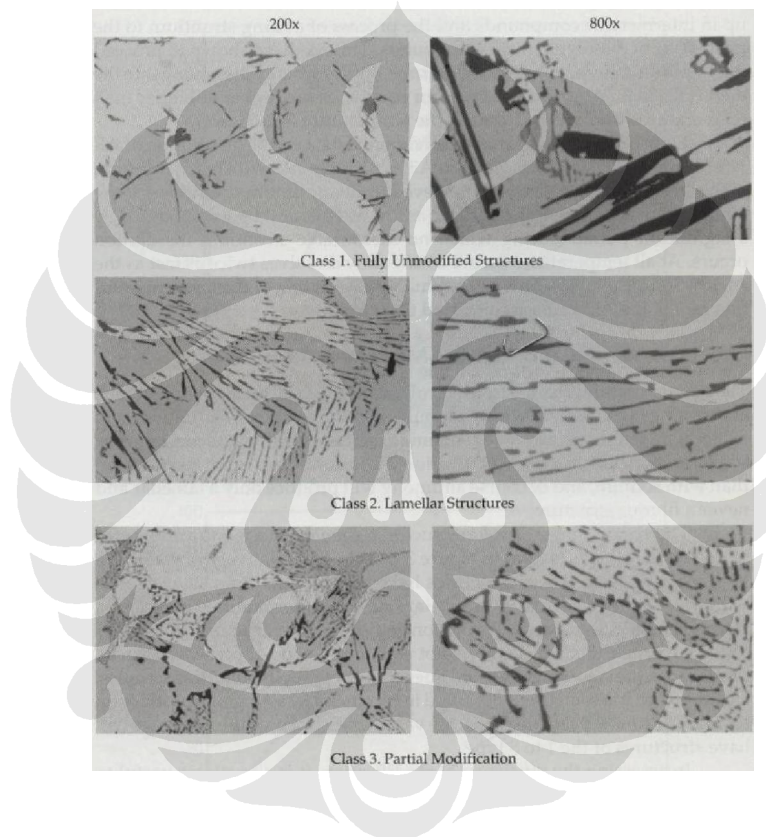
- § Tipe *modifier* yang dipakai
- § Pengotor dalam leburan

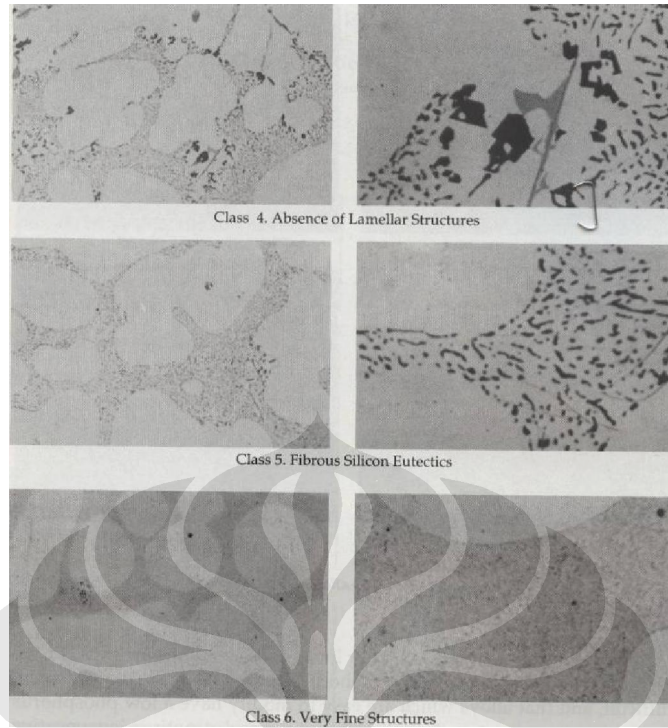
§ Jumlah *modifier* yang dipakai

§ Kecepatan pembekuan

§ Jumlah silikon dalam paduan

Penambahan *modifier* Sr pada paduan Al-Si hipoeutektik menghasilkan jaringan eutektik *fibrous* atau *lamellar* yang lebih halus. Penambahan Sr ini akan menekan pertumbuhan kristal silikon dalam eutektik sehingga menyebabkan distribusi lamela yang lebih halus relatif terhadap pertumbuhan eutektik. Berbagai macam tingkat modifikasi ditunjukkan pada gambar berikut :





Gambar 2.8 Perubahan Mikrostruktur Silikon Karena Proses Modifikasi

Penambahan stronsium akan mengubah pola pembentukan dendrit. Pada kondisi tidak termodifikasi sel dendrit akan tumbuh secara paralel, sedangkan pada kondisi termodifikasi sel dendrit tumbuh dengan membentuk cabang-cabang. Pola pembentukan pada struktur termodifikasi ini menghasilkan bentuk *equiaxed* pada sel dendrit sehingga panjang lengan dendrit primer menjadi pendek. Bentuk *equiaxed* terjadi karena dendrit tumbuh secara radial mengelilingi fasa liquid yang berada disekitarnya.

2.6.1.2 Pengaruh Sr terhadap Kekuatan Tarik Paduan Al-Si Hipoeutektik

Paduan Al-Si-Cu sangat banyak dipakai dalam lingkup industri pengecoran karena sifat mekanik, ketahanan korosi serta mampu cor (*castability*) yang baik. Namun paduan ini memiliki kristal silikon eutektik yang berbentuk *flake* atau *acicular* sehingga sifatnya menjadi getas (menjadi lokasi konsentrasi tegangan). Pengaruh Sr sebagai *modifier* adalah mengubah bentuk kristal tersebut menjadi bentuk *fibrous* yang halus dan bulat sehingga keuletan dan kekuatan tarik (UTS) paduan Al-Si-Cu menjadi meningkat. Pada tabel berikut terlihat bagaimana modifikasi struktur silikon meningkatkan kekuatan tarik dan keuletan paduan.

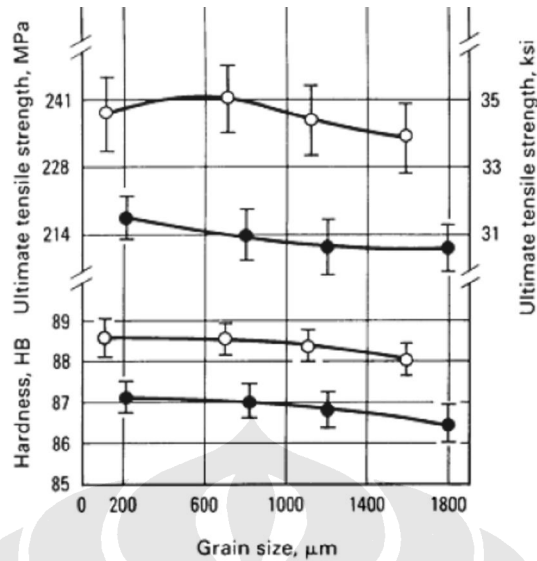
Tabel 2.3 Pengaruh Modifikasi Terhadap Kekuatan Tarik dan Keuletan ^[15]

Silicon Structure	Al-7%Si-0,3%Mg		Al-11%Si	
	UTS	E	UTS	E
Acicular	180	7	150	6
Lamellar	200	12 -- 16	170	14 -- 18
Fibrous	200	16	170	18

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

2.6.1.3 Pengaruh Sr terhadap Kekerasan Paduan Al-Si Hipoeutektik

Proses modifikasi menghasilkan struktur silikon yang halus dan bulat sehingga kekerasan dari paduan aluminium-silikon mengalami peningkatan, sama seperti pada kekuatan. Efek modifikasi terhadap peningkatan kekerasan dan kekuatan terlihat pada gambar 2.9 berikut. Namun, seperti telah diketahui bahwa penambahan *modifier* meningkatkan porositas pada produk akhir yang dihasilkan. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan kekerasan/kekuatan dari efek modifikasi menjadi tidak terlihat.



Gambar 2.9 Pengaruh Modifikasi Terhadap Kekerasan dan UTS Paduan Aluminium

Peningkatan kekerasan karena efek *modifier* juga disebabkan oleh distribusi, ukuran, dan bentuk dari fasa-fasa intermetalik yang terbentuk [15]. Fasa intermetalik yang berukuran besar, tersebar merata dan terbentuk secara kontinyu meningkatkan kekerasan paduan aluminium.

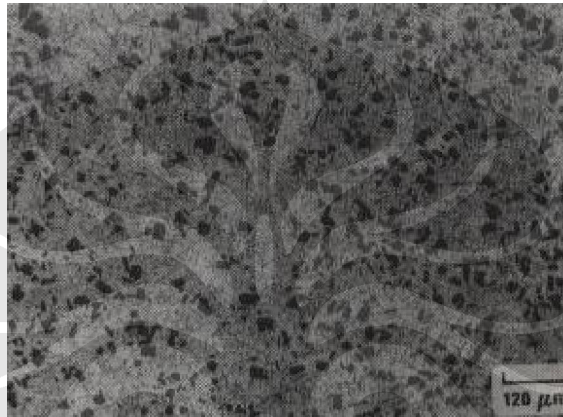
2.6.2 Pengaruh Sr Terhadap Paduan Al-Si Hipereutektik

Paduan Al-Si hipereutektik memiliki kadar silikon yang lebih dari 12%. Kadar Si yang cukup tinggi ini membuat munculnya endapan silikon primer. Pada paduan Al-Si hipereutektik *modifier* yang biasa dipergunakan adalah fosfor. Penambahan *modifier* fosfor pada paduan Al-Si hipereutektik bertujuan untuk memperhalus ukuran silikon primer sehingga ketahanan aus akan menjadi lebih baik. Sedangkan penambahan Sr sebagai *modifier* pada paduan Al-Si hipereutektik ini masih belum banyak diketahui [10].

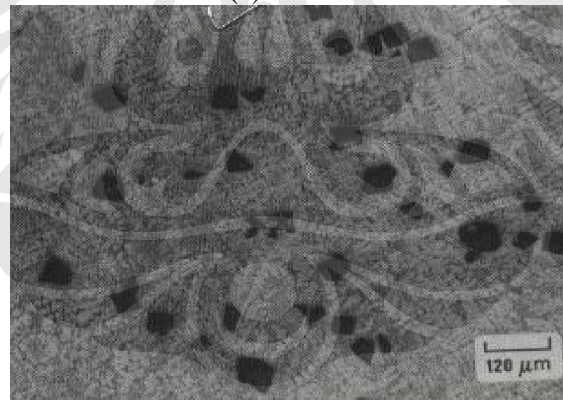
2.6.2.1 Pengaruh Sr Terhadap Mikrostruktur Paduan Al-Si Hipereutektik

Untuk mendapatkan sifat mekanis yang baik pada paduan Al-Si hipereutektik pada dasarnya adalah dengan cara mengubah bentuk silikon primer dan silikon eutektik secara bersamaan [10]. Telah diketahui bahwa fasa silikon primer pada paduan aluminium silikon hipereutektik dapat dihaluskan dengan penambahan fosfor. Sedangkan fasa silikon eutektik pada paduan aluminium silikon hipoeutektik dapat dimodifikasi dengan stronsium. Oleh sebab itu,

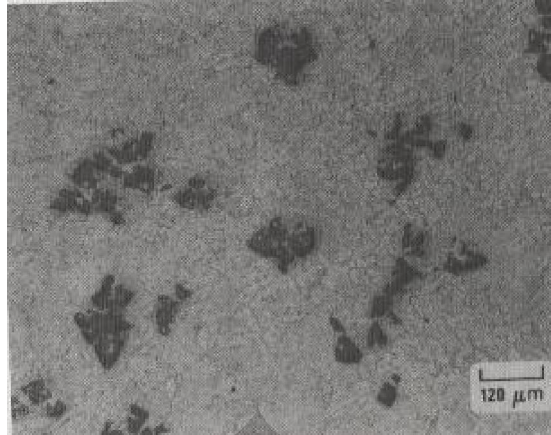
penambahan stronsium dan fosfor secara bersamaan merupakan solusi yang terbaik untuk mendapatkan sifat mekanis yang baik pada paduan hipereutektik ini. Akan tetapi pada kenyataannya penambahan kedua unsur tersebut tidak mungkin dilakukan secara bersama-sama pada paduan Al-Si hipereutektik karena stronsium menetralkan pengaruh fosfor. Stronsium dan fosfor ketika ditambahkan bersamaan ke dalam paduan Al-Si hipereutektik, akan bereaksi satu sama lain membentuk *strontium phosphide* ^[15]. Senyawa ini lebih stabil dan membuat pengkasaran pada silikon primer seperti pada gambar berikut :



(a) 0 % Sr



(b) 0.01 % Sr

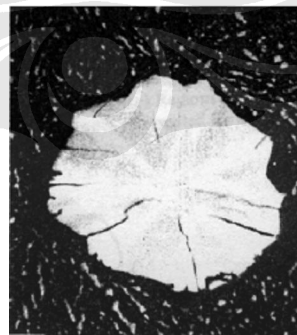


(c) 0.03 % Sr

Gambar 2.10 Mikrostruktur A390 Alloy (Al-17%Si) Dengan Penambahan Sr (a) 0% Sr (b) 0,01% Sr (c) 0,03 % Sr ^[15]

Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa penambahan stronsium pada A390 Alloy, dengan kadar stronsium yang sama dengan kadar yang dibutuhkan oleh suatu paduan Al-Si hipoeutektik untuk mendapatkan perubahan, yakni sebesar 0.01 % dan 0.03 %, membuat silikon primer menjadi lebih besar dan kasar dengan bentuk *block shape* (gambar b). Semakin banyak kadar Sr yang ditambahkan terlihat bahwa bentuk silikon primer berubah menjadi bentuk yang dendritik, sedangkan silikon eutektik menjadi lebih halus (gambar c).

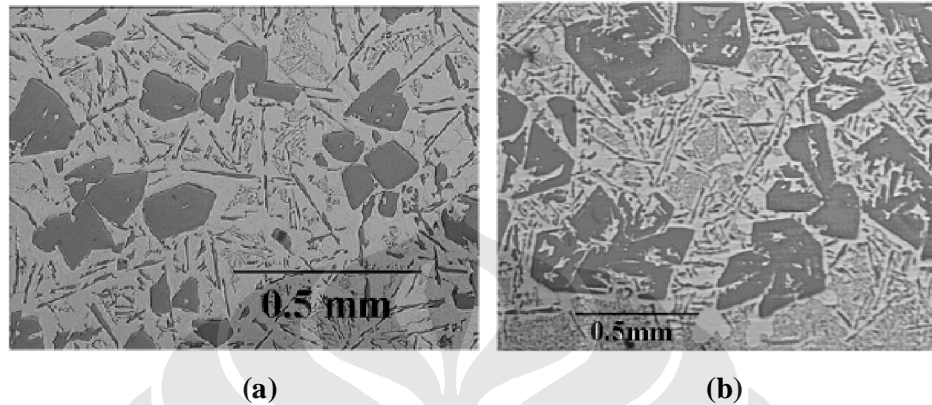
Teori lain menyebutkan bahwa penambahan *modifier* stronsium pada paduan aluminium-silikon hipereutektik akan mengubah morfologi silikon primer dari bentuk *massive* atau dendritik menjadi *spherical* ^[20].



Gambar 2.11 Silikon Primer *Spherical*

Penelitian yang dilakukan oleh M.Faraji dapat diketahui bahwa Sr menjadikan silikon primer menjadi lebih kasar (gambar a), namun jumlah unit fasa/unit volume fasa (N_A) menjadi lebih kecil. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa

persebaran silikon primer tidak merata. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh Sr dan P terhadap silikon primer dan silikon eutektik karena silikon primer dan silikon eutektik merupakan fasa yang sangat mempengaruhi sifat mekanis dari material ^[21].



Gambar 2.12 Mikrostruktur Al-20%Si dengan penambahan Sr :

(a) 0 % Sr (b) 0.04 % Sr

Adanya perbedaan pada teori tersebut mungkin dapat dikaitkan dengan perbedaan variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian. Perbedaan-perbedaan tersebut antara lain adalah : kadar *modifier* yang ditambahkan, jumlah silikon dalam paduan, pengotor dalam paduan serta kecepatan pembekuan. Perubahan mikrostruktur yang paling signifikan dengan penambahan stronsium pada aluminium hipereutektik terjadi pada silikon eutektik, terutama dengan kadar Si yang tidak terlalu tinggi. Silikon eutektik akan berubah dari bentuk jarum (*acicular*) menjadi bentuk yang lebih halus dan merata (*fibrous*). Perubahan ini sama dengan perubahan yang terjadi pada penambahan stronsium pada Al-Si hipoeutektik ^[10].

2.6.2.2 Pengaruh Sr terhadap Keausan Paduan Al-Si Hipereutektik

Modifikasi dapat meningkatkan ketahanan aus pada paduan Al-Si hipereutektik. Ketahanan aus ini berkaitan dengan kondisi mikrostruktur. Ketahanan aus yang tinggi dapat diperoleh dengan adanya partikel yang halus dan tersebar merata. Sehingga morfologi dan bentuk dari silikon primer maupun silikon eutektik pada paduan Al-Si hipereutektik memiliki peranan penting yang menentukan sifat ketahanan aus material ini ^[22]. Dengan penambahan stronsium, silikon eutektik akan berubah dari bentuk jarum (*acicular*) menjadi bentuk yang

lebih halus dan merata (*fibrous*). Adanya perubahan bentuk silikon eutektik ini akan meningkatkan ketahanan aus material.

Partikel silikon primer yang halus dan tersebar merata pada paduan Al-Si yang dimodifikasi dapat memiliki kemampuan menahan beban yang lebih besar dibandingkan partikel silikon primer yang kasar pada paduan Al-Si yang tidak dimodifikasi. Sebaliknya daerah bebas silikon primer pada paduan Al-Si yang tidak dimodifikasi lebih besar daripada yang dimodifikasi. Pada umumnya, daerah bebas silikon yang lebih besar akan menyebabkan penetrasi yang lebih dalam karena kemampuan menahan beban yang lebih rendah. Oleh karena itu, penetrasi rata-rata partikel abrasif akan lebih dalam untuk paduan Al-Si yang tidak dimodifikasi daripada yang dimodifikasi. Hal ini akan menambah aksi perusakan dari partikel abrasif.

2.6.2.3 Pengaruh Sr terhadap Kekuatan Tarik Paduan Al-Si Hipereutektik

Tensile strength dari paduan aluminium hipereutektik terutama sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel silikon primer. Ukuran partikel silikon primer yang besar menunjukkan *tensile strength* rendah, sedangkan ukuran silikon primer yang lebih kecil menghasilkan *tensile strength* yang lebih tinggi ^[23].

Tidak ada perubahan yang signifikan pada *tensile properties* paduan sebelum dan sesudah ditambahkan Sr pada paduan Al-Si yang telah ditambahkan P sebelumnya, walaupun terjadi pengkasaran silikon primer setelah ditambahkan. Nilai kekuatan tarik pada paduan yang belum ditambahkan sebesar 198 MPa sedangkan dengan penambahan phosphor sebesar 212 MPa sedangkan nilai elongasi tidak mengalami perubahan yang cukup berarti. Penambahan Sr tanpa adanya penambahan P belum banyak diketahui pengaruhnya terhadap sifat mekanis suatu paduan ^[10].

2.6.3 Penambahan *Modifier* Sr Berlebih pada Paduan Al-Si Hipereutektik

Penelitian yang dilakukan oleh Kevin Roger, dimana untuk menghasilkan struktur dominan berupa matriks eutektik Al-Si dengan Si primer yang tersebar merata pada paduan hipereutektik dapat dilakukan dengan penambahan *modifier* Sr yang berlebih yaitu dalam *range* 0.1% sampai dengan 0.35%^[28]. Jika kadar Sr kurang dari 0.10% maka modifikasi eutektik tidak diperoleh. Sedangkan jika lebih dari 0.35% Sr maka tidak ada efek yang menguntungkan dalam pengontrolan pembentukan silikon primer. Kadar Sr lebih dari 0.35% akan cenderung menghasilkan volume fraksi partikel intermetalik yang berlebih sehingga justru dapat menurunkan sifat-sifat mekanis paduan.

Kondisi hipereutektik dalam penemuan tersebut agar diperoleh struktur eutektik yang termodifikasi dan bebas silikon primer atau silikon primer yang tersebar merata dibatasi dengan kadar Si sebesar 13-15%. Kadar Si dibawah 12% tentu saja bukan persyaratan kondisi hipereutektik. Sedangkan jika kadar Si lebih dari 16% maka akan sulit untuk mendapatkan struktur mikro yang bebas dari partikel silikon primer atau silikon primer tersebar merata dan partikel silikon primer yang terbentuk cenderung berukuran besar.

Penambahan Sr lebih dari 0.10% pada paduan aluminium silikon hipereutektik akan menghasilkan struktur mikro dimana silikon primer tersebar secara merata dan bebas dari segregasi serta partikel intermetalik Sr yang merata dan tidak berbentuk *platelet*^[28]. Secara dominan mikrostruktur akan terdiri dari matriks eutektik. Penambahan Sr yang berlebih ini dengan catatan harus disertai dengan kandungan Ti yang lebih dari 0.005% untuk mendapatkan hasil modifikasi eutektik seperti yang diharapkan.

Dari hasil penambahan *modifier* Sr yang berlebih tersebut maka kekuatan mekanis paduan aluminium silikon akan meningkat dan diperoleh paduan yang memiliki ketahanan aus tinggi, sifat mampu permesinan dan mampu cor yang baik serta tahan terhadap temperatur tinggi^[28].