

## BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Uji komposisi kimia dilakukan terhadap keseluruhan sampel untuk setiap variabel. Satu sampel uji komposisi kimia ditembak sebanyak tiga kali kemudian diambil nilai rata-ratanya. Kadar unsur paduan terutama silikon dan stronsium aktual terlihat terdapat sedikit perbedaan dengan target yang telah perhitungan. Berikut tabel hasil pengujian komposisi kimia yang didapatkan :

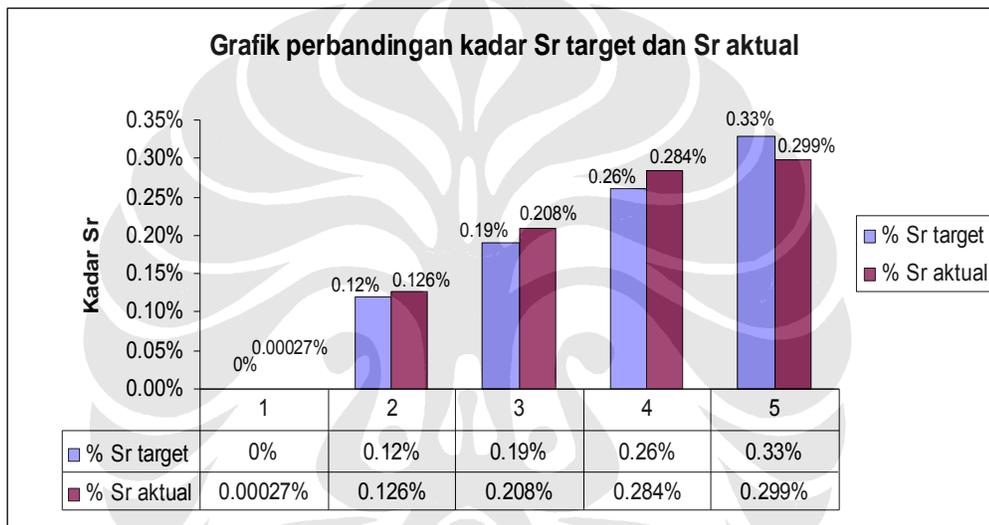
Tabel 4.1 Komposisi AC8A

Unsur Paduan	0% Sr	0.12% Sr	0.19% Sr	0.26% Sr	0.33% Sr
Si	13.485	14.004	13.979	13.817	13.696
Cu	1.465	1.192	1.132	1.149	1.145
Mg	1.190	1.090	1.036	1.060	1.042
Zn	0.134	0.093	0.088	0.090	0.087
Fe	0.370	0.439	0.421	0.427	0.422
Mn	0.034	0.074	0.068	0.069	0.067
Ni	0.673	0.876	0.833	0.828	0.839
Ti	0.149	0.157	0.156	0.156	0.154
Pb	0.041	-	-	-	-
Sn	0.024	-	-	-	-
Cr	0.017	0.016	0.015	0.015	0.016
<b>Sr</b>	<b>0.000</b>	<b>0.126</b>	<b>0.208</b>	<b>0.284</b>	<b>0.299</b>
P	0.002	0.003	0.003	0.004	0.002

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia atau spektrometer di atas, kadar silikon yang didapatkan berada pada *range* 13.485 % sampai dengan 14.004 %. Hal ini menunjukkan bahwa paduan Al-Si sudah berada pada kondisi hipereutektik, dimana kadar silikon lebih dari 12.7% <sup>[7]</sup>. Target pada saat penambahan silikon menurut perhitungan yaitu sebesar 14.7%. Berarti kadar silikon aktual lebih kecil dibandingkan dengan kadar silikon yang telah ditargetkan.

Selain kadar silikon, kadar stronsium aktual juga berbeda dengan target yang diinginkan. Untuk penambahan stronsium target 0.12% didapatkan stronsium aktual sebesar 0.126%, target 0.19% Sr didapatkan kadar aktual 0.208% Sr, target 0.26% Sr kadar aktualnya 0.284% dan kadar target 0.33% Sr didapat

kadar aktual sebesar 0.299%. Adanya perbedaan baik kadar Si maupun Sr pada target dan aktual kemungkinan bisa disebabkan karena proses *mixing* yang kurang merata sehingga pencampuran menjadi kurang homogen. Sehingga ketika diuji komposisi kimia ada daerah yang kadar Sr aktualnya lebih kecil dan ada yang lebih besar dari target. Selain itu, kadar Si yang jauh lebih kecil dari target ketika perhitungan *material balance*, bisa juga disebabkan karena kadar Si disini hanya perkiraan saja sekitar 99.99%, tidak diketahui kadar pastinya berapa. Grafik berikut menunjukkan perbandingan kadar Sr target dengan kadar Sr aktual yang diperoleh:



Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Kadar Sr Target dan Sr Aktual

Selain kandungan stronsium dan silikon yang berbeda dari target, dari hasil uji komposisi kimia juga menunjukkan kadar Cu, Mg, Fe dan Mn yang bervariasi pada setiap sampel. Akan tetapi variasi kadar unsur-unsur tersebut tidak terlalu jauh perbedaannya satu sama lain. Sebagai contoh, kadar Cu berkisar antara 1.13-1.46%. Unsur-unsur paduan tersebut memiliki peranan penting dalam menentukan sifat mekanis dari paduan aluminium silikon. Misalnya unsur Cu berperan meningkatkan kekuatan dan kekerasan dengan membentuk fasa intermetalik  $\text{Cu}_2\text{Al}$  [6]. Demikian juga unsur paduan Mg, Mn dan Fe, berfungsi sebagai pembentuk fasa intermetalik yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium silikon.

Dalam penelitian ini digunakan penambahan *modifier* Sr pada kondisi hipereutektik dalam *range* 0.10-0.35%. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Kevin Roger dalam jurnalnya yang berjudul “*Casting of Modified Al Base Si-Cu-Ni-Mg-Mn-Zr Hypereutectic Alloy*”, 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%<sup>[28]</sup>. 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.

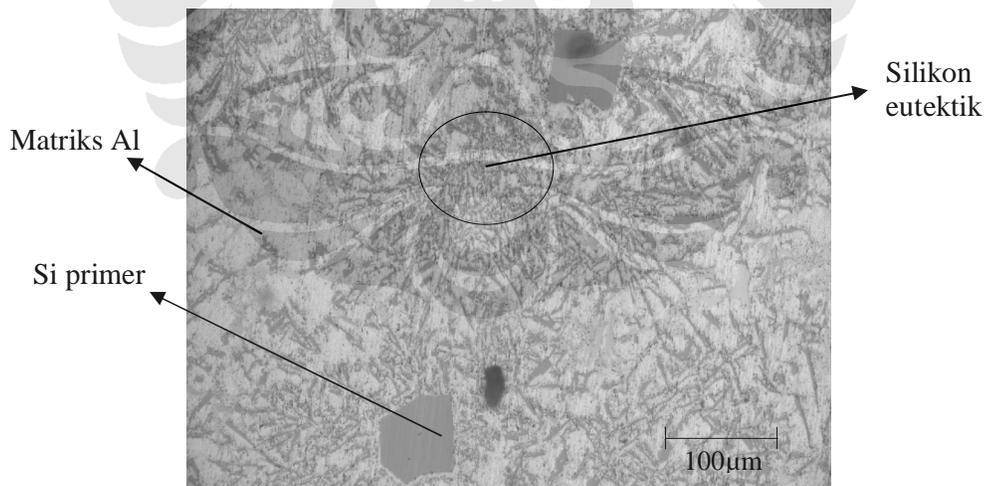
Penambahan Sr lebih dari 0.10% pada paduan aluminium silikon hipereutektik akan menghasilkan struktur mikro dimana silikon primer tersebar secara merata dan bebas dari segregasi serta partikel intermetalik Sr yang merata dan tidak berbentuk *platelet*<sup>[28]</sup>. Secara dominan mikrostruktur akan 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 uji komposisi kimia di atas, kadar Ti pada paduan lebih dari 0.005%.

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<sup>[28]</sup>. Selain itu, paduan yang dihasilkan dari penambahan Sr berlebih ini menunjukkan sifat ketahanan fatik yang meningkat.

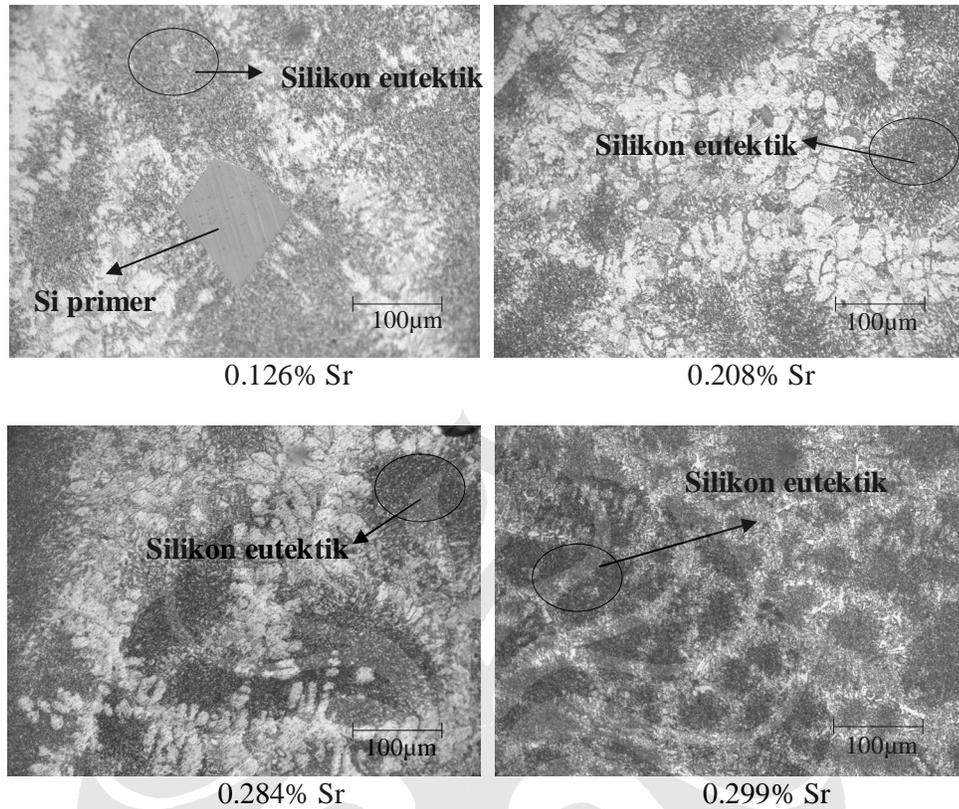
## 4.2 Pengamatan Struktur Mikro

Sifat mekanis suatu paduan Al-Si ditentukan oleh struktur mikro yang terbentuk pada paduan tersebut. Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk melihat perubahan struktur mikro yang terjadi akibat penambahan *modifier* stronsium. Pada paduan Al-Si, terdapat dua fasa yang sangat menentukan sifat mekanis, yaitu silikon eutektik dan silikon primer. Perubahan bentuk yang terjadi pada kedua fasa ini turut menyebabkan perubahan pada sifat mekanis paduan. Selain itu, sifat mekanis paduan Al-Si ini juga dipengaruhi oleh ukuran, bentuk dan distribusi fasa intermetalik, jarak antara lengan dendrit (*Dendrite Arm Spacing*) serta bentuk dan ukuran butir<sup>[1]</sup>.

Pengujian mikrostruktur dilakukan dengan mikroskop optik digital dengan dua kali perbesaran 450X dan 1000X. Akan tetapi yang ditampilkan dalam pembahasan ini hanya perbesaran 450X saja karena terlihat lebih jelas perubahannya. Setiap sampel variabel penambahan Sr diamati dan dilakukan foto struktur mikro. Untuk setiap sampel diambil dua buah foto struktur mikro dari tempat pengambilan foto yang berbeda, kecuali sampel 0% Sr hanya di ambil satu kali foto struktur mikro.



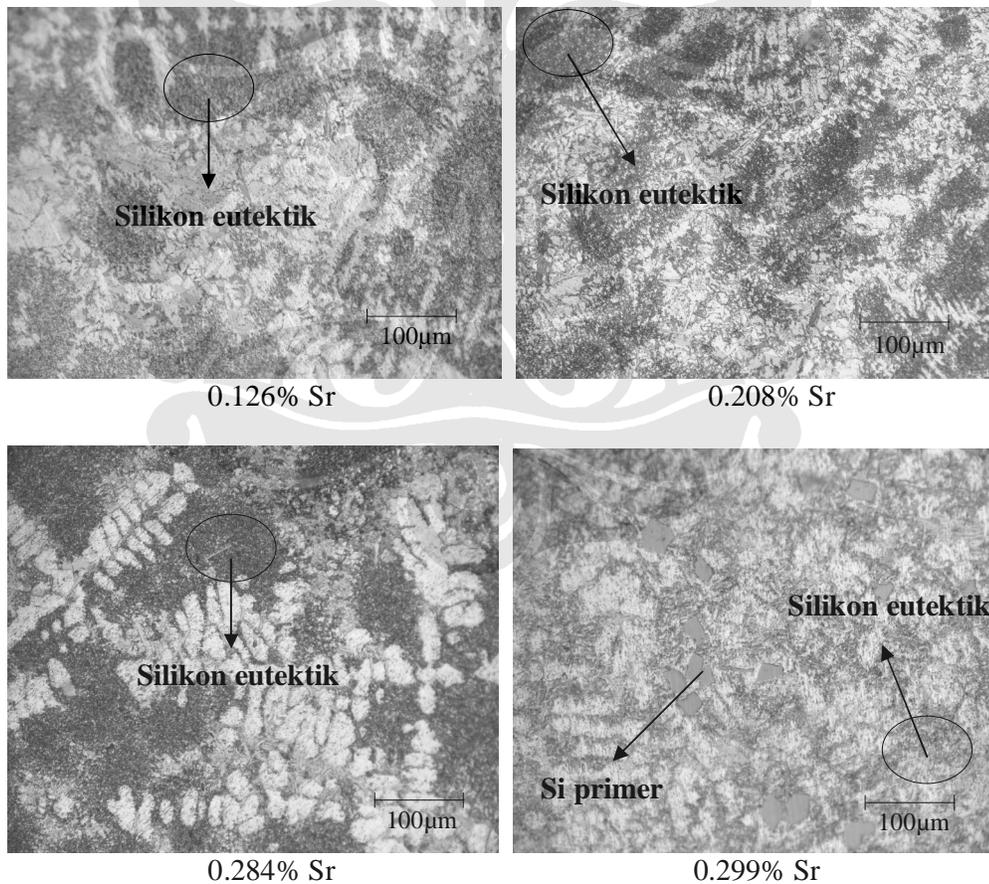
Gambar 4.2 Foto Struktur Mikro Tanpa Penambahan *Modifier* Sr



Gambar 4.3 Struktur Mikro 4 Sampel Variabel Penambahan Stronsium pada Pengambilan Foto Mikro yang Pertama

Dari pengamatan foto struktur mikro di atas, pada sampel tanpa penambahan Sr terlihat struktur silikon eutektik yang masih kasar dan berbentuk jarum-jarum kasar (*acircular*). Struktur silikon yang berbentuk seperti ini memiliki konsentrasi tegangan yang lebih tinggi sehingga sifat-sifat mekanisnya lebih rendah. Kemudian pada sampel dengan penambahan Sr, secara umum terlihat struktur silikon eutektik yang lebih halus dan berbentuk *fibrous*. Struktur silikon eutektik yang lebih halus dan tersebar merata tampak pada sampel dengan penambahan Sr lebih tinggi. Dalam hal ini berarti struktur silikon yang termodifikasi jumlahnya semakin banyak dengan penambahan *modifier* Sr yang semakin tinggi. Pada sampel dengan penambahan 0.299% Sr tampak struktur mikro yang dominan berupa matriks eutektik. Silikon eutektik terbentuk sangat halus dan tersebar lebih merata. Hal ini yang menyebabkan pada pengujian kekerasan dan pengujian keausan, sampel dengan variabel penambahan Sr terbanyak ini memiliki kekerasan yang paling tinggi dan laju aus terendah.

Pada foto struktur mikro di atas, silikon primer tidak dijumpai pada setiap sampel yang ada. Pada paduan aluminium silikon hipereutektik, seharusnya pada struktur mikronya terdapat endapan partikel silikon primer. Adanya perbedaan kecenderungan ini bisa disebabkan karena kadar silikon yang masih tergolong rendah sebagai paduan aluminium silikon hipereutektik. Penyebab lainnya karena daerah pengambilan sampel mikrostruktur tidak terbentuk silikon. Pada reaksi hipereutektik, akan terbentuk silikon primer terlebih dahulu. Karena densitas silikon primer ini lebih kecil dibanding densitas logam cair maka akan cenderung berfloatasi ke bagian atas coran. Sedangkan sampel diambil dari bagian bawah coran sehingga tidak terlihat atau hanya terlihat sedikit adanya silikon primer. Selain itu, pembentukan fasa-fasa pada diagram fasa Al-Si dipengaruhi oleh berbagai faktor yang harus benar-benar terkontrol secara presisi.



Gambar 4.4 Struktur Mikro 4 Sampel Variabel Penambahan Stronsium pada Pengambilan Foto Mikro Kedua

Pada daerah lain pengambilan foto struktur mikro, terlihat kecenderungan yang sama dengan daerah pengambilan pertama. Secara umum dengan penambahan *modifier* Sr, terbentuk silikon eutektik yang semakin halus dan berbentuk *fibrous* bila dibandingkan dengan tanpa penambahan Sr. Bentuk silikon eutektik ini sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanis paduan. Dimana silikon eutektik yang semakin halus dan berbentuk *fibrous* memiliki kekuatan mekanik yang lebih tinggi.

Selain perubahan pada struktur silikon eutektik, terlihat adanya perubahan pada jarak antara lengan dendrit (*Dendrite Arm Spacing/DAS*). Dengan penambahan *modifier* Sr akan membuat jarak antara lengan dendrit menjadi semakin pendek. Walaupun tidak dilakukan pengukuran terhadap lengan dendrit, dengan membandingkan foto mikro sebelum penambahan dan setelah penambahan *modifier* Sr dapat dilihat adanya kecenderungan DAS semakin kecil. Dimana DAS yang semakin kecil dan halus ini akan meningkatkan sifat-sifat mekanis paduan<sup>[1]</sup>. Dapat dilihat dari hasil uji mekanis, dimana kekerasan, ketahanan aus dan kekuatan tarik material meningkat dengan penambahan *modifier* Sr. Perubahan DAS ini berpengaruh juga terhadap pembentukan fasa intermetalik. Dengan penambahan Sr yang akan menurunkan ukuran DAS, maka sel dendrit tempat pembentukan fasa intermetalik juga semakin halus. Dengan semakin halusnyanya ukuran sel dendrit ini maka fasa intermetalik yang terbentuk juga semakin halus dan tersebar. Fasa intermetalik berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanis paduan<sup>[1]</sup>. Distribusi dan bentuk fasa intermetalik yang tersebar merata akan membuat sifat-sifat mekanis paduan menjadi meningkat.

Pada sampel dengan penambahan 0.299% Sr terlihat terdapat silikon primer yang bentuknya lebih kecil ukurannya dan lebih tersebar. Hal ini sesuai dengan literatur dimana penambahan *modifier* Sr pada paduan Al-Si hipereutektik akan menekan pertumbuhan silikon primer<sup>[7]</sup>. Silikon primer yang semula berukuran besar tanpa penambahan Sr menjadi lebih kecil dan lebih tersebar karena ditekan pertumbuhannya oleh *modifier* Sr.

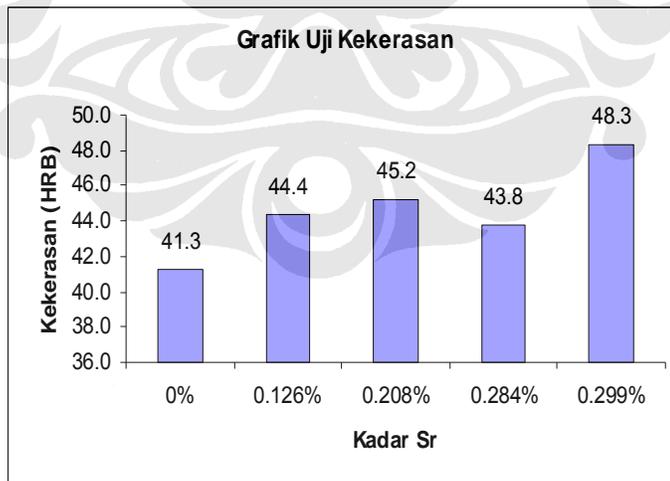
### 4.3 Pengaruh Penambahan Sr Terhadap Kekerasan Paduan Al-Si Hipereutektik

Untuk setiap sampel, pengujian kekerasan dilakukan sebanyak 5 kali kemudian diambil nilai kekerasan rata-ratanya. Uji kekerasan dilakukan untuk kelima variabel (0% Sr, 0.126% Sr, 0.208% Sr dan 0.284% Sr dan 0.299% Sr) dengan metode Rockwell tipe B. Hasil pengujian kekerasan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.2 Nilai Kekerasan untuk Setiap Variabel

Kadar Sr (%)	Kekerasan (HRB)					Hardness Average (HRB)
	I	II	III	IV	V	
0%	42.3	44.2	40.1	41.5	38.3	41.3
0.126%	45	42.5	40.9	45.3	48.3	44.4
0.208%	50.6	43.7	43.7	44.4	43.7	45.2
0.284%	45.5	44.2	43.6	43.1	42.6	43.8
0.299%	52.1	46.2	46.3	50	46.8	48.3

Dari data yang diperoleh kemudian diplot dalam bentuk grafik kadar Sr versus kekerasan (HRB). Grafik yang didapatkan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.5 Pengaruh Stronsium Terhadap Nilai Kekerasan

Dari data pengujian kekerasan di atas, diketahui bahwa kekerasan akan cenderung meningkat seiring dengan penambahan *modifier* stronsium. Walaupun pada penambahan *modifier* stronsium 0.284% nilai kekerasan menurun bila

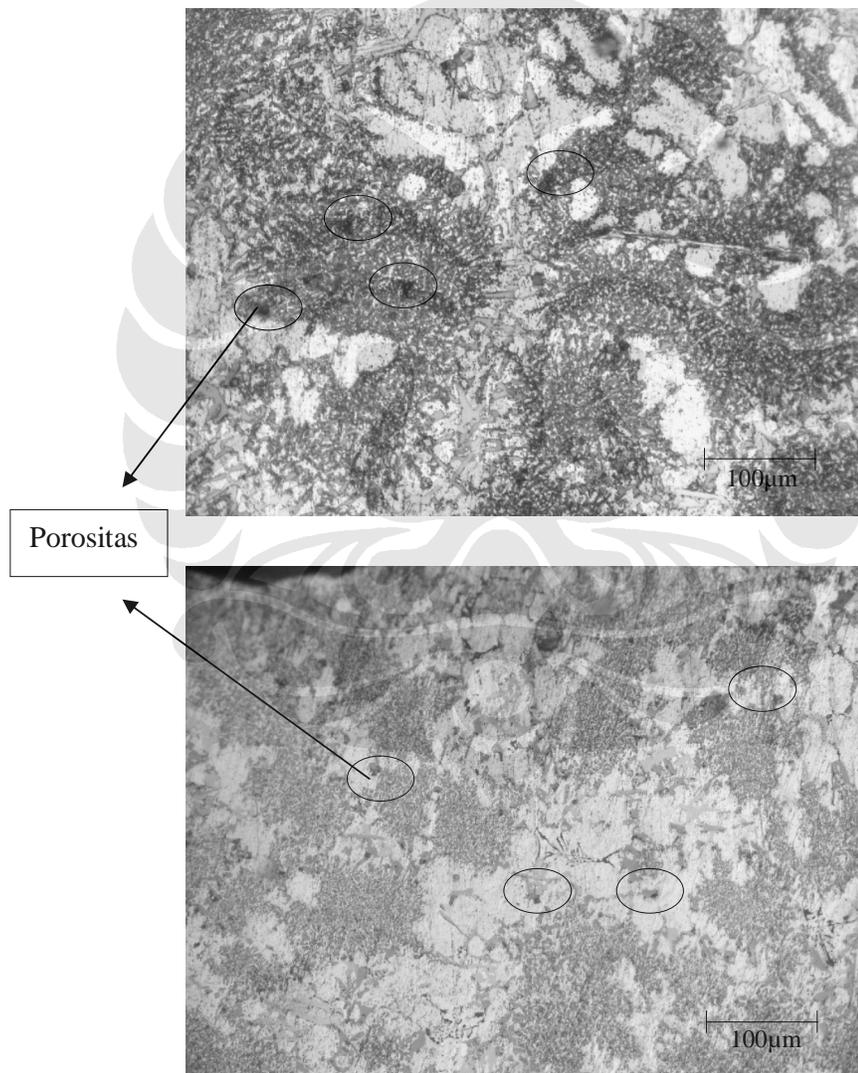
dibandingkan dengan penambahan 0.126% Sr dan 0.208% Sr, tetapi tetap lebih besar nilainya jika dibandingkan dengan tanpa penambahan *modifier* Sr. Adanya kecenderungan peningkatan nilai kekerasan ini disebabkan oleh adanya perubahan mikrostruktur dari paduan aluminium silikon hipereutektik tersebut. Dimana silikon eutektik yang semula berbentuk *acircular* atau jarum-jarum yang tajam berubah menjadi bentuk *fibrous* yang lebih halus, bulat dan tersebar merata. Silikon eutektik yang berbentuk *fibrous* ini memiliki konsentrasi tegangan yang lebih rendah sehingga sifat-sifat mekanis dalam hal ini kekerasan menjadi meningkat.

Jika dibandingkan dengan nilai kekerasan sebelum penambahan *modifier*, penambahan kadar *modifier* 0.299 % Sr (variabel penambahan terbesar) memiliki nilai peningkatan kekerasan yang terbesar. Nilai kekerasan ini merupakan nilai kekerasan paling tinggi di antara semua semua variabel penambahan Sr. Hal ini bisa dikaitkan dengan jumlah *modifier* dengan struktur yang termodifikasi, dimana semakin banyak jumlah *modifier* yang ditambahkan maka semakin banyak pula struktur yang termodifikasi sehingga kekerasannya juga semakin banyak mengalami peningkatan <sup>[18]</sup>. Penambahan ini harus berada dalam *range* modifikasi yang efektif, jangan sampai overmodifikasi yang justru akan menurunkan kekerasan.

Selain disebabkan oleh perubahan struktur silikon eutektik, peningkatan kekerasan bisa juga disebabkan oleh fasa intermetalik yang terbentuk lebih tersebar merata pada matriks dengan penambahan *modifier* Sr. Penambahan Sr akan menurunkan ukuran jarak antar lengan dendrit (*Dendrite Arm Spacing/DAS*) sehingga ukuran sel dendrit tempat pembentukan fasa intermetalik semakin halus. Dengan semakin halusnya ukuran sel ini maka fasa intermetalik yang terbentuk juga semakin halus dan tersebar sehingga kekerasan meningkat <sup>[29]</sup>.

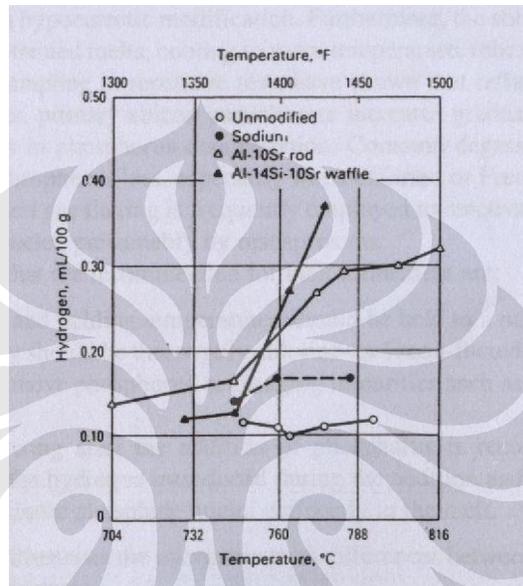
Kekerasan variabel penambahan Sr 0.284% mengalami penurunan bila dibandingkan dengan variabel penambahan Sr 0.126% dan 0.208%. Seharusnya semakin besar penambahan *modifier* Sr semakin banyak struktur yang termodifikasi sehingga kekerasannya juga semakin besar, dengan catatan variabel-variabel proses misalnya kecepatan pembekuan dan jumlah porositas terkontrol. Terjadinya penurunan kekerasan variabel penambahan Sr 0.284% dibandingkan

variabel Sr 0.126% dan 0.208% bisa disebabkan oleh adanya porositas. Setelah diamati struktur mikronya, sampel variabel penambahan Sr 0.284% ini banyak dijumpai porositas. Porositas yang terlihat berukuran kecil-kecil dan tersebar merata. Adanya porositas bisa menurunkan nilai kekerasan yang didapatkan [4]. Pada saat indentasi, bola baja sebagai indenter akan mengenai daerah porositas sehingga kekerasan yang didapat menjadi lebih rendah. Uji kekerasan dilakukan dengan metode Rockwell tipe B, jadi tidak dapat memilih daerah indentasi yang bebas porositas secara mikroskopis.



Gambar 4.6 Porositas pada Sampel Variabel Penambahan 0.284% Sr dari Dua Daerah Pengambilan Foto yang Berbeda

*Modifier* mempengaruhi kelarutan hidrogen di dalam aluminium cair <sup>[17]</sup>, terutama penambahan stronsium. Pada penambahan *modifier* stronsium, *master alloy* dapat terkontaminasi hidrogen dalam kadar yang tinggi sehingga menyebabkan terbentuknya porositas. Pada grafik berikut ditunjukkan kandungan hidrogen akan meningkat dengan penambahan *modifier* terutama Sr.



Gambar 4.7 Grafik Kandungan Hidrogen Dengan dan Tanpa Penambahan *Modifier* pada Berbagai Temperatur <sup>[7]</sup>

Fasa silikon primer yang terdapat pada paduan hipereutektik ini tidak mempengaruhi secara signifikan terhadap nilai kekerasan. Silikon primer terbentuk dalam jumlah yang sedikit dikarenakan kadar silikon yang rendah. Fasa yang sedikit tentunya tidak memberikan pengaruh yang signifikan dibandingkan dengan silikon eutektik yang lebih banyak dan dominan. Dari hasil pengamatan struktur mikro, fasa silikon primer ini tidak terlalu banyak terlihat.

#### 4.4 Pengaruh Penambahan Sr Terhadap Ketahanan Aus Paduan Al-Si Hipereutektik

Pengujian keausan ini penting dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan *modifier* Sr terhadap ketahanan aus material. Paduan AC8A disini diaplikasikan sebagai material untuk pembuatan piston yang membutuhkan

ketahanan aus tinggi. Sedangkan paduan aluminium silikon hipereutektik dikarakteristikan salah satunya memiliki ketahanan aus yang tinggi. Penambahan *modifier* Sr yang berlebih dari penambahan umumnya, menurut literatur akan memiliki ketahanan aus yang tinggi dan tahan terhadap temperatur tinggi [28].

Pengujian keausan dilakukan pada semua sampel variabel penambahan Sr. Setiap sampel diuji sebanyak 4 titik pengujian kemudian di ambil nilai rata-ratanya. Data yang didapatkan dari hasil uji keausan ini berupa lebar celah yang terabrasi dalam satuan mm. Data lebar celah yang terabrasi ini digunakan untuk menentukan volume material yang terabrasi. Kemudian dari volume material yang terabrasi tersebut ditentukan laju keausan material. Semakin kecil nilai laju keausan material, maka semakin besar ketahanan aus material tersebut. Sebaliknya, semakin besar nilai laju keausan, maka semakin rendah ketahanan aus material tersebut. Berikut data hasil pengujian keausan yang didapatkan :

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Keausan

No	Kadar Sr %	Lebar Celah Terabrasi b (mm)				Rata-Rata b (mm)	Volume Terabrasi (mm <sup>3</sup> )	Laju Aus (mm <sup>3</sup> /mm)
		b1	b2	b3	b4			
1	0 %	6.578	5.671	5.809	5.197	5.814	3.275	3.27 x 10 <sup>-5</sup>
2	0.126 %	5.856	5.116	4.733	4.058	4.941	2.010	2.01 x 10 <sup>-5</sup>
3	0.208 %	5.043	4.108	5.391	4.577	4.780	1.820	1.82 x 10 <sup>-5</sup>
4	0.284 %	5.687	4.48	4.898	5.525	5.147	2.273	2.27 x 10 <sup>-5</sup>
5	0.299 %	3.488	4.144	4.623	4.777	4.258	1.287	1.28 x 10 <sup>-5</sup>

Besarnya volume material yang terabrasi (W) dihitung dengan menggunakan rumus :

$$W = \frac{B.b^3}{12r}$$

.....  
 .... (4.1)

Sedangkan laju keausan ditentukan (V) ditentukan sebagai perbandingan volume terabrasi (W) dengan jarak luncur x (*setting* pada mesin uji) :

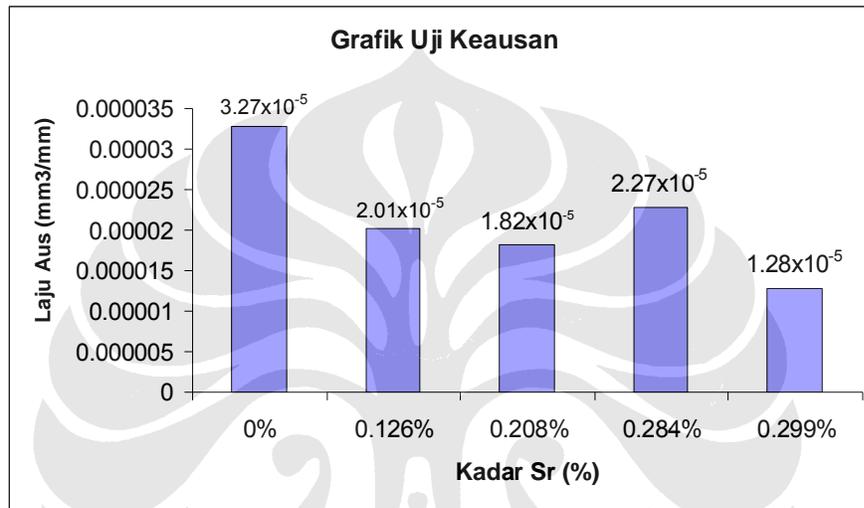
$$V = \frac{W}{x} = \frac{B.b^3}{12r.x}$$

.....(4.2)

dimana :

B (tebal cincin putar) = 3 mm  
r (jari-jari cincin putar) = 15 mm  
x (jarak luncur) = 100 m

Setelah itu data yang didapatkan diplot sebagai grafik kadar Sr versus laju keausan. Berikut grafik hasil pengujian keausan yang didapatkan :

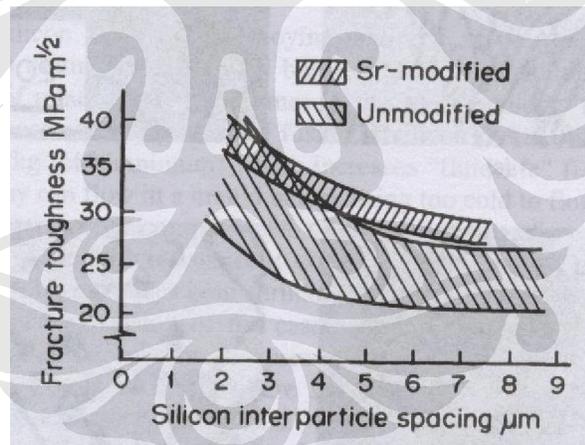


Gambar 4.8 Pengaruh Penambahan Sr Terhadap Laju Keausan

Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa seiring dengan penambahan *modifier* Sr laju aus material cenderung semakin menurun. Penurunan laju aus menunjukkan bahwa material semakin tahan terhadap keausan. Walaupun pada variabel penambahan Sr sebesar 0.284% laju ausnya lebih besar dari variabel 0.126% Sr dan 0.208% Sr, tapi masih tetap di bawah laju aus tanpa penambahan *modifier* Sr. Secara garis besar laju aus cenderung semakin menurun seiring dengan penambahan *modifier* Sr. Dari aspek metalurgi, faktor utama yang mempengaruhi karakteristik keausan material adalah kekerasan, ketangguhan material, komposisi kimia dan struktur mikro <sup>[23]</sup>.

Adanya penurunan laju aus material ini berhubungan dengan perubahan kondisi struktur mikronya. 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 *modifier* Sr, silikon eutektik akan berubah dari bentuk jarum (*acicular*) menjadi bentuk yang lebih halus dan merata (*fibrous*). Adanya perubahan bentuk silikon eutektik akan meningkatkan ketahanan aus material sehingga laju ausnya menjadi menurun. Karena kadar Si tidak terlalu tinggi, maka ketahanan aus paduan pada penelitian ini dominan ditentukan oleh struktur silikon eutektiknya daripada fasa silikon primer. Ketahanan aus berhubungan dengan *fracture toughness* material [17]. Dimana material dengan *fracture toughness* yang tinggi memiliki ketahanan aus yang tinggi. Dengan penambahan *modifier* Sr maka *fracture toughness* material lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa penambahan Sr. *Fracture toughness* merupakan sifat yang menunjukkan pengukuran ketahanan material terhadap *brittle fracture* ketika terdapat retak. Grafik berikut menunjukkan *fracture toughness* material dengan penambahan Sr dan tanpa penambahan Sr.



Gambar 4.9 Grafik *Fracture Toughness* Dengan dan Tanpa *Modifier* Sr [7]

Umumnya keausan didefinisikan sebagai kehilangan material secara progresif atau pemindahan sejumlah material dari suatu permukaan sebagai suatu hasil pergerakan relatif antara permukaan tersebut dan permukaan lainnya [23]. Sedangkan kekerasan didefinisikan sebagai ketahanan material terhadap gaya penekanan dari material lain yang lebih keras [23]. Oleh sebab itu, semakin keras material, maka semakin sulit pula terjadinya kehilangan material sebagai akibat

dari pergerakan relatif cincin putar terhadap material dalam pengujian keausan. Semakin keras suatu material maka akan semakin tahan terhadap keausan.

Hasil uji keausan ini berkorelasi dengan hasil uji kekerasan, dengan penambahan *modifier* Sr, baik kekerasan maupun ketahanan aus material semakin meningkat. Sama seperti hasil uji kekerasan yang mengalami penurunan pada variabel 0.208% Sr jika dibandingkan dengan 0.126% Sr dan 0.208% Sr, ketahanan aus untuk sampel 0.208% Sr juga mengalami penurunan yang ditunjukkan dengan laju aus yang meningkat.

Semakin banyak jumlah *modifier*, tapi masih dalam *range* yang efektif untuk modifikasi, maka semakin banyak struktur yang termodifikasi sehingga ketahanan ausnya semakin baik. Akan tetapi keausan ini bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respon material terhadap sistem luar (kontak permukaan)<sup>[23]</sup>. Material apapun dapat mengalami keausan disebabkan mekanisme yang beragam, dan hal ini berhubungan erat dengan gesekan dan pelumasan.

#### **4.5 Pengaruh Penambahan Sr Terhadap Kekuatan Tarik dan Elongasi Paduan Aluminium Hipereutektik**

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin tarik Shimadzu. Untuk setiap variabel penambahan Sr terdapat 4 buah sampel uji tarik kecuali variabel Sr 0 % hanya satu buah sampel. Dua sampel pertama dihasilkan data uji tarik dengan tegangan maksimum dalam satuan  $\text{kgf/mm}^2$ . Dihasilkan grafik *stroke strain* (%) versus *stress* ( $\text{kgf/mm}^2$ ). Sedangkan dua sampel uji tarik yang kedua, didapat tegangan maksimum dalam satuan  $\text{N/mm}^2$ . Grafik yang diperoleh berupa *stroke* (mm) vs *stress* ( $\text{N/mm}^2$ ). Pengujian tarik ini untuk mengetahui nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) serta elongasi dari paduan Al-Si hipereutektik sebelum dan sesudah penambahan *modifier* Sr. UTS merupakan tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum terjadinya perpatahan. Sedangkan elongasi diukur sebagai penambahan panjang ukur setelah perpatahan terhadap panjang awalnya. Elongasi ini menggambarkan keuletan paduan, yaitu kemampuan logam menahan deformasi hingga terjadinya perpatahan.

Berikut tabel hasil pengujian tarik yang didapatkan :

Tabel 4.4 Nilai UTS untuk Setiap Variabel Penambahan Sr

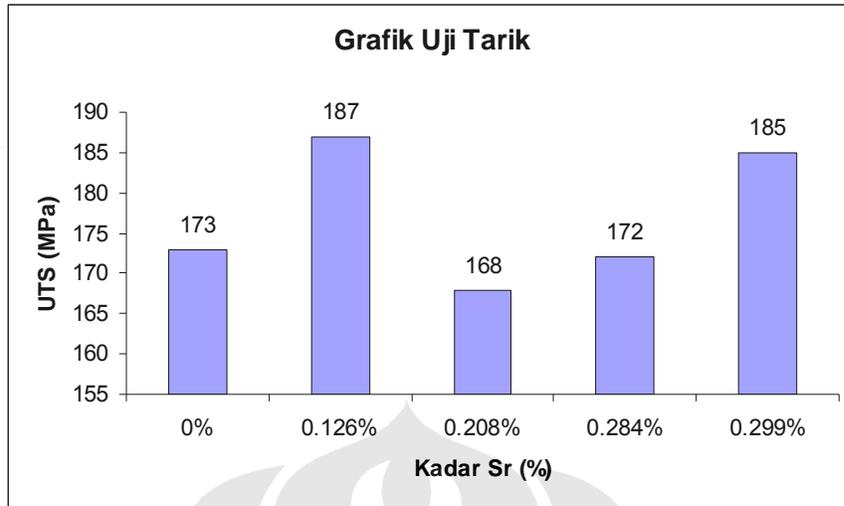
Kadar Sr	Sampel	Teg. Maks (kgf/mm <sup>2</sup> )	Teg.Maks (MPa)	Teg. Maks.rata-rata (MPa)
0%	I	17.6514	173.651	173
0.126 %	I	19.2319	188.600	187
	II	19.2599	188.875	
	III	-	180.470	
	IV	-	190.773	
0.208%	I	16.2593	159.449	168
	II	17.3161	169.813	
	III	-	179.425	
	IV	-	163.956	
0.284%	I	18.4153	180.592	172
	II	18.3749	180.196	
	III	-	166.808	
	IV	-	163.367	
0.299%	I	19.1243	187.545	185
	II	18.4970	181.393	
	III	-	197.350	
	IV	-	175.588	

Nilai *Ultimate Tensile Strength* biasanya dinyatakan dalam satuan MPa (Mega Pascal). Karena hasil UTS dari dua sampel yang pertama masih dalam satuan kgf/mm<sup>2</sup>, maka satuan ini perlu dikonversi ke dalam Mpa. Nilai 1 Kgf/mm<sup>2</sup> sama dengan 9,80665 N/m<sup>2</sup>, sedangkan 1 N/mm<sup>2</sup> sama dengan 1 Mpa. Maka nilai UTS pada sampel I dan II dikonversikan ke dalam satuan MPa dengan cara dikalikan dengan 9,8066N<sup>[10]</sup>.

$$1 \text{ kgf/mm}^2 = 9.80665\text{N/mm}^2 \dots\dots\dots (4.3)$$

$$1 \text{ N/mm}^2 = 1\text{MPa} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$1 \text{ Kgf/mm}^2 = 9,80665 \text{ MPa} \dots\dots\dots (4.5)$$



Gambar 4.10 Pengaruh Penambahan Stronsium Terhadap Kekuatan Tarik

Dari hasil pengujian tarik di atas dapat dilihat bahwa kekuatan tarik meningkat dengan penambahan *modifier* Sr 0.126% dan Sr 0.299%. Tanpa penambahan *modifier* kekuatan tarik sebesar 173 Mpa kemudian menjadi 189 Mpa pada penambahan Sr 0.126%, naik sebesar 9.25%. Sedangkan pada penambahan Sr 0.299% terjadi peningkatan kekuatan tarik sebesar 6.93%. Akan tetapi pada penambahan *modifier* Sr 0.208% dan Sr 0.284% kekuatan tarik justru menurun jika dibandingkan tanpa penambahan Sr. Kekuatan tarik menurun menjadi 168 Mpa pada penambahan *modifier* Sr 0.208% dan menurun menjadi 172 Mpa pada penambahan Sr 0.284%.

Secara umum modifikasi akan meningkatkan kekuatan tarik paduan aluminium silikon <sup>[15]</sup>. Hal ini ini berhubungan dengan kondisi struktur mikro dimana terjadi perubahan struktur silikon primer yang semula berbentuk *acircular* menjadi *fibrous* atau *lamellar*. Pada tabel berikut dapat dilihat bagaimana modifikasi struktur silikon meningkatkan kekuatan tarik dan keuletan paduan.

Tabel 4.5 Pengaruh Struktur Silikon Terhadap Kekuatan Tarik dan Keuletan <sup>[15]</sup>

Struktur Silikon	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

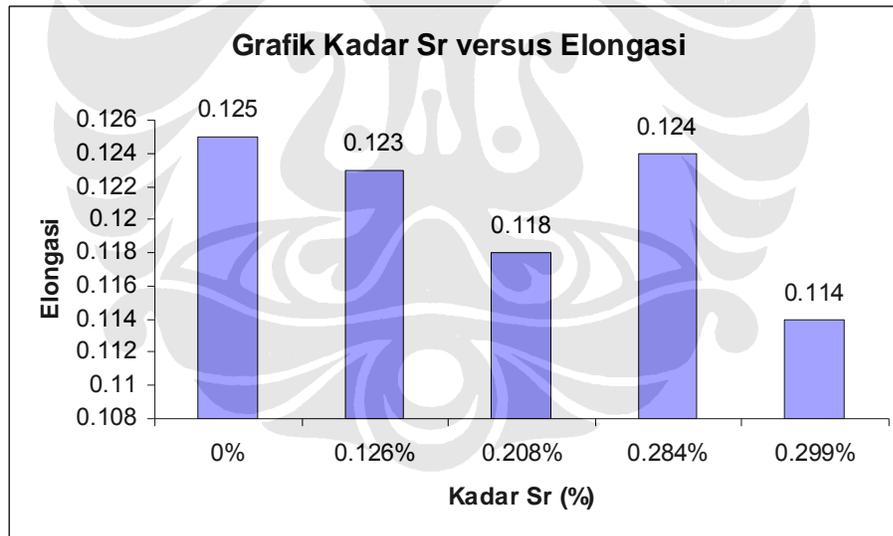
Proses modifikasi akan meningkatkan kekuatan tarik apabila dilakukan pengontrolan terhadap variabel-variabel proses seperti kecepatan proses dan jumlah porositas. Apabila variabel-variabel proses tersebut tidak terkontrol maka hasil dari pengaruh modifikasi akan menyimpang dari yang diharapkan. Kekuatan tarik berkorelasi dengan kekerasannya dimana semakin keras material semakin tinggi pula kekuatan tariknya<sup>[23]</sup>. Seharusnya dengan kekerasan yang cenderung semakin meningkat, maka kekuatan tarik juga akan semakin meningkat. Penurunan kekuatan tarik yang terjadi pada variabel 0.208% Sr dan 0.284% Sr bisa disebabkan oleh sampel yang tidak homogen dan adanya porositas pada sampel sehingga berpengaruh terhadap hasil uji tarik.

Adanya peningkatan kekuatan tarik pada variabel penambahan 0.126% dan 0.299% Sr bisa juga disebabkan oleh fasa intermetalik yang terbentuk menjadi lebih banyak dan tersebar karena pengaruh penambahan stronsium<sup>[29]</sup>. Jarak antar lengan dendrit atau ukuran sel dendrit menjadi lebih kecil. Sel dendrit ini merupakan tempat terbentuknya fasa intermetalik. Dengan semakin kecil ukuran dendrit maka jumlah sel akan semakin banyak. Oleh karena itu fasa intermetalik menjadi lebih banyak dan tersebar sehingga kekuatan tariknya meningkat.

Selain nilai UTS, hasil uji tarik juga dapat menunjukkan nilai elongasi yang menggambarkan kemampuan logam menahan deformasi hingga terjadi perpatahan. Elongasi menunjukkan keuletan material dimana semakin besar elongasi maka material akan semakin ulet. Nilai elongasi untuk dua sampel pertama (sampel I dan II) dapat langsung dibaca pada grafik karena hasil grafik uji tarik dari mesin yang digunakan disini dalam bentuk *stroke strain* (%) versus *stress*. Sedangkan dua sampel kedua (sampel III dan IV) nilai elongasi didapatkan dari pertambahan panjangnya.

Tabel 4.6 Nilai Elongasi Sampel

Kadar Sr	Sampel	Elongasi	Elongasi rata-rata
0%	I	0.125	0.125
0.126 %	I	0.125	0.123
	II	0.125	
	III	0.120	
	IV	0.120	
0.208%	I	0.105	0.118
	II	0.115	
	III	0.130	
	IV	0.120	
0.284%	I	0.1125	0.124
	II	0.1425	
	III	0.1300	
	IV	0.1100	
0.299%	I	0.120	0.114
	II	0.110	
	III	0.125	
	IV	0.100	



Gambar 4.11 Grafik Kadar Sr versus Elongasi

Dari grafik di atas dapat diketahui bahwa nilai elongasi cenderung mengalami penurunan bila dibandingkan dengan tanpa penambahan *modifier* stronsium. Hasil elongasi berkorelasi dengan hasil kekerasan dan ketahanan aus. Dengan kekerasan dan ketahanan aus yang semakin meningkat, elongasi cenderung menurun. Pada variabel penambahan Sr 0.284% elongasi mengalami

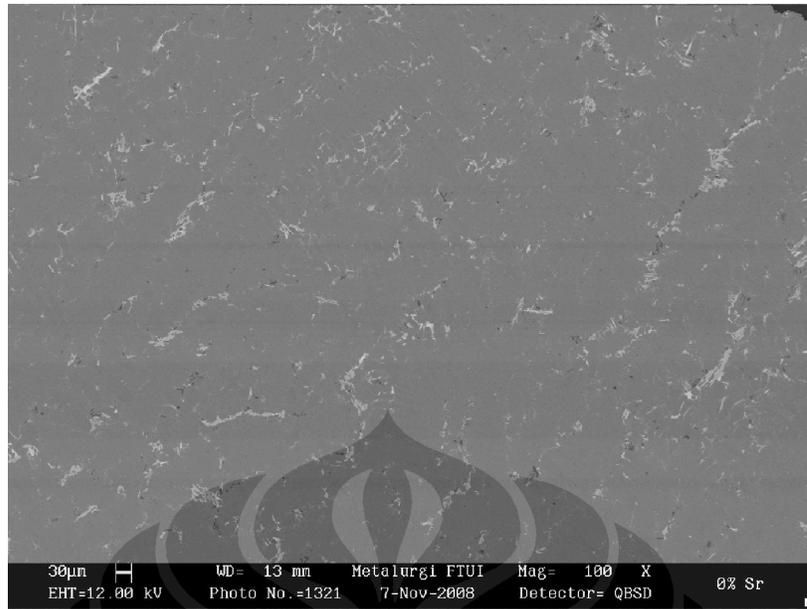
kenaikan dibanding penambahan Sr 0.208% dimana hal ini seiring dengan kekerasan dan ketahanan aus yang menurun.

Adanya elongasi yang cenderung menurun menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kegetasan pada paduan aluminium silikon. Semakin keras material maka cenderung menjadi getas sehingga keuletannya menurun. Oleh karena itu biasanya dilakukan proses *heat treatment* untuk memperbaikinya penurunan keuletan ini. Sedangkan adanya peningkatan nilai elongasi menunjukkan keuletan paduan menjadi meningkat.

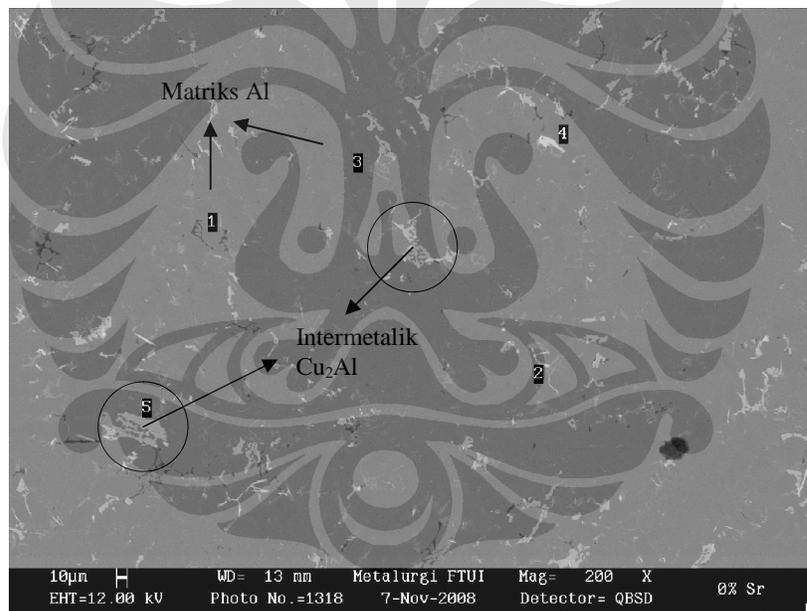
#### **4.6 Pengamatan SEM dan Uji EDX**

Pengamatan dengan SEM dilakukan untuk lebih memperjelas mikrostruktur dan fasa-fasa yang ada. Untuk pengamatan SEM dan uji EDX tidak dilakukan pada semua variabel penambahan *modifier* Sr, tetapi hanya pada variabel Sr target 0%, 0.19% dan 0.33%.

Penambahan *modifier* stronsium dapat memodifikasi fasa intermetalik pada paduan aluminium silikon. *Modifier* stronsium memberikan perubahan morfologi dari fasa intermetalik yang awalnya berbentuk besar-besar menjadi berfragmen yang ukurannya lebih kecil. Penambahan Sr akan menurunkan ukuran jarak antar lengan dendrit yang terbentuk sehingga ukuran sel dendrit tempat pembentukan fasa intermetalik semakin halus. Dengan semakin halusya ukuran sel ini maka fasa intermetalik yang terbentuk juga semakin halus dan lebih tersebar. Bentuk dan persebaran fasa intermetalik ini berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanis yang dihasilkan <sup>[29]</sup>.



(a)



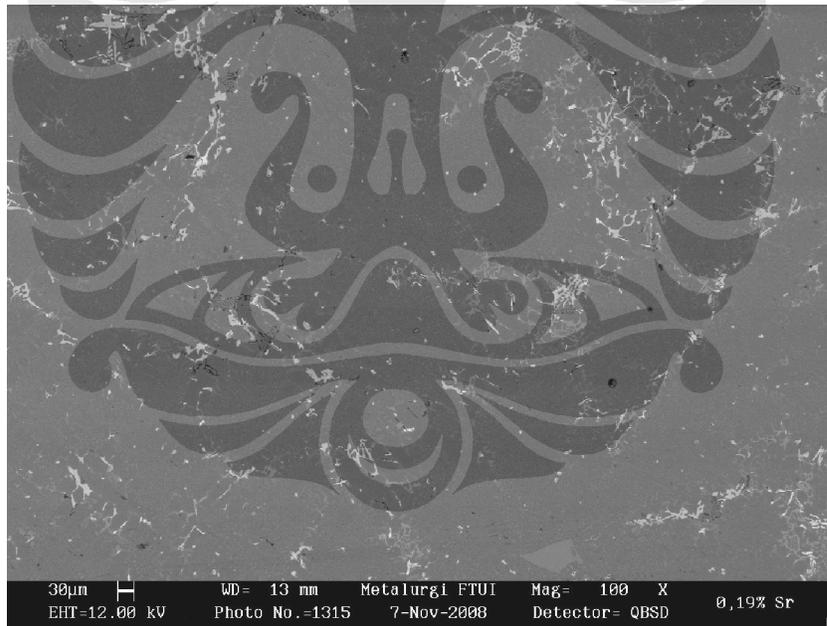
(b)

Gambar 4.12 Hasil Pengamatan Struktur Mikro dengan SEM pada Sampel Tanpa Penambahan *modifier* Sr (a) Perbesaran 100X (b) Perbesaran 200X

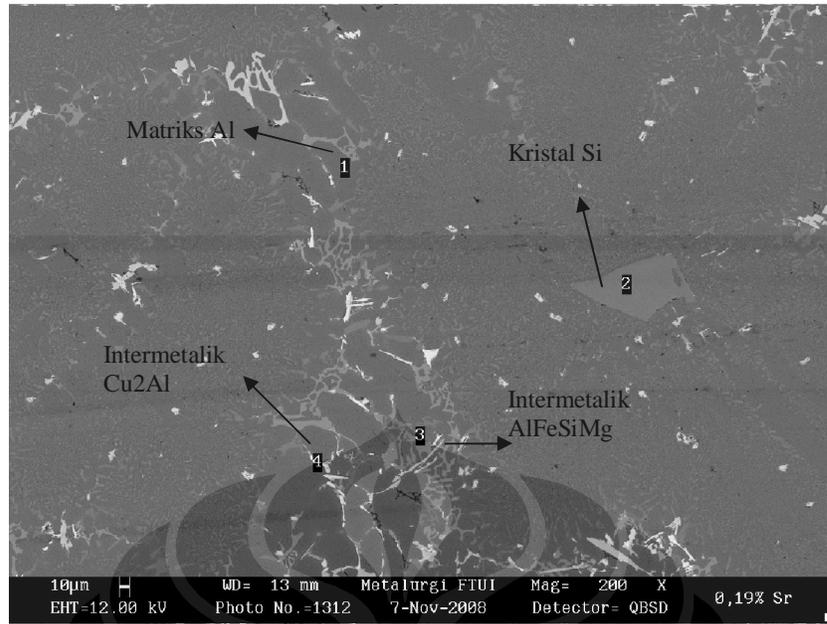
Fasa-fasa yang terlihat pada pengamatan SEM di atas kemudian dilakukan uji komposisi dan hasilnya dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.7 Hasil Uji EDX Sampel Tanpa Penambahan Sr

No	Komposisi (% berat)					Warna	Kemungkinan Fasa
	Al	Si	Cu	Fe	Mg		
1	97.43	1.38				Gelap	Matriks Al
2	85.59	12.91				Gelap	Matriks Al
3	80.24	17.76			0.25	Gelap	Matriks Al
4	30.24	68.05				Abu-abu tua	Kristal silikon
5	68.81	5.85	21.87	2.16		Putih	Cu <sub>2</sub> Al



(a)



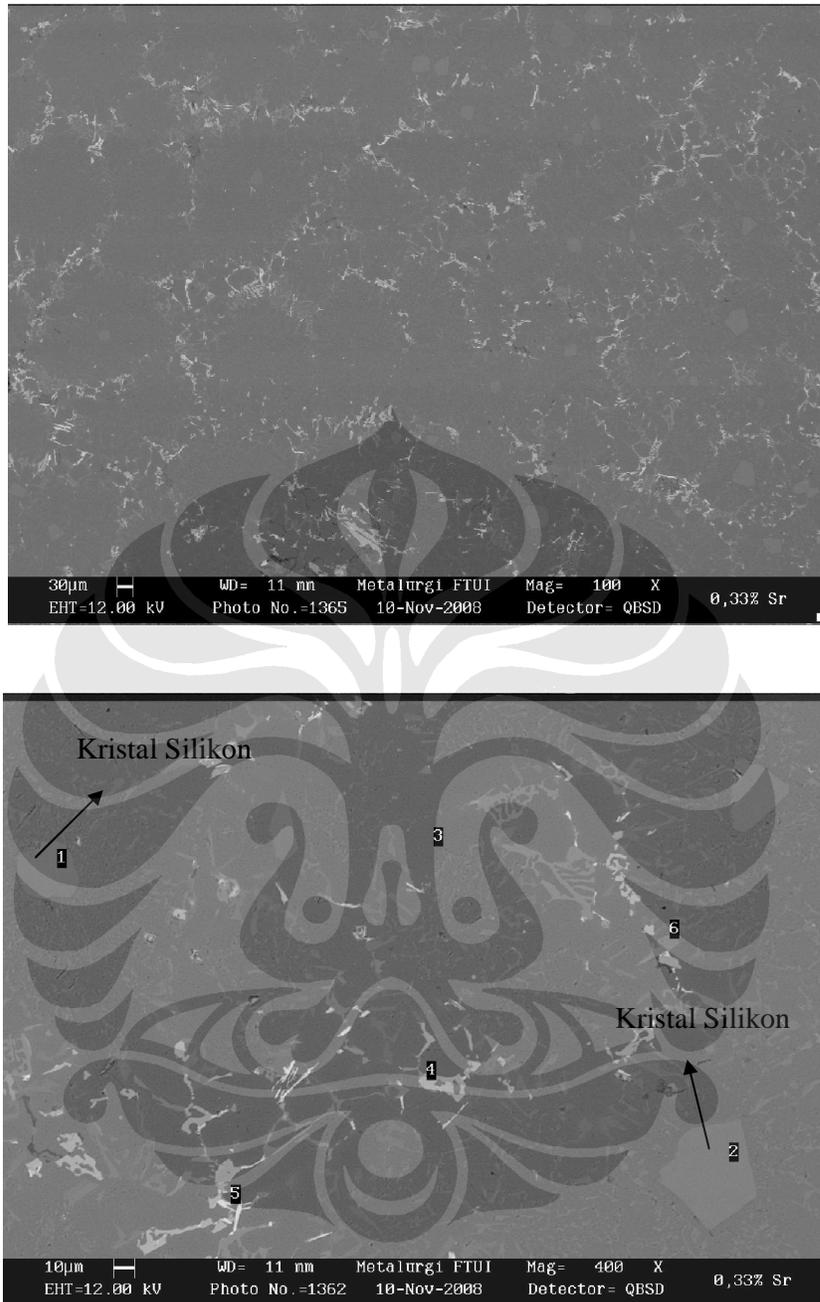
(b)

Gambar 4.13 Hasil Pengamatan Struktur Mikro dengan SEM pada Variabel Penambahan Sr Target 0.19% (a) Perbesaran 100X (b) Perbesaran 200X

Hasil analisa EDX dari fasa-fasa yang terlihat pada pengamatan SEM untuk variabel Sr target 0.19% dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.8 Hasil Analisa Komposisi dengan EDX pada Variabel Penambahan Sr Target 0.19%

No	Komposisi (% berat)						Warna	Kemungkinan Fasa
	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Ni		
1	94.12	1.15					Gelap	Matriks Al
2	1.31	96.97					Abu-abu tua	Kristal Silikon
3	48.70	18.27		7.95	15.73	7.26	Abu-abu muda	AlFeSiMg
4	89.06	1.81	6.61				Putih	Cu <sub>2</sub> Al

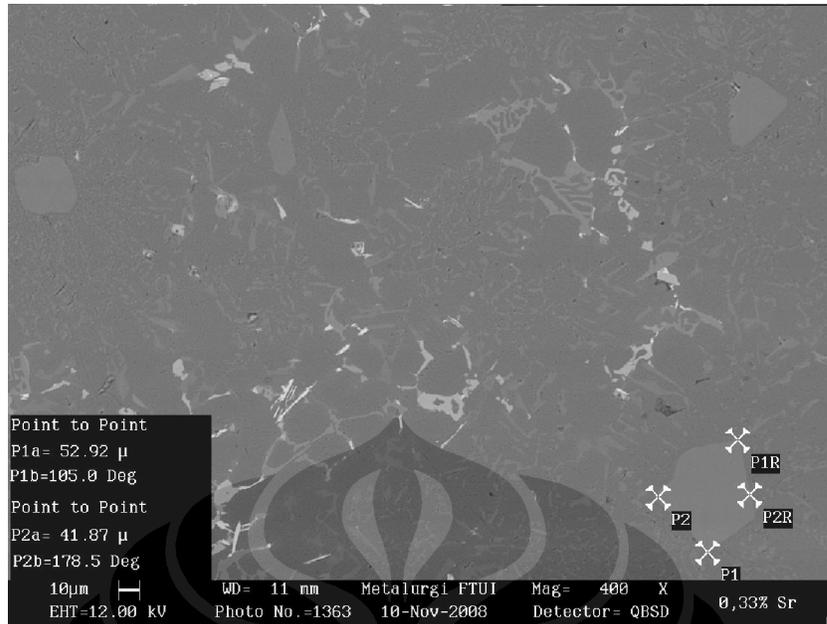


Gambar 4.14 Hasil Pengamatan Struktur Mikro dengan SEM pada Variabel Penambahan Sr Target 0.33% (a) Perbesaran 100X (b) Perbesaran 400X

Tabel 4.9 Hasil Analisa Komposisi dengan EDX pada Variabel Penambahan Sr  
 Target 0.33%

No	Komposisi (% berat)						Warna	Kemungkinan Fasa
	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Ni		
1	0.71	96.83					Abu-abu tua	Kristal silikon
2	0.52	96.68					Abu-abu tua	Kristal silikon
3	97.15	1.29					Gelap	Matriks Al
4	59.99	1.62		9.83		24.87	Abu-abu muda	AlFeNi
5	29.33	0.22	45.03			24.57	Putih	Cu <sub>3</sub> NiAl <sub>6</sub>
6	52.71	21.15			13.54		Abu-abu tua	AlMgSi

Dari hasil pengamatan SEM, secara umum dapat dilihat bahwa fasa intermetalik yang terbentuk semakin halus dan lebih merata persebarannya. Berdasarkan kemurnian dari *base material*, paduan Al-Si mengandung unsur pengotor seperti Fe, Mn, Cu dan Zn dalam jumlah yang bervariasi. Cu dan Mg biasanya ditambahkan sebagai unsur paduan untuk meningkatkan kekuatan dan *hardenability* material yang akan dicor. Unsur pengotor dan paduan sebagian sebagai *solid solution* dalam matriks dan sebagian lagi membentuk fasa intermetalik ketika proses pembekuan<sup>[30]</sup>. Kecepatan pembekuan sangat mempengaruhi ukuran, bentuk dan distribusi fasa intermetalik. Pembekuan yang cepat menghasilkan fasa intermetalik yang lebih halus dan terdispersi merata.



Gambar 4.15 Pengukuran Silikon Primer pada Pengamatan SEM

Pada sampel tanpa penambahan *modifier* Sr tidak terlihat adanya silikon primer. Si primer ini terlihat pada variabel penambahan 0.19% Sr target dan Sr target 0.33%. Variabel Sr target 0.19% hanya dijumpai sedikit Si primer. Pada pengamatan SEM variabel penambahan Sr target 0.33% terlihat banyak dijumpai adanya silikon primer. Pada gambar tersebut silikon primer tersebar merata dan ukurannya tidak terlalu besar. Ketika dilakukan pengukuran terhadap silikon primer terbesar yang dijumpai, silikon primer ini berukuran rata-rata sekitar 47 mikron. Menurut literatur, untuk mendapatkan sifat-sifat mekanis yang baik diharapkan Si primer berukuran rata-rata kurang dari 50 mikron<sup>[3]</sup>. Si primer terbesar yang ada telah didapatkan ukuran dibawah 50 mikron, jadi Si primer lainnya sebagian besar juga telah berukuran dibawah 50 mikron. Adanya Si primer yang tersebar merata dan berukuran kecil ini merupakan faktor lain yang menyebabkan kekerasan dan kekuatan sampel variabel Sr target 0.33% ini bernilai lebih besar dari keseluruhan sampel.

Dari hasil foto SEM di atas, fasa intermetalik yang paling banyak dijumpai dan terlihat jelas persebarannya yaitu fasa  $\text{Cu}_2\text{Al}$ . Pada foto SEM, fasa ini terlihat berwarna putih dengan bentuk yang bermacam-macam. Penambahan Sr akan mempengaruhi pola pembentukan fasa  $\text{Cu}_2\text{Al}$ . Dengan penambahan Sr, fasa  $\text{Cu}_2\text{Al}$  lebih tersebar distribusinya dan ukurannya lebih kecil. Pada variabel penambahan Sr target 0.19% dan 0.33%, dari hasil uji EDX tampak ditemukan adanya fasa-fasa intermetalik yang mengandung Ni. Sampel tanpa penambahan Sr tidak ditemukan adanya fasa intermetalik Ni.

Selain unsur-unsur pembentuk fasa intermetalik Cu, Fe, Mg dan Ni seperti yang telah disebutkan sebelumnya, didapatkan juga unsur-unsur O, C dan Ar pada hasil EDX. Adanya unsur O dalam paduan dapat membentuk inklusi *non-metallic* karena bereaksi dengan Al membentuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan bereaksi dengan Si membentuk  $\text{SiO}_2$ . Kehadiran oksida tersebut dapat menurunkan sifat mekanis material dan meningkatkan porositas. Unsur C juga dapat berperan dalam pembentukan inklusi *non-metallic* karena unsur C dapat bereaksi dengan Al membentuk karbida ( $\text{Al}_3\text{C}_4$ ). Sedangkan unsur Ar yang terdapat pada logam kemungkinan berasal dari gas mesin *degassing* GBF yang menggunakan argon.