

BAB II

LANDASAN TEORI

Logam aluminium sangat berperan penting dalam berbagai bidang aplikasi karena memiliki sifat-sifat yang unggul. Sifat-sifat tersebut membuat aluminium menjadi logam yang sangat sesuai dan ekonomis untuk berbagai aplikasi dan telah menjadikan aluminium sebagai logam yang paling banyak digunakan kedua setelah baja. Selain itu aluminium dapat juga dengan mudah dikombinasikan dengan unsur lain (*alloying*) untuk mengatur karakteristik, seperti sifat mekanis, sifat mampu cor (*castability*), sifat mampu mesin (*machinability*), *surface finish*, ketahanan korosi (*corrosion resistance*), sifat mampu las, dan ketahanan terhadap retak (*hot tear resistance*). Kualitas dari produk hasil pengecoran tersebut juga masih dapat ditingkatkan dengan metode modifikasi, penghalusan butir serta perlakuan panas (*heat treatment*).

2.1 PADUAN ALUMINIUM TUANG

Paduan aluminium tuang merupakan jenis paduan yang paling banyak digunakan dalam berbagai hal dibandingkan dengan jenis paduan yang lainnya dan umumnya memiliki nilai *castability* (mampu cor) yang baik. Aluminium dapat disesuaikan dengan berbagai metode pengecoran yang umum dipakai dan dapat dituang langsung ke dalam cetakan atau *dies* yang terpasang pada mesin otomatis dan dalam volume yang besar. Aluminium juga dapat dituang kedalam cetakan pasir, cetakan *shell*, sentrifugal, dan *investment*.^[1]

Sebagai material tuang, aluminium memiliki beberapa karakteristik penunjang, yaitu^[1] :

1. Fluiditas yang baik, penting untuk mengisi bagian benda yang tipis.
2. Titik lebur yang rendah dengan temperatur operasi (650-760⁰C) dibandingkan dengan material lain sehingga energi pemanasan dapat diminimalkan.
3. Pertukaran panas yang cepat, pertukaran panas dari lelehan aluminium ke cetakan sangat cepat sehingga menghasilkan siklus penuangan yang cukup cepat di dalam cetakan (*mold*).

4. Memiliki stabilitas kimia yang baik.
5. Memiliki permukaan *as-cast* yang baik, mengkilat dan tanpa noda.

Aluminium tuang paduan memiliki temperatur lebur yang relatif rendah (sekitar 650° C sampai 750° C), dibandingkan dengan kebanyakan logam lainnya. Pada dasarnya banyak unsur yang dapat dipadukan dengan aluminium, yang tentunya memiliki kelarutan yang berbeda seperti pada tabel 2.1 dibawah ini.

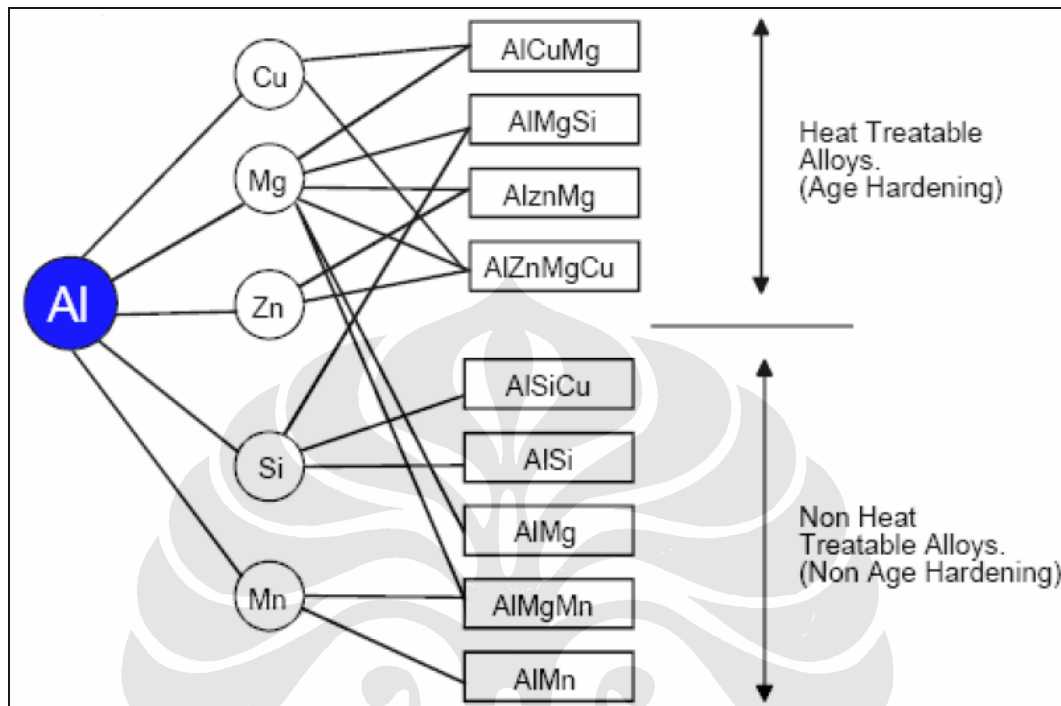
Tabel 2.1 Kelarutan Padat Beberapa Unsur Dalam Aluminium^[4].

Unsur Paduan	Temperatur (°C)	Kelarutan maksimum (wt%)
Germanium	424	7.2
Kadmium	649	0.4
Kobalt	657	<0.02
Tembaga	548	5.65
Kromium	661	0.77
Besi	655	0.05
Lithium	600	4.2
Magnesium	450	17.4
Mangan	658	1.82
Nikel	640	0.04
Silicon	577	1.65
Seng	443	70.0
Perak	566	55.6
Timah	228	0.06
Titanium	665	1.3
Vanadium	661	0.4
Zirkonium	660.5	0.28

Sumber: Gruzleski, Jhon E. dan Closset, Bernard M. The Treatment Of Liquid Aluminium-Silicon Alloys. Illinois: Americans Foundrymen's Society Inc, 1990.

Dari semua unsur paduan tersebut, ada beberapa unsur yang menjadi dasar paduan aluminium komersil, yaitu Zn, Mg, Cu, Si, dan Mn, yang kesemuanya memiliki kelarutan lebih dari 1%^[5]. Jumlah total dari semua unsur-unsur tersebut

dapat mencapai 10 wt% dari paduan komposisi keseluruhan. Semua unsur paduan tersebut kemudian dapat digunakan dalam beberapa variasi kombinasi paduan, seperti pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Prinsip dasar paduan aluminium^[5].

Paduan aluminium tuang juga memiliki beberapa sifat yang kurang menguntungkan, yaitu^[3]:

1. Berat jenis pengotor oksida (*dross*), yaitu $2,1 \text{ gr/cm}^3$, yang hampir sama dengan berat jenis aluminium cair ($2,3 \text{ gr/cm}^3$) sehingga pengotor oksida sulit untuk dikeluarkan.
2. Penyusutan (*shrinkage*) yang cukup tinggi yaitu 3,5 – 8,5 %.
3. Mudah mengikat gas hidrogen dalam kondisi cair sehingga jika tidak dikontrol dapat menyebabkan cacat porositas pada produk yang dihasilkan.

2.2 SISTEM PENAMAAN PADUAN ALUMINIUM TUANG

Sistem klasifikasi paduan aluminium yang banyak dipakai adalah sistem *Aluminium Association* (AA). Standar ini mencakup klasifikasi berdasarkan cara pembuatan serta unsur paduan utamanya. Baik paduan tempa maupun paduan cor diklasifikasikan dalam empat digit, namun untuk paduan cor digit keempat

dipisahkan dengan tanda titik dari ketiga digit sebelumnya. Standar AA (*Aluminium Association*) telah dimasukkan kedalam *American Standard*, ANSI H35.1-1978 oleh *American Standard Institut*.^[6]

Pada standar AA (*Aluminium Association*) terdapat empat digit yang memiliki makna sebagai berikut:

- ❖ Digit Pertama : paduan utama dari aluminium
- ❖ Digit kedua dan ketiga : paduan spesifik dari aluminium yang berbeda tiap materialnya. Paduan ini jumlahnya tidak signifikan tetapi unik.
- ❖ Digit keempat : menandakan bentuk produk:
 - .0 untuk spesifikasi paduan coran
 - .1 untuk spesifikasi ingot yang digunakan untuk membuat paduan cor
 - .2 untuk spesifikasi ingot yang lebih spesifik
- ❖ Prefix huruf, seperti “A”, menandakan modifikasi dari spesifikasi paduan aslinya.

Tabel 2.2 Designasi Paduan Aluminium Tuang ANSI H35.1-1978^[6].

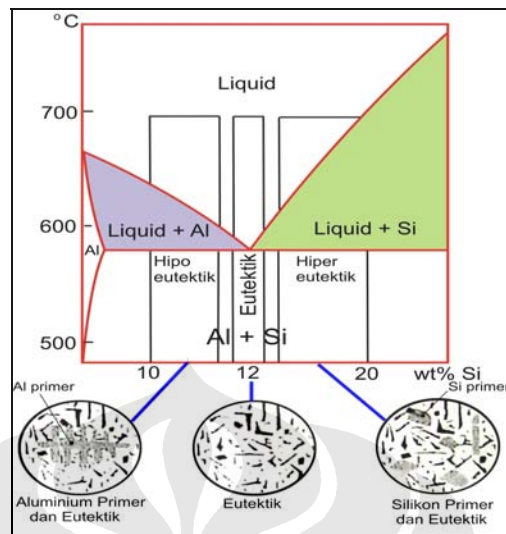
Seri	Unsur Paduan Utama
1xx.x	Aluminium murni ($\geq 99\%$)
2xx.x	Aluminium-Tembaga (Cu Alloys)
3xx.x	Aluminium-Silikon + Cu dan /atau Mg
4xx.x	Aluminium-Silikon
5xx.x	Aluminium-Magnesium
6xx.x	Seri yang tidak digunakan
7xx.x	Aluminium-Zinc (Zn)
8xx.x	Aluminium-Tin
9xx.x	Aluminium + Elemen lain

Sumber: Kaufman, J Gilbert dan Rooy, Elwin L. *Aluminum Alloy Casting Properties, Processes, and Application*. ASM International, 2004.hal 1.

2.3 PADUAN ALUMINIUM SILIKON

Paduan aluminium silikon memiliki daerah sistem biner mulai dari sistem yang paling sederhana hingga sistem paduan yang lebih kompleks. Secara garis besar, paduan aluminium-silikon dibagi menjadi 3 daerah utama, yaitu komposisi

hipoeutektik, komposisi eutektik dan komposisi hyperutektik, seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Diagram fasa Al-Si dan mikrostruktur paduan pada komposisi hipoeutektik, eutektik, dan hipereutektik.^[6]

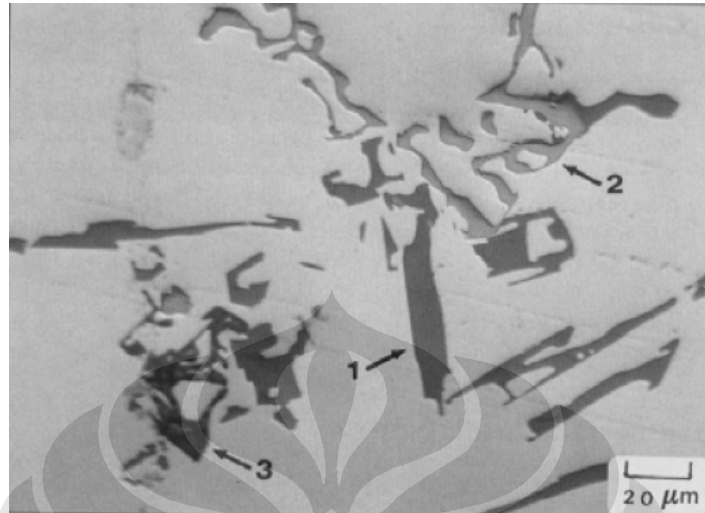
Struktur utama dari ketiga komposisi paduan ini adalah berupa fasa α -Al, yang sangat kaya akan kandungan aluminium. Struktur ini akan tetap muncul walaupun pada komposisi hipereutektik, karena bentuk struktur ini akan selalu terpisah pada fasa padatnya baik dalam paduan hipoeutektik, eutektik, maupun hipereutektik. Selain fasa α -Al, juga terdapat fasa β yang merupakan partikel-partikel silikon yang tidak larut dalam fasa α -Al. Pada paduan hipereutektik, fasa tersebut menghasilkan silikon primer yang bentuknya relatif kasar. Terkadang bentuk silikon yang kasar ini juga dapat ditemui pada paduan eutektik^[9].

2.3.1 Aluminium Hipoeutektik

Pada komposisi hipoeutektik, pembekuan terjadi melalui fasa cair-padat dengan tahapan^[5]:

1. Pembentukan jaringan dendritik α -Al.
2. Reaksi eutektik aluminium silikon.
3. Presipitasi fasa eutektik sekunder yang bergantung pada kadar *trace element* dalam paduan, misalnya Mg_2Si ataupun Al_2Cu .

Struktur akhir dari komposisi ini terdiri dari struktur dendritik yang kaya aluminium, dan sebagai fasa utamanya adalah fasa α -Al dengan struktur eutektik sebagai struktur tambahan.



Gambar 2.3 Mikrostruktur Al-7%Si perbesaran 500x, etsa 0.5% HF
1) silikon eutektik, 2) $Al_{12}Fe_3Si_2$ chinese script, 3) Mg_2Si chinese script.^[18]

Pada paduan hipoeutektik, dengan bertambahnya kandungan Si (hingga 12wt% Si) maka fraksi volum dan fraksi luas dari Al primer akan menurun sementara eutektik interdendritik akan meningkat. Pada diagram fasa di atas, terlihat matriks yang kaya akan aluminium (fasa α -Al) dan silikon yang berbentuk seperti serabut/jarum. Kandungan silikon dari paduan aluminium silikon juga akan berpengaruh terhadap karakteristik proses solidifikasi yang berkaitan dengan metode cor yang dipilih. Untuk itu, ada rentang komposisi tertentu yang mengatur hubungan tersebut. Kandungan 5-7wt% Si membutuhkan pendinginan lambat yang diaplikasikan pada *sand* dan *investment casting*. Kecepatan pendinginan menengah melalui mekanisme *permanent mold casting* cocok diaplikasikan pada kandungan 7-9% silikon. Sementara untuk aplikasi die casting dengan pendinginan yang cepat membutuhkan kandungan silikon sebanyak 8-12%.^[6]

2.3.2 Aluminium Silikon Eutektik

Komposisi eutektik merupakan daerah dimana paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya. Proses pembekuan yang berlangsung menyerupai proses pembekuan logam murni, dimana temperatur awal dan temperatur akhir peleburan adalah sama (*isothermal*). Adanya struktur eutektik ini yang mengakibatkan paduan aluminium-silikon memiliki karakteristik mampu cor yang baik. Komposisi ini memiliki kandungan silikon sekitar 11.7wt%, namun jumlah ini tergantung pada laju pendinginannya, sehingga kandungan silikon bervariasi mulai dari 11.7% - 12.2%.^[9]

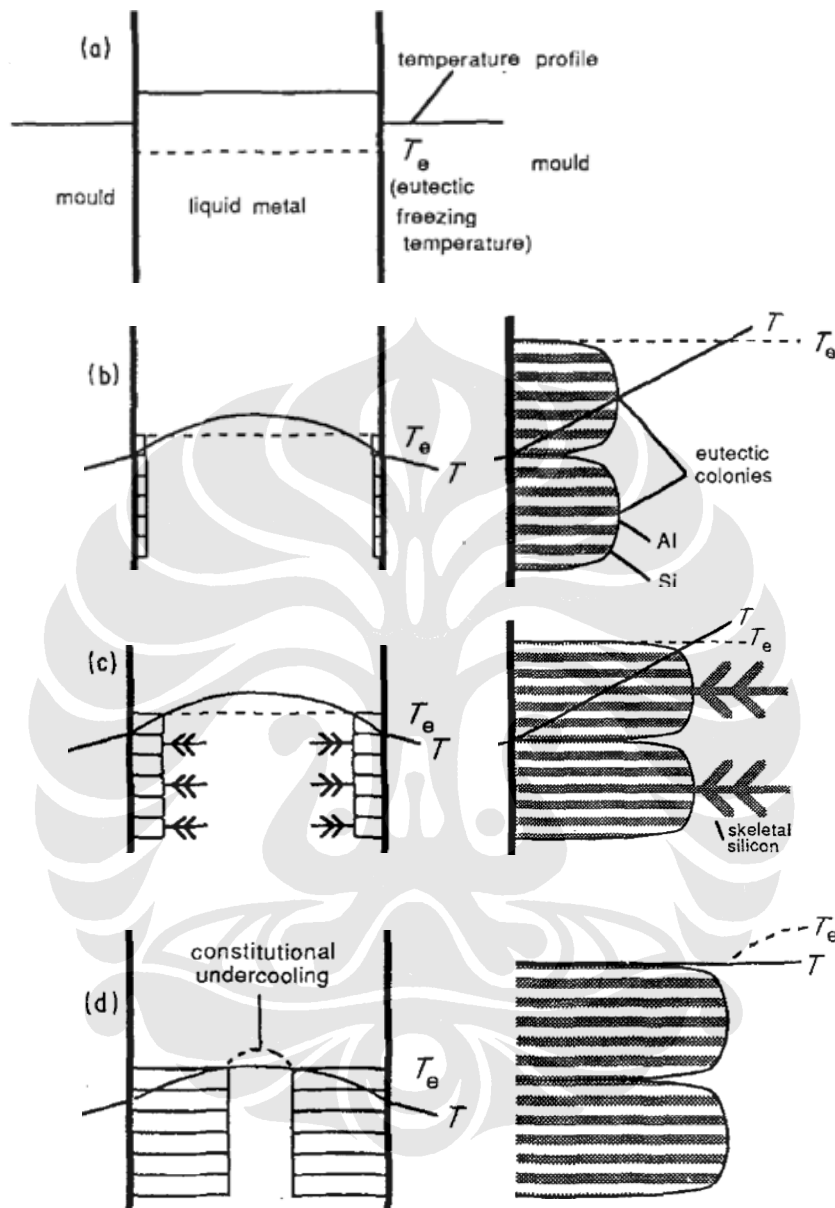
Pada paduan aluminium-silikon eutektik, pada mikrostrukturnya terdapat struktur berupa plat kasar (*coarse plates*) silikon berwarna abu-abu dan matriks berwarna putih yang merupakan matriks aluminium seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Kristal Al-Silikon ini memiliki struktur kristal diamond dan umumnya bersifat rapuh (*brittle*). Silikon yang memiliki bentuk plat besar umumnya menghasilkan sifat mekanis yang buruk.



Gambar 2.4 Mikrostruktur paduan eutektik Al-Si. Etsa 0.5% HF dan Perbesaran 750x^[10].

Paduan aluminium-silikon merupakan jenis paduan yang paling banyak digunakan untuk keperluan komersil (80-95% dari total aluminium tuang yang diproduksi). Hal tersebut dikarenakan paduan aluminium-silikon memiliki karakteristik cor yang lebih baik dibandingkan dengan jenis paduan lainnya.

Selain itu paduan ini memiliki variasi sifat mekanis, sifat *castability* (mampu cor), ketahanan korosi, dan sifat mampu permesinan yang baik serta dapat dilas.^[6]



Gambar 2.5 skema pembekuan eutektik pada paduan aluminium-silikon^[33].

Pada gambar diatas dijelaskan sebagai berikut: (a) awal temperatur. (b) pertumbuhan koloni eutektik pada daerah *undercooling*. (c) pembentukan skeletal silikon dengan mendahului pertumbuhan eutektik pada temperatur diatas temperatur eutektik tetapi dibawah temperatur likuid. Pada daerah ini lengan skeletal silikon dapat menghalangi pertumbuhan fasa aluminium yang sedang

nukleasi butir baru. (d) fasa aluminium dan silikon kembali ke pertumbuhan yang biasa dan ukuran butir dari aluminium akan menjadi besar.

Komposisi paduan eutektik (11,7 wt%Si) merupakan paling umum digunakan sebagai paduan tuang karena pada komposisi tersebut memiliki temperatur eutektik yang rendah yaitu sekitar 577⁰C. Oleh karena temperatur eutektik yang rendah maka temperatur tuang dari paduan eutektik aluminium-silikon juga menjadi rendah. Temperatur tuang yang rendah dari paduan eutektik aluminium-silikon akan menghasilkan karakteristik mampu cor (*castability*) yang baik seperti porositas dan *shrinkage* yang minimum.

2.3.3 Pengaruh Unsur Paduan Aluminium Tuang

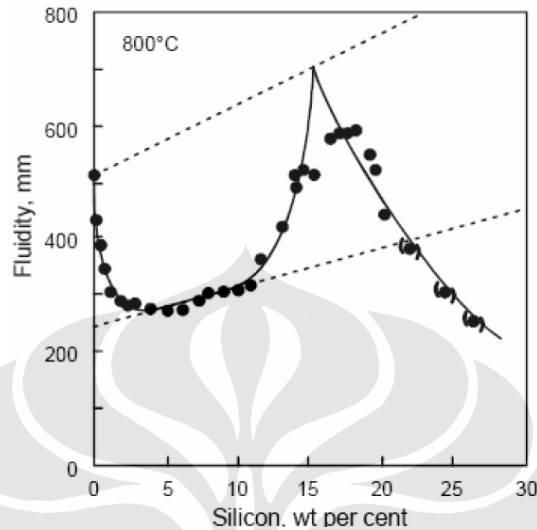
Pada industri otomotif, material aluminium memegang peranan yang sangat penting. Keunggulan aluminium antara lain seperti berat jenis yang lebih ringan, proses manufaktur yang lebih mudah, keuletan yang cukup baik, ketersediaan di alam yang banyak. Tetapi selain beberapa keunggulan tersebut, ada juga kelemahannya seperti kekuatan dan kekerasan yang rendah, kelarutan gas hidrogen yang tinggi pada aluminium cair. Beberapa unsur paduan aluminium yang sering ditemui di dalam industri otomotif adalah:

2.3.3.1 Silikon (Si)

Unsur ini adalah yang paling banyak digunakan dalam proses pengecoran aluminium karena dapat meningkatkan mampu alir dan juga menurunkan *shrinkage* sehingga secara langsung dapat menurunkan *reject*. Silikon ini juga memiliki berat jenis yang lebih rendah daripada aluminium sehingga tidak memberikan kontribusi penambahan berat produk. Sifat silikon yang keras digunakan sebagai peningkat kekerasan dan menahan keausan pada aluminium, tetapi kadar paduan yang berlebih dapat menurunkan keuletan.

Batasan kandungan silikon ditentukan berdasarkan proses pengecoran, yaitu 5-7% Si untuk proses kecepatan pendinginan lambat (seperti *sand*, *investment*, dan *plaster casting*), 7-9% Si untuk *permanent mould*, dan 8-12% Si untuk proses kecepatan pendinginan tinggi (*die casting*). Dasarnya adalah hubungan antara laju pendinginan, fluiditas, dan fasa eutektik pada paduan.

Hubungan penambahan silikon dengan fluiditas dijelaskan melalui Gambar 2.6 Silikon meningkatkan fluiditas sampai titik optimum di hipereutektik, bukan eutektik, sehingga dapat disimpulkan bahwa peran silikon sangat signifikan pada fluiditas.



Gambar 2. 6 Hubungan kadar silikon terhadap fluiditas aluminium.

2.3.3.2 Besi (Fe)

Termasuk dalam kategori pengotor dan tidak diinginkan dalam produk sebab dapat menurunkan keuletan dan ketahanan korosi. Tetapi adanya Fe dapat membentuk fasa *insoluble/intermetallics* (FeAl_3 , FeMnAl_6 , dan αFeAlSi) karena kelarutannya yang rendah pada *solid state*. Fasa tersebut tidak larut dan meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi, namun juga dapat menyebabkan penggetasan.

Pengaruh penambahan besi pada paduan paduan aluminium adalah:

- ♣ Meningkatkan ketahanan terhadap retak panas.
- ♣ Mengurangi kecenderungan terjadinya *soldering* pada *die casting*.
- ♣ Pada kadar yang tinggi akan menyebabkan kegetasan.

2.4 FASA INTERMETALIK PADA PADUAN ALUMINIUM SILIKON

Besi merupakan pengotor yang paling umum yang ada pada paduan Aluminium. Kelarutan besi pada keadaan padat sangat rendah (~ 0.05 wt% pada 600 °C, bahkan lebih rendah lagi pada temperatur ruang). Sehingga kadar besi yang melebihi jumlah ~ 0.05 wt% akan tampak sebagai fasa kedua intermetalik

dalam kombinasi dengan Al dan elemen lainnya, dimana bersifat merusak terhadap sifat properti dari Al^[11].

Fasa intermetalik berlaku sebagai *stress concentration* sehingga material bersifat rapuh. Sumber keberadaan besi pada proses pengecoran berasal dari peralatan peleburan dan dari *remelt scrap*. Keberadaan besi tidak dapat dihilangkan dari aluminium tetapi dapat digunakan metode netralisasi atau modifikasi, sehingga dapat mengurangi efek merusak dari intermetalik^[11].

Fasa-fasa yang mungkin terjadi dan morfologinya pada saat pengecoran paduan aluminium-silikon dapat bermacam-macam tergantung dari komposisi elemen paduan aluminium dan kondisi pendinginan, berikut ini adalah beberapa contoh fasa yang biasanya dapat terbentuk:

- Silikon : bentuknya tergantung dari kadar Si yang diberikan. Bisa terlihat dalam bentuk *accicular* jika tidak dimodifikasi ataupun *fibrous* jika dimodifikasi.
- Al_8Fe_2Si atau $Al_{12}Fe_3Si_2$ (α -AlFeSi) : bentuknya seperti *Chinese-script* dan berwarna abu-abu terang.
- Al_5FeSi atau $Al_9Fe_2Si_2$ (β -AlFeSi) : bentuk seperti jarum-jarum kasar dan jumlahnya akan semakin banyak seiring penambahan kadar Fe. Warnanya abu-abu terang. Sifanya menurunkan kekuatan pada aluminium.

2.4.1 Diagram Fasa AlFeSi

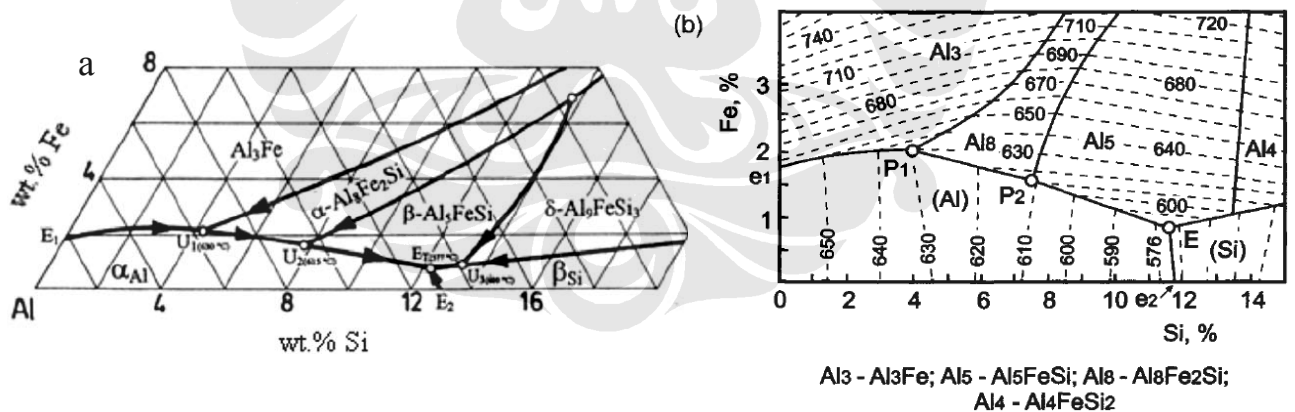
Pada paduan aluminium terdapat berbagai jenis fasa intermetalik. Fasa intermetalik yang umum terdapat pada paduan aluminium adalah fasa intermetalik α -AlFeSi dan β -AlFeSi. Fasa intermetalik α -AlFeSi mempunyai komposisi Al_8Fe_2Si (32-36%Fe, 6-9,5%Si), sedangkan fasa intermetalik β -AlFeSi mempunyai komposisi Al_5FeSi (27-28%Fe, 14-16%Si)^[11].

Reaksi eutektik menyertakan Al dan fasa sekunder (Tabel 2.3) menunjukkan bahwa fasa (Si), yang berlawanan dengan kandungan Fe pada fasa, terbentuk hampir seluruhnya pada temperatur konstan. Tinjauan umum diagram fasa Al-Fe-Si, diberikan pada Gambar 2.5 dibawah ini.

Tabel 2.3 Reaksi Invarian pada Sistem Ternari Al-Fe-Si^[9]

Poin pada Gambar 2.7	Reaksi	1 (L)				T, °C	
		1 (L)		2			
		Fe, %	Si, %	Fe, %	Si, %		
E	$L \Rightarrow (Al) + Al_3FeSi + (Si)$	0.7	12	0.01	1.6	576	
P ₂	$L + Al_8Fe_2Si \Rightarrow (Al) + Al_3FeSi$	1.7	6.5	33	7	611–613	
P ₁	$L + Al_3Fe \Rightarrow (Al) + Al_8Fe_2Si$	2	4	36	0.01	629–632	

Poin pada Gambar 2.7	Reaksi	3				T, °C	
		3		4			
		Fe, %	Si, %	Fe, %	Si, %		
E	$L \Rightarrow (Al) + Al_3FeSi + (Si)$	25	15	0	99.8	576	
P ₂	$L + Al_8Fe_2Si \Rightarrow (Al) + Al_3FeSi$	0.04	1.1	25	13	611–613	
P ₁	$L + Al_3Fe \Rightarrow (Al) + Al_8Fe_2Si$	0.05	0.6	33	7	629–632	



Gambar 2.7 Sistem diagram fasa Al-Fe-Si secara umum^[9].

Tabel 2.4 Reaksi Monovarian pada Sistem Al-Fe-Si^[9].

Reaction	Garis pada Gambar 2.7	T, °C
$L \Rightarrow (Al) + Al_3Fe$	e ₁ -P ₁	655–629
$L \Rightarrow (Al) + Al_8Fe_2Si$	P ₁ -P ₂	629–611
$L \Rightarrow (Al) + Al_3FeSi$	P ₂ -E	611–576
$L \Rightarrow (Al) + (Si)$	e ₂ -E	577–576

Tabel 2.5 Batas kelarutan solid Fe dan silikon pada aluminium daerah tiga fasa dari diagram fasa Al-Fe-Si^[9].

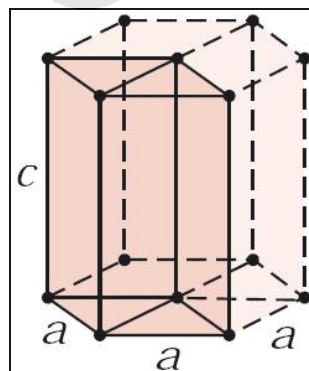
$T, ^\circ\text{C}$	$(\text{Al}) + \text{Al}_3\text{Fe} + \alpha(\text{AlFeSi})$		$(\text{Al}) + \alpha(\text{AlFeSi}) + \beta(\text{AlFeSi})$		$(\text{Al}) + \beta(\text{AlFeSi}) + (\text{Si})$	
	Fe, %	Si, %	Fe, %	Si, %	Fe, %	Si, %
629	0.052	0.64	–	–	–	–
611	–	–	0.04	0.82	–	–
600	0.033	0.4	0.033	0.82	–	–
578	–	–	–	–	0.01	1.65
550	0.016	0.2	0.016	0.42	0.008	1.3
500	0.009	0.11	0.008	0.22	0.005	0.8
450	0.004	0.06	0.004	0.11	0.003	0.44
400	0.002	0.03	0.002	0.06	0.002	0.30

Pada data gambar 2.7 tersebut menunjukkan bahwa dengan menurunnya temperatur likuidus dan solidus (yang kaya akan Al) terutama berhubungan dengan jumlah konsentrasi silikon, maka pengaruh besi akan menjadi semakin berkurang/mengecil.

2.4.2 Morfologi dan Struktur Kristal

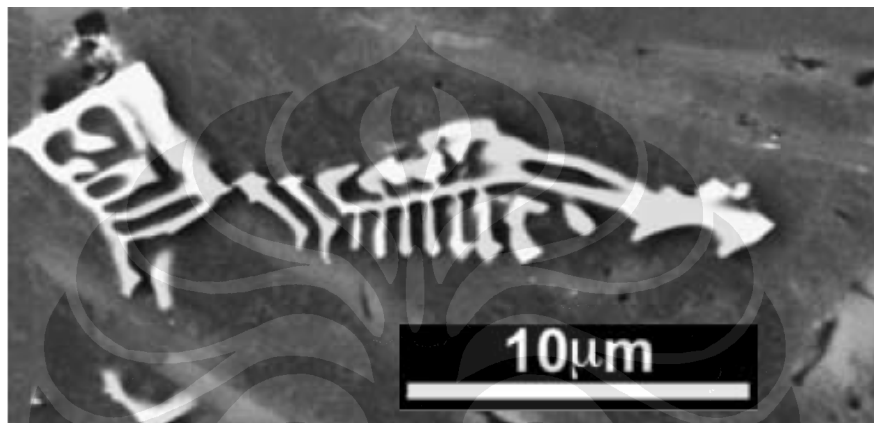
2.4.2.1 Intermetalik α -AlFeSi atau $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$

Fasa α -AlFeSi mempunyai struktur kristal heksagonal dengan parameter kisi $a=12,3 \text{ \AA}$ dan $c=26,3 \text{ \AA}$ dengan densitas $3,58 \text{ g/cm}^3$. Fasa $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ (31,6% Fe; 7,8% Si), dimana juga sama dengan $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}_2$ (30.7% Fe; 10.2% Si), berada dalam tingkat jangkauan/range 30-33 % Fe dan 6-2 % Si.



Gambar 2.8 Struktur Heksagonal pada Fasa α -AlFeSi^[27].

Jenis intermetalik α -AlFeSi ini mempunyai bentuk seperti *script* dan biasa disebut "*chinese script*"^[11]. Fasa α -AlFeSi dapat terbentuk pada kecepatan pendinginan yang sangat tinggi (50 K/s) pada pembekuannya, dimana morfologi dari fasa ini lebih *spheroidise* (lebih bulat) jika dibandingkan dengan fasa β -AlFeSi yang berbentuk pipih^[12]. Fasa α -AlFeSi ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$) mempunyai non *faceted interface* (tidak bersegi) dengan matriks aluminium sehingga menghasilkan ikatan yang lebih baik dengan matriks aluminium dan dapat dilihat pada Gambar 2.9.



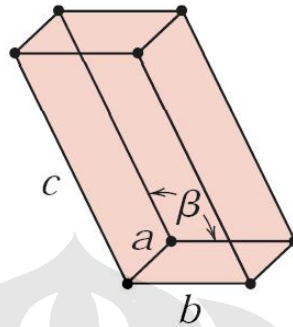
Gambar 2.9 Partikel α -AlFeSi pada Al, 0,5%Fe dan 0,2%Si^[35]

Fasa ini berwarna putih terang dan terlihat seperti *script* ketika diamati dengan mikroskop optik. Pertumbuhan fasa intermetalik ini tidak beraturan serta dapat bercabang-cabang. Dimana pertumbuhannya dikontrol dengan gradien temperatur dan dengan difusi atom pada lelehan likuid logam. Selama kristalisasi, atom-atom dapat saling mengikat dalam rangka pembekuan fasa α - $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ ketika terjadi pertemuan pembekuan pada antarmuka (*interface*) solid-likuid. Jenis pertumbuhan ini terjadi pada *driving force* tinggi saat pembekuan atau kecepatan pembekuan yang tinggi. Fasa α - $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$, berhubungan dengan morfologinya yang kompak sehingga lebih meminimalisasi pengaruh buruk jika dibandingkan dengan fasa β - Al_5FeSi .

2.4.2.2 Intermetalik β -AlFeSi atau Al_5FeSi

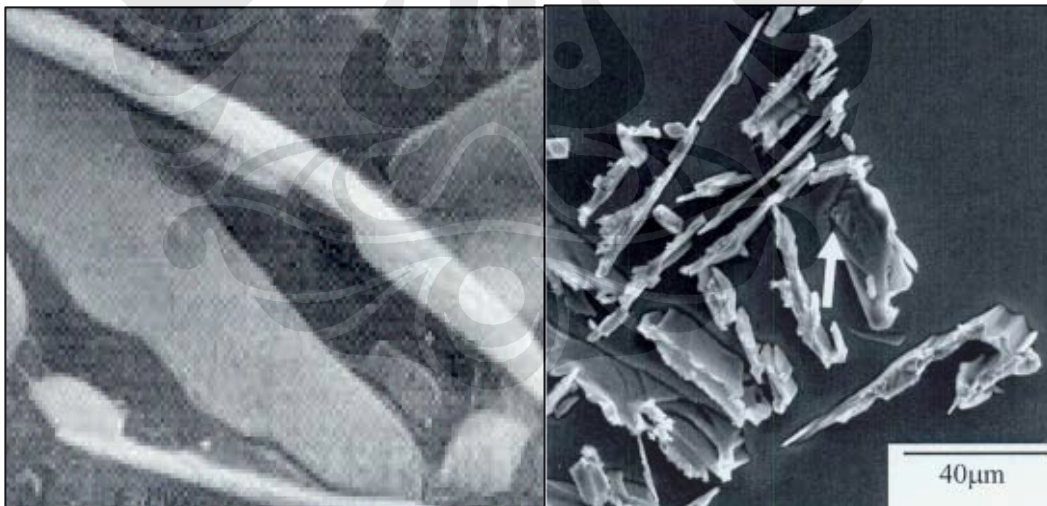
Pada fasa intermetalik jenis ini mempunyai bentuk seperti pelat-pelat tipis yang tajam, kadang-kadang partikel ini tampak seperti jarum-jarum halus pada matriks aluminium. Fasa Al_5FeSi (25.6% Fe, 12.8% Si), dimana sama dengan

$\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ dan $\beta(\text{AlFeSi})$, berada dalam *range* homogenitas 25-30% Fe, 12-15% Si. Fasa ini mempunyai struktur monoklinik dan dengan parameter kisi $a=b=6,12 \text{ \AA}$, $c=4,15 \text{ \AA}$, $A=91^\circ$ dan densitas $3,30\text{-}3,35\text{g/cm}^3$ dan kekerasan Vickers sebesar 5.8 GPa.



Gambar 2.10 Struktur Monoklinik pada fasa $\beta \text{ AlFeSi}$ ^[27].

Seperti dilihat pada **Gambar 2.11** bahwa fasa intermetalik $\beta\text{-AlFeSi}$ mempunyai bentuk yang sangat tajam dan bersudut sangat tinggi dengan matriksnya (*highly faceted*) sehingga menghasilkan ikatan yang sangat lemah dengan matriks aluminium.



Gambar 2.11 Intermetalik $\beta\text{-AlFeSi}$ pada paduan aluminium 1% Si dan 0,5% Fe (*depth etched*)^[12].

Serta $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ dapat berlaku sebagai tempat konsentrasi tegangan sehingga merupakan unsur pengotor yang sangat mengganggu pada paduan aluminium. Intermetalik berbentuk pelat ini (dimana terlihat seperti jarum pada

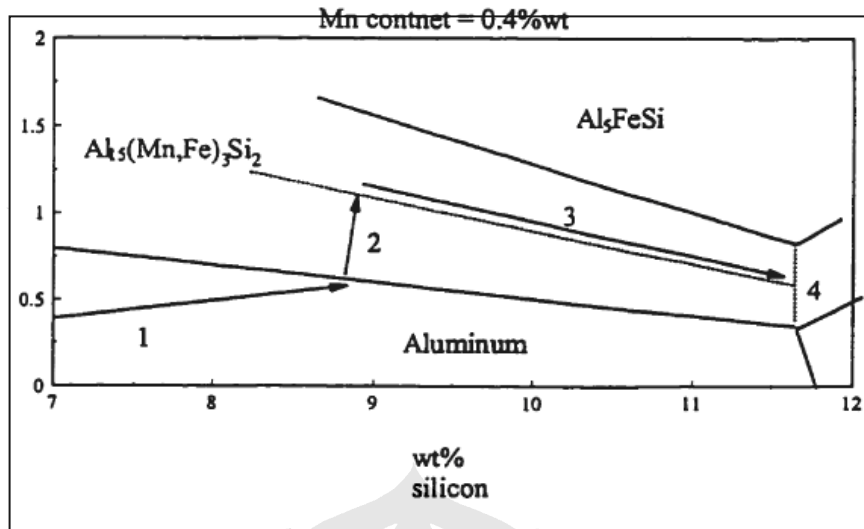
mikrostruktur) juga dapat mencegah aliran dari likuid metal selama proses pembekuan, membatasi *feedability* dan menyebabkan pembentukan porositas serta cacat pada hasil pengecoran.

β -Al₅FeSi berwarna abu-abu terang ketika diamati dibawah mikroskop optik. Permukaan fasa intermetalik ini relatif halus/rata pada skala atomic, sehingga atom dari likuid dapat menghasilkan beberapa kemungkinan untuk saling bergabung pada antarmuka (*interface*). Sehingga pertumbuhannya terbatas dan dengan kecepatan rendah. Jenis pertumbuhan ini terjadi pada *driving forces* yang rendah atau kecepatan pendinginan yang rendah.

Kecepatan pendinginan mempunyai pengaruh yang langsung pada kesetimbangan kinetik dan kuantitas dari Fe-intermetalik yang ada pada mikrostruktur. Kecepatan pendinginan yang lambat dapat mengakibatkan pembentukan fasa Fe-intermetalik β -Al₅FeSi, tetapi ketika pembekuan cepat maka terjadi pembentukan senyawa α -Al₈Fe₂Si.

2.4.3 Pembentukan Fasa Intermetalik Pada Proses Pengecoran

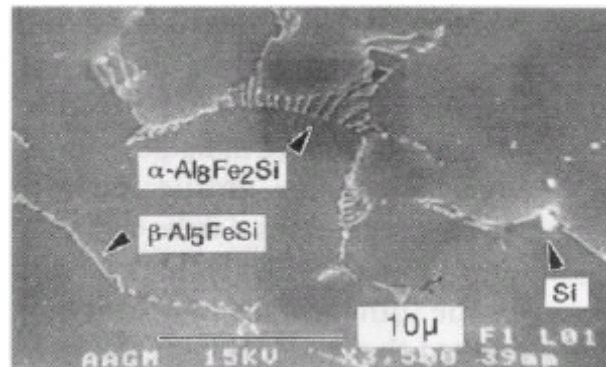
Selama pengecoran aluminium, fasa intermetalik terbentuk diantara lengan dari dendrit aluminium yang telah membeku. Fe mempunyai kelarutan yang rendah pada aluminium yang telah membeku (~0,05wt% pada kesetimbangannya), sehingga sisa Fe pada aluminium yang masih cair pada saat akhir pembekuan akan membeku dalam bentuk fasa kedua intermetalik. Sebagai hasilnya, hampir semua Fe di dalam paduan aluminium terdapat dalam jenis berbeda dari fasa kedua intermetalik yang metastabil diantara butir-butir aluminium^[9]. Berikut ini merupakan proses pembentukan fasa intermetalik pada paduan Al-7Si-0,4Mn.



Gambar 2.2 Proses pembentukan fasa intermetalik pada kadar Mn 0,4 wt%^[17].

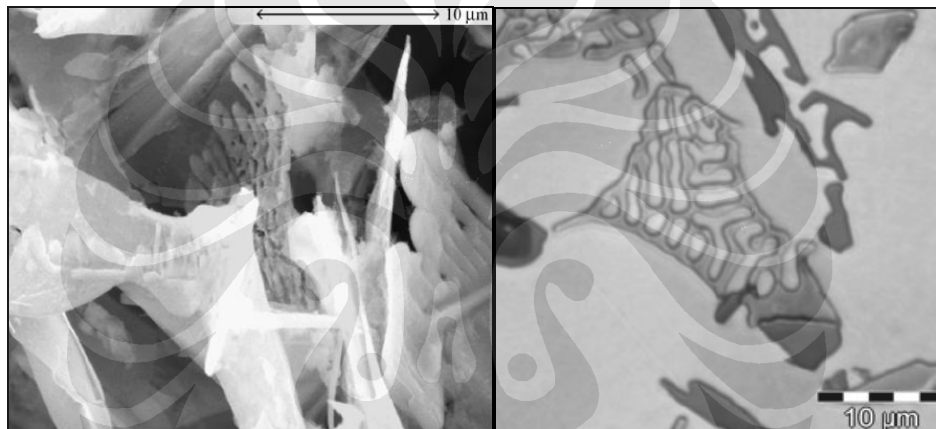
Berdasarkan diagram fasa di atas, pembekuan dimulai dengan pertumbuhan dendrit aluminium (α -Al), dilambangkan dengan anak panah 1. Sisa cairan aluminium menjadi kaya akan elemen-elemen padatan (Fe, Mn, dan Si), lalu garis segregasi (anak panah 2) berpenetrasi ke daerah $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$, dimana partikel $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ tumbuh bersama cairan. Kemudian pada anak panah 3, baik fasa $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ maupun fasa Al_5FeSi tumbuh bersama-sama. Hingga akhirnya Al_5FeSi tumbuh dengan elemen Al dan Si eutektik (titik 4).^[17]

Rasio komposisi Fe/Si pada paduan aluminium merupakan parameter penting untuk menentukan apakah fasa yang terbentuk adalah intermetalik α -AlFeSi atau β -AlFeSi pada proses pengecoran. Ketika rasio Fe/Si lebih besar dari satu selama pembekuan fasa cair maka akan terbentuk fasa intermetalik α -AlFeSi. Sedangkan jika rasio Fe/Si lebih rendah dari 1 maka selama pembekuan akan terbentuk β -AlFeSi. Dengan kecepatan pendinginan 5 K/s dan kandungan Fe 0.2 wt% hanya fasa β -AlFeSi monoklinik yang terbentuk. Dari hasil penelitian yang lain juga menyatakan bahwa fasa metastabil α -AlFeSi dan β -AlFeSi berubah sebagai fungsi kecepatan pendinginan. Beberapa hasil investigasi yang telah dilakukan para peneliti lain, intermetalik α -AlFeSi dan β -AlFeSi didalam satu *as-cast* aluminium menunjukkan bahwa partikel α -AlFeSi yang berbentuk *script* ditemukan pada *triple point* dari butir sedangkan partikel β -AlFeSi yang berbentuk pelat tipis ditemukan pada batas dendrit aluminium seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13 dibawah ini.



(a)

Gambar 2.3 Hasil SEM dimana $\alpha\text{-AlFeSi}$ dalam bentuk script dan $\beta\text{-AlFeSi}$ dalam bentuk pelat^[12].

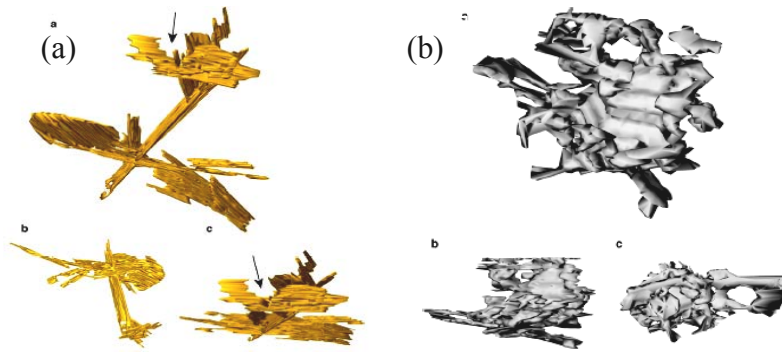


(a)

(b)

Gambar 2.4 (a) Intermetalik $\beta\text{-AlFeSi}$ berupa pelat. (b) Chinese Script $\alpha\text{-AlFeMnSi}$ ^[15].

Pembentukan fasa $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ dapat diminimalisir melalui cara-cara seperti dengan penambahan unsur Mn dalam jumlah yang cukup dan dengan proses pembekuan yang cepat. Cara yang pertama, dimana dilakukan penambahan Mn, dapat memicu terbentuknya *cubic* $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$, sementara cara yang kedua, dengan melakukan proses pembekuan yang cepat, cenderung memicu terbentuknya $\alpha\text{-Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ yang memiliki struktur kristal yang berbeda.^[21]

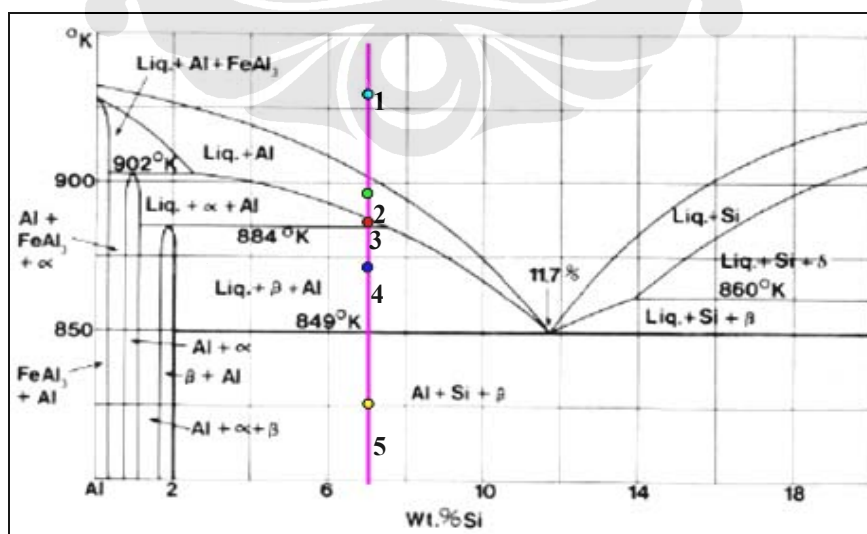


Gambar 2.5 (a) Tampilan tiga-dimensi fasa β - Al_5FeSi yang bagian ujungnya berbentuk jarum. (b) Tampilan tiga-dimensi fasa α - $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ yang membentuk fasa *chinese script* ^[21].

2.4.4 Mekanisme Pembentukan Fasa Intermetalik Selama Pengecoran

Intermetalik α -AlFeSi dan β -AlFeSi terbentuk secara langsung dari fasa liquid dan perubahan fasa metastabil ini berkaitan dengan perubahan kecepatan pendinginan. Mekanisme yang menyebutkan bahwa fasa Intermetalik β terbentuk sebagai hasil reaksi peritektik (reaksi yang terjadi pada saat pemanasan yaitu suatu fasa padat berubah menjadi fasa cair dan fasa padat yang lainnya) dari partikel α ke β . Reaksi seperti ini tidak disukai karena pembekuan terjadi begitu cepat dan hasil gambar mikrostrukturnya tidak menunjukkan jenis dari reaksi peritektik.

Proses pembentukan fasa intermetalik selama pembekuan juga dapat diprediksi dengan menggunakan potongan diagram Al-Fe-Si pada kadar 0,7%Fe.



Gambar 2.6 Potongan diagram Al-Fe-Si pada kadar 0,7% Fe. ^[12]

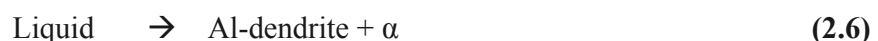
Untuk memberikan gambaran mengenai transformasi fasa yang terjadi selama pembekuan, maka dapat menggunakan asumsi bahwa tidak ada difusi fasa padat dan hanya reaksi diantara fasa cair dan pertumbuhan solid. Dibawah kondisi pembekuan yang tidak setimbang, fasa cair menjadi kaya akan Si dan Fe sehingga kemudian kondisi kesetimbangan akan diperoleh. Dari Gambar 2.16 dapat dilihat bahwa reaksi berikut dapat terjadi selama pengecoran:



Reaksi temperatur tersebut tergantung pada konsentrasi matriks aluminium, dimana dapat sangat berbeda pada paduan yang mengandung elemen terlarut yang lainnya.

Reaksi (2.1) adalah pembekuan aluminium ketika tidak ada fasa baru yang terbentuk. Fasa cair menjadi kaya akan Fe dan Si, dan kejadian seperti ini terjadi pada reaksi (2.2). Pada pembekuan selanjutnya Al_3Fe bereaksi menjadi aluminium padat dan fasa α . Pada temperatur yang lebih rendah, fasa α bereaksi dengan aluminium dan terbentuk pembekuan aluminium dan fasa β . Kemudian sisa fasa cair yang lainnya akan menjadi ternary eutektik pada reaksi (2.5).

Pada penelitian Mulazimoglu *et al*^[18] dinyatakan bahwa pada kecepatan pendinginan 10 K/s hanya partikel α yang terbentuk diantara dendrit. Mereka menyatakan bahwa walaupun Al_3Fe adalah fasa kesetimbangan pada temperatur tersebut tetapi sangat sulit untuk bernukleasi. Sehingga langkah (2.2) dan (2.3) sering tidak terjadi. Sehingga fasa α terbentuk secara langsung dari fasa cair, seperti formula dibawah ini:



Penelitian Mulazimoglu *et al*^[18] menyebutkan bahwa fasa α hanya dapat tumbuh pada periode waktu yang pendek dan range temperatur yang pendek (diantara 618 sampai 615 °C) sebelum temperatur peritektik dicapai (2.4). Penelitian Tanihata *et al*^[19] menyatakan bahwa pada kecepatan pendinginan yang

tinggi (50 K/s) hanya fasa kubik α yang terbentuk, dimana hal ini sesuai dengan kesetimbangan solid state pada temperatur tinggi. Dimana pada kecepatan pendinginan yang rendah, partikel monoklinik fasa β yang terbentuk dimana kesetimbangan pada temperatur rendah. Selama pembekuan dengan kecepatan pendinginan yang rendah, partikel α berubah menjadi partikel β melalui reaksi peritektoid (solid-solid):



Tetapi ketika kecepatan pendinginan kritis dilewati maka fasa α tidak dapat berubah menjadi fasa β .

2.4.5 Pertumbuhan Kompetitif dan Nukleasi Fasa α dan Fasa β

Fasa α terbentuk pada kecepatan pendinginan yang tinggi dan fasa β terbentuk pada kecepatan pendinginan yang rendah. Salah satu alasan yang dapat digunakan untuk menjelaskan perubahan dari fasa α pada kecepatan pendinginan yang rendah adalah pertumbuhan kompetitif dan atau nukleasi kompetitif.

Selama pertumbuhan kompetitif, satu fasa (misalkan A) menekan/menghambat pertumbuhan fasa yang lain (misalkan B), karena temperatur pertumbuhan salah satu fasa adalah lebih besar dari temperatur pertumbuhan fasa yang lain:

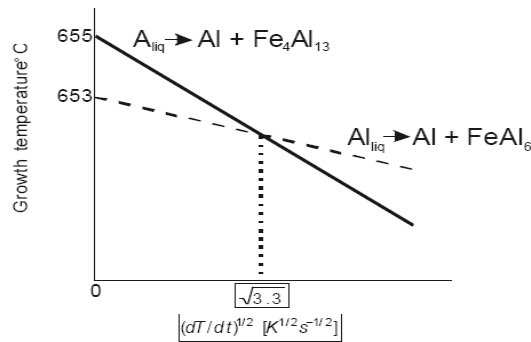
$$T_{grow A} > T_{grow B} \quad (2.8)$$

Untuk mengilustrasikan pengaruh dari pertumbuhan kompetitif, berikut ini contoh hasil penelitian akan dijelaskan. Gambar 2.17 dibawah ini menunjukkan bahwa dibawah titik kritis kecepatan pendinginan, $(dT/dt)_{critical}=3.3 \text{ Ks}^{-1}$, maka $T_{growth 1} > T_{growth 2}$ sehingga pada kecepatan pendinginan tersebut eutektik Al/Fe₄Al₁₃ akan menekan/menghambat Al/FeAl₆. Sedangkan pada kecepatan pendinginan lebih besar dari 3.3 Ks^{-1} , eutektik Al/FeAl₆ akan tumbuh lebih cepat dari pada eutektik Al/Fe₄Al₁₃.

Demikian pula untuk pertumbuhan fasa B dapat secara kinetik menggantikan fasa yang lain (misalkan fasa A), sehingga temperatur nukleasi seperti dibawah ini:

$$T_{nuclate A} > T_{nuclate B} \quad (2.9)$$

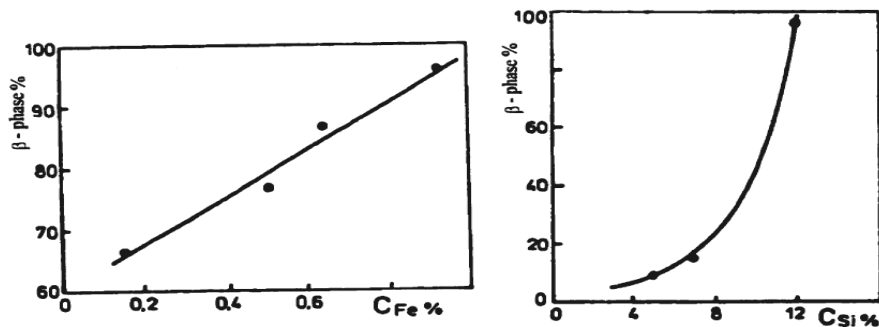
Dimana hal ini diasumsikan bahwa kedua fasa dapat tumbuh dibawah dibawah kondisi pembekuan.



Gambar 2.7 Variasi temperatur pertumbuhan eutektik untuk Al/Fe₄Al₁₃ dan Al/FeAl₆^[12].

2.4.6 Pengaruh Besi dan Silikon pada Fasa Intermetalik

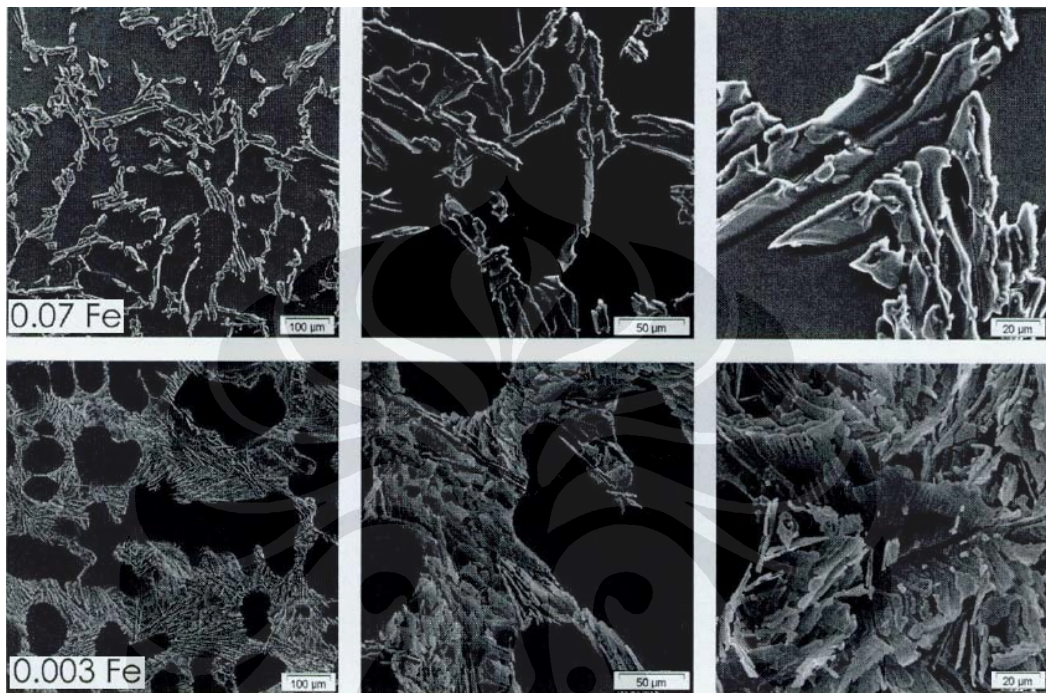
Besi dan silikon merupakan unsur yang paling umum ditemukan dalam paduan aluminium karena kelarutannya rendah selama pembekuan. Fe akan membentuk senyawa intermetalik yang kompleks dengan Silikon, mangan dan juga krom. Selama pengecoran dari paduan aluminium, sejumlah besar dari fasa intermetalik dapat mengendap bergantung dari kondisi dari pembekuan dan paduan kimianya. Pada paduan aluminium-silikon yang mempunyai kadar Fe yang tinggi akan menghasilkan fasa intermetalik β -AlFeSi sebagai fasa yang dominan. Semakin tinggi kadar Fe akan meningkatkan panjang dari bentuk pelat intermetalik β -AlFeSi. Persentase dari fasa β -AlFeSi akan meningkat secara drastis dengan meningkatnya kadar Fe seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.18 yang menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar Si maka akan semakin banyak terbentuk β -AlFeSi.



Gambar 2.8 (a) Hubungan kadar Fe terhadap presentase β -AlFeSi.

(b) Hubungan antara presentase Si dengan β -AlFeSi^[11].

Presipitasi dari fasa β -AlFeSi biasanya terjadi pada daerah liquid-solid pada reaksi pre-eutektik. Adanya jumlah kandungan besi dari 0.5 sampai 1.2 % akan menurunkan sifat mekanik, khususnya elongasi, kekuatan tarik dan kekuatan fatiknya karena terbentuknya plat fasa β -AlFeSi. Fasa ini menyebabkan adanya konsentrasi tegangan, dimana berkontribusi terhadap kegetasan dari material.



Gambar 2.19 Pengaruh besi terhadap morfologi eutektik-silikon pada paduan Al-Si Hipoeutektik^[34].

Pada penelitian Villeneuve^[13] menyatakan bahwa plate jarum β -AlFeSi sering bercabang menjadi beberapa jarum, dan *shrinkage*, rongga dapat terbentuk dalam pengecoran karena ketidakmampuan logam cair untuk mengisiruang diantara cabang-cabang jarum tersebut. Pada penelitian Marshall^[14] menyatakan bahwa ukuran fasa besi intermetalik akan meningkat dengan penambahan besi dan silikon.

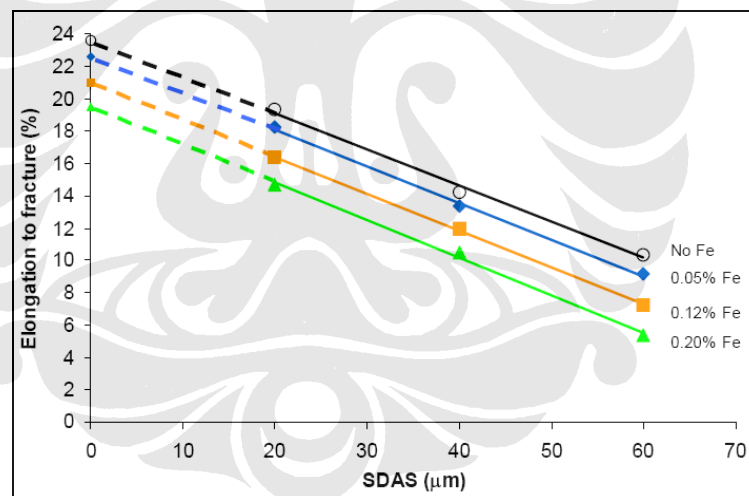
2.4.7 Pengaruh Fasa Intermetalik Terhadap Sifat Mekanis Al-Si

Dengan meningkatnya kadar Fe, keuletan dari paduan aluminium-silikon akan menurun yang diikuti dengan penurunan *tensile strength* dan umumnya *yield strength* tidak dipengaruhi oleh kadar Fe, sehingga *tensile strength* dari paduan

aluminium yang mengandung Fe tidak akan mencapai *yield strength*-nya karena terlebih dahulu terjadi *brittle fracture*.

Pengaruh merusak dari Fe dimulai ketika kadar Fe sangat rendah, tetapi akan menjadi sangat serius bila telah melebihi tingkat kritisnya telah terlewati. Pengaruh merusak terhadap keuletan paduan aluminium-silikon berkaitan pada dua alasan berikut ini:

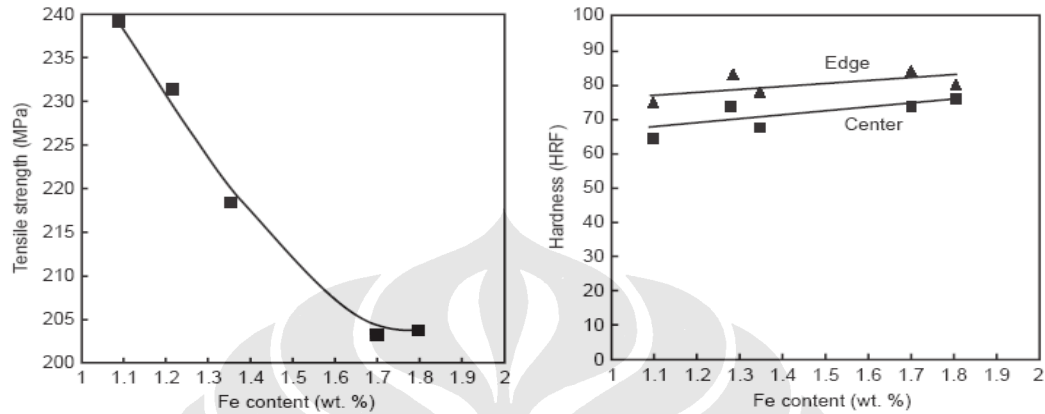
- 1) Ukuran dan jumlah kepadatan dari intermetalik yang mengandung Fe (terutama β -AlFeSi) akan meningkat. Intermetalik ini akan berfungsi seperti endapan yang akan berpengaruh langsung terhadap mekanisme perpatahan dan semakin besar jumlah intermetaliknya maka keuletannya akan semakin turun.
- 2) Dengan semakin meningkatnya kandungan Fe, maka porositas yang terbentuk akan semakin meningkat, sehingga porositas ini akan sangat menurunkan keuletan dari paduan aluminium-silikon.



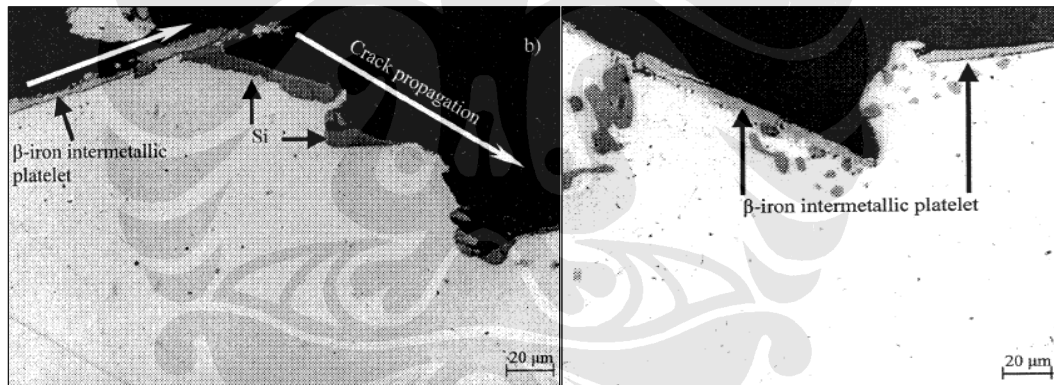
Gambar 2.20 Grafik yang menunjukkan keuletan maksimum sebagai fungsi SDAS pada kadar Fe yang bervariasi.^[15]

Alasan dari Unsur Fe merusak terhadap sifat mekanis dalam paduan aluminium adalah Fe akan menyebabkan paduan lebih mudah untuk terjadi perpatahan dibawah beban tarik dari pada matriks aluminium atau partikel silikon yang kecil (jika dimodifikasi). *Micro cracks* cenderung untuk berinisiasi pada partikel intermetalik β -AlFeSi dan akan memberikan jalan *crack* yang lebih besar untuk terjadi dan berpropagasi lebih lanjut sehingga memudahkan terjadinya

perpatahan. Dapat dicatat bahwa fasa β -AlFeSi cenderung lebih mudah untuk patah dan retak jika dibandingkan dengan fasa α . Disamping itu dengan peningkatan kadar besi maka jumlah porositas juga akan meningkat sehingga menurunkan keuletan dan kekuatan tarik paduan.



Gambar 2.21 Grafik yang menunjukkan sifat mekanis paduan Al-Si sebagai fungsi kadar Fe; (a) Kekuatan tarik, dan (b) Kekerasan^[16].

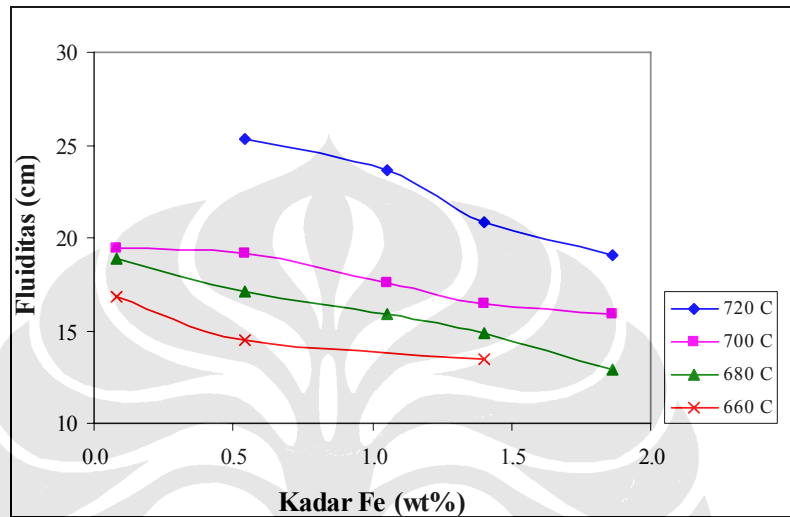


Gambar 2.22 Mikrostruktur yang menunjukkan terjadinya patah pada A356.2^[29]

2.4.8 Pengaruh Fasa Intermetalik Terhadap sifat Mampu Cor Al-Si

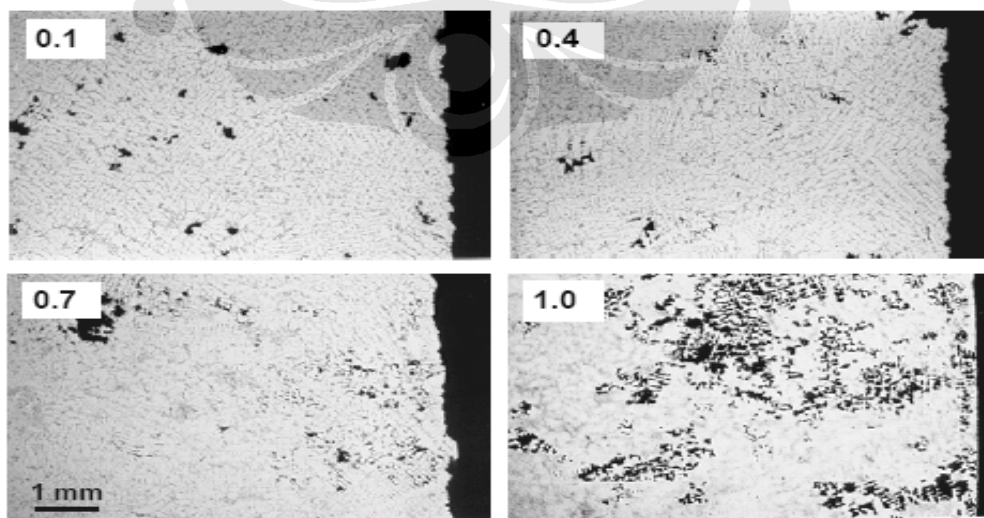
Sifat mampu cor tergantung dari dua faktor utama yaitu keadaan intrinsik dari logam cair dan kondisi pengecoran. Keadaan intrinsik meliputi viskositas, tegangan permukaan, kandungan inklusi dan cara pembekuan dari logam paduan. Kondisi pengecoran meliputi material cetakan, permukaan cetakan, kecepatan penuangan dan temperatur *superheat*^[29]. Berkaitan dengan adanya pengotor Fe dengan jumlah yang melebihi kadar kelarutan, maka sisa dari besi yang tak larut tersebut akan membentuk fasa kedua yang biasanya berbentuk pelat atau *chiness*

script. Menurut penelitian Arie W^[22], menyatakan bahwa dengan semakin bertambahnya kadar Fe maka nilai fluiditas dari paduan aluminium akan semakin turun. Hal ini dapat berarti pula semakin tinggi kadar Fe maka fraksi volum intermetalik yang terbentuk juga akan semakin banyak dan nilai fluiditas akan semakin turun.



Gambar 2.23 Hubungan antara Kadar Fe dan Fluiditas pada paduan Al-7%Si^[26].

Adanya unsur besi pada paduan aluminium berpotensi untuk menurunkan kemampuan sifat cor, serta mempunyai kecenderungan untuk membentuk porositas pada kandungan Fe tinggi.

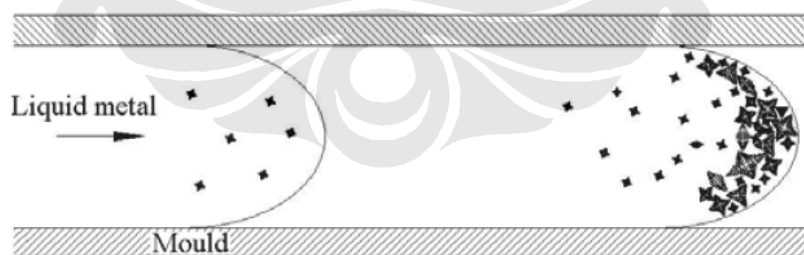


Gambar 2.24 Porositas pada daerah hot spot pada *cylindrical casting* dari Al-5Si-1Cu-0.5Mg alloy. Untuk paduna ini kandungan Fe kritisnya 0.4^[15].

Ada dua teori yang populer mengenai pembentukan porositas ketika kandungan Fe nya tinggi yaitu :

1. Kandungan Fe yang tinggi akan menghasilkan lebih banyak partikel β -AlFeSi yang mana akan menjadi awal dari tempat pembentukan porositas (*initial nucleation sites*).
2. Besarnya partikel β -AlFeSi akan menghalangi aliran dari interdendritic liquid selama feeding dan selanjutnya shrinkage dan porositas akan terbentuk lebih banyak.

Pada kadar Fe diatas Fe kritis akan menghasilkan urutan pembekuan yang diawali dengan pembentukkan fasa β sebelum pembekuan Al-Si eutektik. Dan ketika ini terjadi akan meningkatkan kecenderungan untuk terjadinya *shrinkage porosity defect* seperti gambar diatas. Disamping itu ada yang mempelajari bagaimana Fe berinteraksi dengan pengembangan butir dari Al-Si eutektik untuk menurunkan *feeding* hingga meningkatkan porositas. Fasa β yang berbentuk pelat akan berperan sebagai lokasai nukleasi yang kuat untuk Al-Si eutektik. Dengan meningkatnya kadar Fe maka akan merusak tempat nukleasi dari Al-Si eutektik, sehingga Al-Si eutektik yang terbentuk akan semakin lebih besar bersamaan dengan fasa β berbentuk pelat yang lebih besar yang mana fasa ini muncul untuk mengurangi permeabilitas dan *feeding* sehingga meningkatkan *shrinkage porosity*^[15].

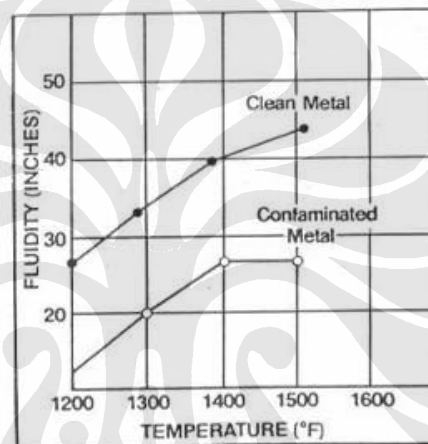


Gambar 2.25 skema aliran logam cair pada chanel fluiditas. Fraksi solid meningkat dengan berjalannya waktu, akumulasi pembekuan dendrit pada ujung aliran logam.^[23]

Selama pembekuan, dendrit mulai tumbuh pada ujung lelehan pada saluran aliran dan viskositas lelehan semakin naik dengan naiknya fraksi padat pada ujung aliran sehingga pada keadaan fraksi solid kritis, aliran lelehan akan berhenti.

Naiknya jumlah pengotor atau fasa intermetalik pada lelehan akan menurunkan fraksi solid kritis pada ujung aliran sehingga akan mengurangi *flow time* dan panjang fluiditas. Fluiditas dari lelehan dipengaruhi baik oleh morfologi dan jumlah fraksi intermetalik. Morfologi yang berbentuk pelat mempunyai area antarmuka terbanyak dengan lelehan dan merupakan penyebab dari menurunnya fluiditas^[31].

Pada Gambar 4.26 di bawah terlihat bahwa logam yang terkontaminasi banyak pengotor (misalnya Fe) memiliki nilai fluiditas yang rendah. Sedangkan logam yang relatif lebih bersih memiliki nilai fluiditas relatif lebih tinggi.



Gambar 2.26 Pengaruh kebersihan logam cair terhadap fluiditas.^[24]