

## BAB II

### STUDI LITERATUR

#### 2.1 Paduan Aluminium Tuang

Paduan aluminium tuang merupakan paduan tuang yang relatif lebih banyak digunakan dibandingkan jenis paduan tuang material lainnya. Aluminium dapat digunakan pada berbagai macam proses pengecoran yang umum dipakai dan dapat dituang langsung ke dalam cetakan logam atau *dies* yang terpasang pada mesin otomatis dengan volume yang besar. Cairan aluminium dapat dituang ke dalam cetakan pasir *shell*, sentrifugal, *investment*, maupun proses *plaster*.

Sebagai material tuang, aluminium memiliki beberapa karakteristik<sup>[2]</sup>, yaitu :

- 1) Fluiditas yang baik sehingga mampu mengisi rongga – rongga cetakan yang tipis.
- 2) Temperatur lebur dan temperatur tuang yang relatif lebih rendah dibandingkan logam lain.
- 3) Siklus penuangan yang cukup cepat, dikarenakan perpindahan panas dari aluminium cair ke cetakan relatif lebih cepat.
- 4) Kelarutan gas (dalam hal ini hidrogen) dapat dikendalikan dengan proses yang baik.
- 5) Cukup banyak jenis paduan aluminium tuang yang relatif bebas dari kecenderungan *hot shortness*.
- 6) Memiliki stabilitas kimia yang cukup baik.
- 7) Memiliki permukaan *as-cast* yang baik, berkilat, dan tanpa noda.

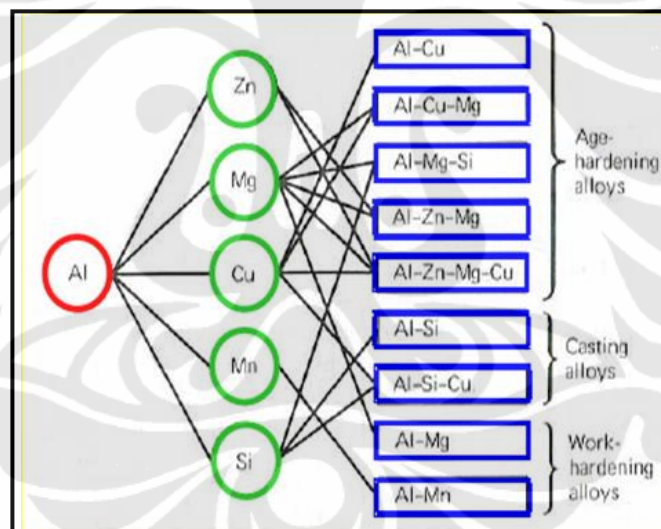
Paduan aluminium tuang memiliki temperatur proses peleburan yang relatif rendah (memiliki titik lebur sekitar 650 – 750 °C)<sup>[2]</sup>, dibandingkan dengan logam-logam lain kebanyakan.

Salah satu sifat yang terpenting dari aluminium adalah memiliki berat jenis yang cukup rendah<sup>[7]</sup>, yaitu sekitar 2,689 gr/cm<sup>3</sup>, dan dalam keadaan cair berat jenisnya sekitar 2,3 gr/cm<sup>3</sup>. Oleh karena itu, logam ini digolongkan ke dalam

golongan logam ringan. Dengan bobotnya yang ringan, menjadikan proses penuangan untuk benda-benda yang berukuran kecil dapat dilakukan cukup dengan menggunakan tangan dan tekanan cetakan juga relatif rendah sehingga dapat dipakai peralatan cetakan yang ringan.

Selain keuntungan diatas, berat jenis yang rendah juga dapat memberikan efek yang kurang menguntungkan yaitu adanya *impurities* non-metallik (seperti oksida) yang umumnya memiliki berat jenis yang hampir sama dengan aluminium cair itu sendiri ( $1.9 - 2.1 \text{ gr/cm}^3$ )<sup>[21]</sup>. Oleh karena itu, diperlukan perhatian yang cukup besar untuk dapat memisahkan *impurities-impurities* tersebut selama proses peleburan maupun penuangan.

Gambar berikut menunjukkan berbagai jenis paduan aluminium yang umum digunakan.



Gambar 2.1 Ringkasan aluminium paduan yang sering digunakan<sup>[23]</sup>.

## 2.2 Sistem Penamaan Paduan Aluminium Tuang

Berdasarkan sistem penamaan yang dikeluarkan oleh *Aluminum Association (AA)* atau *American National Standard Institute (ANSI H35.1-1978)*, pengelompokan paduan aluminium tuang komersial didasarkan pada sistem 4 digit angka, seperti pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Klasifikasi aluminium paduan sesuai standar AA<sup>[2]</sup>.

Seri	Tipe Paduan
1XX.X	Al murni ( $\geq 99\%$ )
2XX.X	Al + Cu
3XX.X	Al-Si + Cu dan/atau Mg
4XX.X	Al + Si
5XX.X	Al + Mg
7XX.X	Al + Zn
8XX.X	Al + Sn
9XX.X	Al + Elemen lain
6XX.X	Tidak digunakan

Digit pertama menunjukkan kelompok paduan. Digit kedua dan ketiga menunjukkan tingkat kemurnian minimum untuk Al tanpa paduan (1XX.X), dan sebagai nomor identifikasi untuk kelompok paduan lainnya. Digit keempat mengindikasikan bentuk produk<sup>[2]</sup>:

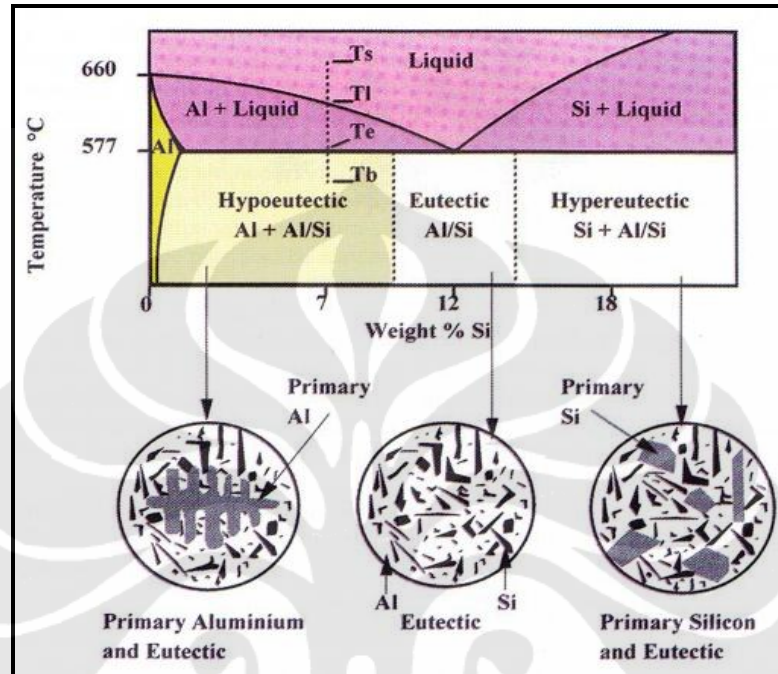
- 0 untuk mengindikasikan keterbatasan kimia yang diberikan pada paduan coran.
- 1 untuk mengindikasikan keterbatasan kimia yang diberikan untuk ingot yang digunakan untuk membuat paduan coran.
- 2 untuk mengindikasikan ingot namun dengan perbedaan keterbatasan kimia.

### 2.3 Paduan Aluminium Silikon

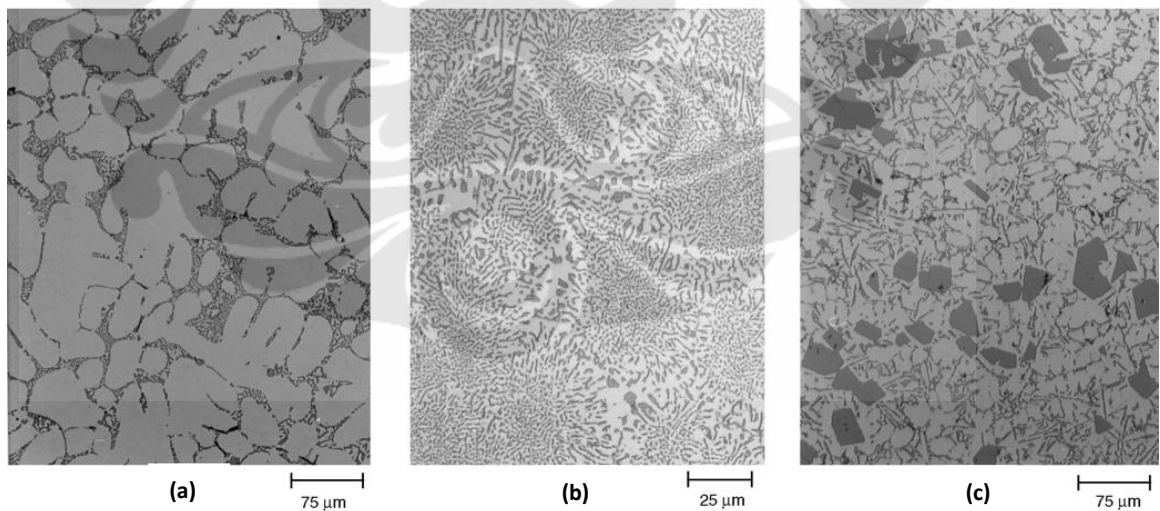
Dari sekian banyak jenis paduan aluminium tuang, yang paling umum digunakan untuk keperluan komersial adalah paduan aluminium silikon (Al-Si). Hal ini dikarenakan paduan aluminium silikon memiliki karakteristik cor yang sangat baik dibandingkan dengan paduan-paduan lainnya. Paduan ini memiliki variasi sifat fisik dan mekanis seperti sifat mampu cor, ketahanan korosi, dan sifat mampu permesinan yang baik<sup>[7]</sup>.

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

hipoeutektik, komposisi eutektik, dan komposisi hipereutektik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram fasa paduan aluminium silikon (Al-Si).



Gambar 2.3 (a) Mikrostruktur komposisi hipoeutektik, 150 X; (b) Mikrostruktur komposisi eutektik, 400X ; dan (c) Mikrostruktur komposisi hipereutektik, 150X <sup>[11]</sup>.

Struktur utama dari ketiga komposisi paduan ini adalah berupa fase  $\alpha$ -Al, yang memiliki banyak kandungan aluminium. Struktur ini tetap akan muncul walaupun pada komposisi hipereutektik, karena bentuk struktur ini akan selalu

terpisah pada fasa padatnya baik dalam paduan hipoeutektik, eutektik, dan hipereutektik<sup>[8]</sup>. Selain fasa  $\alpha$ -Al, juga terdapat fasa  $\beta$ , yang merupakan partikel-partikel silikon yang tidak larut dalam fasa  $\alpha$ -Al. Pada paduan hipereutektik, fasa tersebut menghasilkan silikon primer yang bentuknya relatif kasar.

Pada komposisi hipoeutektik, terdapat kadar silikon  $< 11.7\%$ <sup>[9]</sup>. Pada daerah ini terjadi pembekuan terjadi melalui fasa cair-padat. Struktur akhir dari komposisi ini adalah struktur yang kaya akan aluminium, dan sebagai fasa utamanya adalah fasa  $\alpha$  dengan struktur eutektik sebagai tambahan<sup>[9]</sup>.

Komposisi eutektik mengandung kadar silikon antara  $11.7\% - 12.2\%$ <sup>[9]</sup>. Komposisi eutektik merupakan daerah dimana paduan Al-Si dapat membeku secara langsung dari fasa cair ke fasa padatnya<sup>[8]</sup>. Adanya struktur eutektik ini mengakibatkan paduan aluminium silikon memiliki karakteristik mampu cor yang baik.

Untuk komposisi hipereutektik, kandungan silikonnya  $> 12.2\%$ <sup>[9]</sup>, sehingga struktur ini memiliki komposisi yang kaya akan silikon dengan fasa eutektik sebagai fasa tambahan.

#### **2.4 Paduan Aluminium Tuang AC4B**

Berdasarkan standar JIS H5202 (*Japan International Standard*) paduan aluminium AC4B setara dengan paduan aluminium tuang paduan 333.0 standar AA (*Aluminum Association*). Komposisi kimia paduan aluminium AC4B berdasarkan standar JIS H5202 dapat dilihat pada tabel 2.2 dan komposisi kimia paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar AA pada tabel 2.3. Sesuai dengan sistem penamaan aluminium, aluminium paduan AC4B merupakan seri 3 dimana unsur yang dominan adalah Al, Si, dan Cu. Dari tabel komposisi terlihat juga adanya unsur tambahan dalam jumlah yang kecil (*minor elements*) seperti Mg, Fe, Ni, Zn, Mn, dan Ti.

Kelebihan dari paduan aluminium tuang AC4B adalah kekuatan dan kekerasan yang baik, sifat mampu cor (*castability*) juga baik, sifat mampu las yang baik dan dapat dilakukan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanisnya<sup>[1]</sup>.

**Tabel 2.2** Standar komposisi paduan aluminium tuang AC4B sesuai standar JIS H5202<sup>[3]</sup>.

Kelas	Simbol	Komposisi Kimia %								
		Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Al
Kelas 1A	AC1A	4.0-5.0	1.2 max	0.3 max	0.3 max	0.5 max	0.3 max	-	0.25max	sisa
Kelas 2A	AC2A	3.5-4.5	4.0-5.0	0.2 max	0.5 max	0.8 max	0.5 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 2B	AC2B	2.0-4.0	5.0-7.0	0.5 max	1.0 max	1.0 max	0.5 max	0.3 max	0.2 max	sisa
Kelas 3A	AC3A	0.2 max	10.0-13.0	0.1 max	0.3 max	0.8 max	0.3 max	-	-	sisa
Kelas 4A	AC4A	0.2 max	8.0-10.0	0.4-0.8	0.2 max	0.5 max	0.3-0.8	-	0.2 max	sisa
<b>Kelas 4B</b>	<b>AC4B</b>	<b>2.0-4.0</b>	<b>7.0-10.0</b>	<b>0.5 max</b>	<b>1.0 max</b>	<b>1.0 max</b>	<b>0.5 max</b>	<b>0.3 max</b>	<b>0.2 max</b>	<b>sisa</b>
Kelas 4C	AC4C	0.2 max	6.5-7.5	0.2-0.4	0.3 max	0.5 max	0.5 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 4D	AC4D	1.0-1.5	4.5-5.5	0.4-0.6	0.3 max	0.6 max	0.5 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 5A	AC5A	3.5-4.5	0.6 max	1.2-1.8	0.1 max	0.8 max	0.5 max	1.2-2.3	0.2 max	sisa
Kelas 7A	AC7A	0.1 max	0.3 max	3.5-5.5	0.1 max	0.4 max	0.6 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 7B	AC7B	0.1 max	0.3 max	9.5-11.0	0.1 max	0.4 max	0.1 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 8A	AC8A	8.0-1.3	11.0-13.0	0.7-1.3	0.1 max	0.8 max	0.1 max	1.0-2.5	0.2 max	sisa
Kelas 8B	AC8B	2.0-4.0	8.5-10.5	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	0.5-1.5	0.2 max	sisa
Kelas 8C	AC8C	2.0-4.0	8.5-10.6	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	-	0.2 max	sisa

**Tabel 2.3** Standar komposisi paduan aluminium tuang 333.0 sesuai standar AA<sup>[2]</sup>.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Others	Al
8.0-10.0	1 max	3.0-4.0	0.5	0.05-0.50	0	0.5	1 max	0.25	0.5	Sisa

Sifat mekanis dari paduan ini dapat dilihat pada tabel 2.4. Aplikasi yang cocok untuk paduan aluminium tuang AC4B ini adalah dalam aplikasi otomotif yang membutuhkan sifat kekuatan dan kekerasan serta diimbangi karakteristik konduktivitas panas yang baik seperti *engine cooling fans, clutch housing, crankcases, cylinder heads, air compressors pistons, fuel pumps, compressor cases, rocker arms, timing gears*<sup>[1]</sup>.

**Tabel 2.4** Sifat mekanis dari aluminium paduan AC4B<sup>[2]</sup>.

Casting Process and Temper	Tension			Shearing Strength (ksi)	Compressive Yield Strength (Set 0.2%) (ksi)	Brinell Hardness (500 kg load on 10 mm ball)	Endurance Limit (ksi)
	Ultimate Strength (ksi)	Yield Strength (Set 0.2%) (ksi)	Elongation (% in 2 in.)				
P.M.—F	34	19	2.0	27	19	90	14.5
P.M.—T5	34	25	1.0	27	25	100	12.0
P.M.—T533	32	25	1.0	-	-	100	-
P.M.—T6	42	30	1.5	33	30	105	15.0
P.M.—T7	37	28	2.0	28	28	90	12.0

Ket : F merupakan kondisi *as-cast*

## 2.5 Pengaruh Unsur dalam Paduan Aluminium Tuang

Unsur-unsur paduan biasanya ditambahkan ke dalam aluminium dengan tujuan meningkatkan kekuatan, disamping juga untuk peningkatan sifat-sifat lainnya yang tidak kalah penting. Unsur paduan utama pada paduan aluminium tuang AC4B adalah silikon (7-10 %) dan tembaga (2-4 %)<sup>[3]</sup>. Kandungan silikon meningkatkan karakteristik pengecoran. Sedangkan tembaga akan memberikan pengaruh terhadap peningkatan kekuatan dan memperbaiki sifat mampu mesin serta juga berpengaruh terhadap penurunan keuletan dan ketahanan korosi<sup>[8]</sup>. Untuk lebih jelasnya, berikut pengaruh unsur-unsur yang terdapat dalam paduan aluminium-silikon (dengan tambahan tembaga), terutama pada paduan AC4B :

### 1. Silikon (Si)

Silikon merupakan unsur paduan yang paling umum digunakan pada proses pengecoran, terutama untuk Al-Si komersial. Berdasarkan standar JIS, kandungan silikon dapat mencapai 5-14 % dan untuk paduan aluminium AC4B sendiri sekitar 7-10 %<sup>[3]</sup>. Fungsi silikon adalah untuk meningkatkan karakteristik coran. Atau dengan kata lain, penambahan silikon pada aluminium murni akan meningkatkan mampu alir dan mengurangi terjadinya efek *hot shortness* pada hasil coran<sup>[7]</sup>. Hal ini merupakan faktor terpenting dalam pengecoran paduan aluminium-silikon.

### 2. Tembaga (Cu)

Kandungan tembaga pada paduan aluminium AC4B berkisar 2-4 %<sup>[3]</sup>. Keberadaan unsur tembaga pada paduan aluminium silikon, berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tanpa harus kehilangan sifat mampu coranya<sup>[10]</sup>. Semakin banyak kadar tembaga yang ditambahkan, maka akan semakin banyak jumlah fasa yang terbentuk, sehingga sifat kekerasan dan kekuatan paduan akan semakin meningkat pula.

### 3. Besi (Fe)

Merupakan pengotor (*impurity*) yang paling sering ditemukan di dalam aluminium<sup>[10]</sup>. Kandungan unsur besi pada paduan AC4B harus dijaga agar tidak melebihi 0.8 % dari jumlah berat paduan<sup>[3]</sup>. Besi memiliki kelarutan yang cukup tinggi pada aluminium cair, dan mudah sekali larut pada seluruh fasa aluminium



cair. Kelarutan besi dalam aluminium pada fasa padat sangat rendah ( $\sim 0.04\%$ )<sup>[10]</sup>, dan kebanyakan keberadaan besi dalam aluminium yang melebihi jumlah tersebut berupa fasa intermetalik kedua yang berkombinasi dengan aluminium dan unsur lainnya. Penambahan besi pada aluminium akan meningkatkan ketahanan *hot tear* dan menurunkan kecenderungan penempelan atau persambungan dengan cetakan *die casting*. Besi bereaksi membentuk fasa-fasa tidak terlarut (*insoluble*) dalam leburan paduan aluminium, yang umumnya berupa  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{FeMnAl}_6$ , dan  $\text{AlFeSi}$ <sup>[10]</sup>. Fasa-fasa tak larut ini berpengaruh pada peningkatan kekuatan, terutama pada kondisi kenaikan temperatur. Unsur yang secara alami sebagai pengotor pada aluminium ini dalam jumlah kecil juga akan mengurangi kecenderungan retak panas (*hot-cracking*) dalam pengecoran. Akan tetapi, adanya kadar besi pada paduan yang berlebihan secara substansial yang kemudian membentuk kristal  $\text{FeSiAl}_5$  akan menurunkan sifat keuletan dan ketahanan korosi paduan Al-Si dan mengakibatkan struktur butir yang kasar<sup>[10]</sup>.

Besi dengan penambahan mangan pada komposisi sekitar eutektik akan menghasilkan kekuatan dan keuletan pada temperatur ruang dan mempertahankan kekuatannya pada temperatur tinggi. Hal ini didasari pada kehalusan butir akibat fasa intermetalik yang terdispersi halus dan merata<sup>[10]</sup>.

#### 4. Magnesium (Mg)

Magnesium adalah basis untuk kekuatan dan kekerasan dalam perlakuan panas paduan Al-Si dan pada umumnya digunakan dalam paduan kompleks Al-Si yang mengandung tembaga, nikel dan unsur-unsur lainnya. Dalam pemaduan di pengecoran, pada umumnya magnesium memiliki rentang dari 4-10 %<sup>[10]</sup>. Pada paduan AC4B, kandungan magnesium dijaga agar tidak melebihi 0.5 %<sup>[3]</sup>. Fase penguat (*hardening phase*)  $\text{Mg}_2\text{Si}$  akan berguna pada kadar sekitar 0.7 % Mg, lebih dari itu maka efek penguatannya tidak terjadi<sup>[10]</sup>.

Peranan magnesium dalam paduan aluminium silikon ini serupa dengan tembaga, yaitu berpengaruh dalam peningkatan kekuatan korosi, tetapi mengurangi sifat mampu cor, sehingga jumlahnya harus dibatasi<sup>[11]</sup>.



## 5. Seng (Zn)

Tidak ada keuntungan teknis yang pasti dapat dicapai dengan penambahan seng, akan tetapi apabila digunakan bersama dengan tembaga dan atau magnesium, penambahan seng menghasilkan komposisi *heat-treatable* dan *aging natural* yang unik<sup>[10]</sup>. Seng juga pada umumnya digunakan pada komposisi pengecoran *gravity casting* dan *die casting* dari material *scrap*. Kandungan seng dalam paduan AC4B dibatasi hingga 0.1 %<sup>[3]</sup>.

## 6. Mangan (Mn)

Pada kondisi dan aplikasi normal, mangan merupakan pengotor dalam komposisi coran, sehingga harus dikendalikan agar tetap rendah dalam proses *gravity casting*. Mangan tidak memberikan efek yang signifikan pada coran paduan aluminium yang tidak dilakukan *work hardening*. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa fraksi volume yang tinggi dari  $MnAl_6$  pada paduan aluminium yang mengandung lebih dari 0.5 % Mn, menunjukkan pengaruh yang menguntungkan pada mutu internal dari coran<sup>[10]</sup>.

## 7. Nikel (Ni)

Keberadaan nikel bersama dengan tembaga dalam paduan aluminium silikon, berperan untuk mempertahankan sifat-sifat paduan pada kenaikan temperatur. Nikel memiliki kelarutan padat yang tidak mencapai 0.04 %, selebihnya akan menghasilkan fasa intermetalik, yang umumnya berkombinasi dengan unsur besi. Nikel juga berpengaruh dalam mereduksi koefisien ekspansi termal<sup>[10]</sup>.

## 8. Titanium (Ti)

Merupakan unsur minor pada paduan aluminium AC4B. Titanium ditemukan dalam aluminium dengan kemurnian komersial dalam jumlah 10 hingga 100 ppm<sup>[10]</sup>. Digunakan sebagai penghalus butir (*grain refiner*) pada paduan aluminium hasil pengecoran. Apabila digunakan tanpa kandungan boron, pengaruh titanium akan berkurang dengan meningkatnya *holding time* dari cairan aluminium atau akibat proses peleburan kembali.

## 2.6 Pengaruh Struktur Mikro terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium Tuang

Struktur mikro dari paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi, kecepatan pembekuan, serta perlakuan panas. Komponen dari struktur mikro yang mempengaruhi sifat mekanis pada aluminium tuang adalah<sup>[1]</sup>

1. Ukuran, bentuk, dan distribusi fasa intermetalik
2. *Dendrite arm spacing* (DAS)
3. Ukuran dan bentuk butir
4. Modifikasi eutektik

### 2.6.1 Fasa Intermetalik

Fasa intermetalik merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro paduan aluminium, yang terbentuk sebagai akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Keberadaan fasa ini dipengaruhi oleh komposisi dan mekanisme pembekuan yang terjadi.

Pada reaksi solidifikasi paduan Al-Si hipoeutektik dan eutektik terjadi beberapa mekanisme pengendapan fasa, yaitu :

- Pembentukan jaringan dendritik  $\alpha$ -aluminium.
- Reaksi eutektik Al-Si.
- Pengendapan fasa kedua eutektik seperti  $Mg_2Si$  dan  $Al_2Cu$

Sebagai tambahan, dari reaksi utama diatas terjadi juga pengendapan fasa yang mengandung Mn dan Fe. Fasa yang paling sering muncul pada paduan Al-Si adalah fasa  $Al_5FeSi$  dan  $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ . Dan selanjutnya pada tahapan akhir solidifikasi terjadi pengendapan fasa  $Mg_2Si$  dan  $Al_2Cu$ .

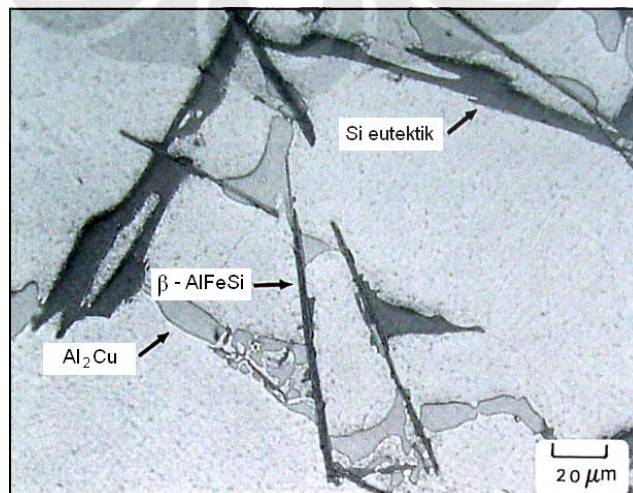
Keberadaan Fe dapat membentuk fasa  $Al_5FeSi$  yang getas, sehingga keberadaan fasa ini dapat menurunkan keuletan. Fasa  $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$  yang berasal dari paduan Mn juga memiliki sifat yang getas dan keras seperti yang dihasilkan oleh Fe. Kedua fasa ini menyebabkan sulitnya proses *machining*.

Fasa metalik  $\alpha$ -aluminium lebih mudah bertumbuh dibandingkan kristal silikon dan fasa intermetalik lainnya. Namun diantara fasa intermetalik, terdapat perbedaan kecepatan pertumbuhan, dimana fasa  $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$  lebih mudah bertumbuh dibandingkan fasa  $Al_5FeSi$  sehingga fasa ini lebih mendominasi pada

saat pembekuan cepat. Dibawah ini diberikan penjabaran tahapan reaksi saat solidifikasi :

1. Awal solidifikasi dan pembentukan  $\alpha$ -aluminium
2. Pengendapan fasa yang mengandung Fe (titik koherensi dendrit)  
Liquid  $\rightarrow$  Al +  $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$   
atau  
Liquid  $\rightarrow$  Al +  $\text{Al}_5\text{FeSi}$
3. Awal reaksi utama eutektik  
Liquid  $\rightarrow$  Al + Si +  $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$   
atau  
Liquid  $\rightarrow$  Al + Si +  $\text{Al}_5\text{FeSi}$
4. Pengendapan fasa  $\text{Al}_2\text{Cu}$   
Al +  $\text{Al}_2\text{Cu}$  + Si +  $\text{Al}_5\text{FeSi}$
5. Pengendapan fasa kompleks  
Liquid  $\rightarrow$  Al +  $\text{Al}_2\text{Cu}$  + Si +  $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$
6. Akhir dari solidifikasi

Kecepatan pembekuan sangat mempengaruhi ukuran, bentuk dan distribusi fasa intermetalik. Pembekuan yang lambat menghasilkan fasa intermetalik yang kasar dan juga terjadi konsentrasi fasa kedua pada batas butir. Pembekuan yang cepat menghasilkan semakin banyak larutan padat dan partikel yang lebih halus terdispersi.



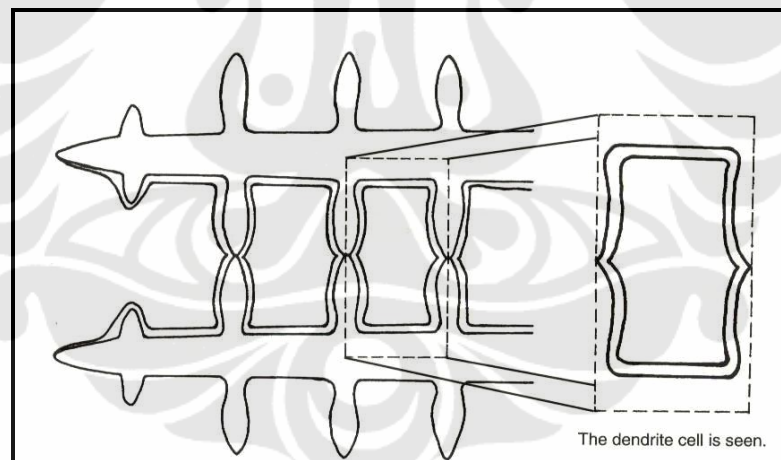
**Gambar 2.4** Fasa Intermetalik pada paduan aluminium.

### 2.6.2 Dendrite arm spacing (DAS)

Dendrit merupakan suatu struktur khas pada produk hasil pengecoran. Ada 3 hal yang menjadi acuan dalam menjelaskan karakteristik dendrit, yaitu :

- *Dendrite arm spacing* : jarak antara lengan sekunder dendrit.
- *Dendrite sel interval* : jarak antara garis sumbu dendrit yang saling berdekatan.
- *Dendrite cell size* : lebar dendrit.

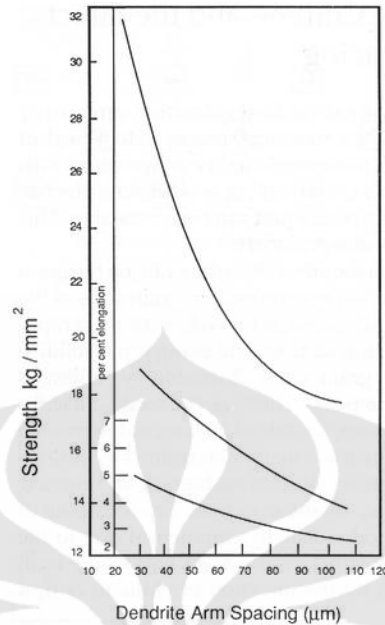
*Dendrite arm spacing* (DAS) atau jarak antar lengan dendrit ini dipengaruhi oleh cepat lambatnya proses pembekuan pada proses pengecoran. Dan nilai DAS ini mempengaruhi sifat mekanis suatu paduan logam. Nilai DAS yang semakin besar mengindikasikan struktur mikro yang kasar sehingga sifat mekanisnya pun tidak baik. Sedangkan nilai DAS yang kecil mengindikasikan struktur mikro yang halus dengan sifat mekanis yang baik<sup>[5]</sup>.



Gambar 2.5 Sketsa geometris sel dendrit<sup>[5]</sup>.

Tabel 2.5 Pengaruh laju pembekuan terhadap *Dendrite Arm Spacing*.

Casting processes	Cooling rate		Dendrite arm spacing	
	°F/s	°C/s	mils	µm
Plaster, investment	1.80	1	3.94–39.4	100–1000
Green sand, shell	18.0	10	1.97–19.7	50–500
Permanent mold	180.0	100	1.18–2.76	30–70
Die	1800	1000	0.20–0.59	5–15



**Gambar 2.6** Grafik pengaruh *Dendrite Arm Spacing* terhadap kekuatan<sup>[1]</sup>.

### 2.6.3 Ukuran dan Bentuk Butir

Dalam struktur mikro suatu logam terdapat banyak butir. Butir-butir ini memiliki bentuk dan ukuran yang berpengaruh terhadap sifat mekanis logam itu sendiri. Butir yang halus dan *equiaxed* sangat diinginkan dalam struktur mikro logam karena dapat menghasilkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan. Sedangkan adanya butir yang kasar dan berbentuk *columnar* tidak diinginkan karena menurunkan sifat mekanis. Bentuk dan ukuran butir dapat dibentuk dengan menentukan komposisi paduan, kecepatan pembekuan, dan penambahan penghalus butir untuk membentuk inti butir yang heterogen<sup>[11]</sup>.

### 2.6.4 Modifikasi Kristal Silikon

Proses modifikasi didefinisikan sebagai proses penambahan unsur tertentu yang dapat merubah struktur mikro eutektik Si dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*. Elemen modifikasi yang berasal dari unsur-unsur golongan IA, IIA dan unsur tanah jarang seperti (Sr) dan Sodium (Na) untuk paduan Al-Si Hipoeutektik, sedangkan phosphor (P) dan Antimony (Sb) untuk paduan Al-Si Hipereutektik<sup>[4]</sup>.

Efektifitas dari perlakuan modifikasi dapat dilihat dari derajat dan lama waktu *undercooling* saat proses pembekuan. Secara umum tujuan dilakukannya modifikasi adalah untuk<sup>[8]</sup> :

- Meningkatkan UTS dan keuletan.
- Meningkatkan kekuatan impak dan ketangguhan.
- Meningkatkan kekuatan fatik.
- Sifat mampu mesin (*machinability*) menjadi lebih baik.
- Kecenderungan terhadap *hot tearing* (retak panas) rendah.
- Meningkatkan fluiditas.

## 2.7 Pembekuan Logam

### 2.7.1 Pembekuan Logam Secara Umum

Produk dari suatu benda tuang sangat tergantung dari proses pembekuannya, oleh karena itu fenomena pembekuan dari tuangan dan variabel-variabel yang mempengaruhi struktur akhir benda tuang selama proses pembekuannya perlu diperhatikan.

Pada waktu terjadinya pembekuan atau pencairan, logam berada pada dua fasa sekaligus yaitu fasa padat dan fasa cair. Fasa cair memiliki susunan yang tidak teratur apabila didinginkan mendekati temperatur pembekuannya maka akan terbentuk sekelompok atom yang bergabung dan kedudukannya teratur dimana kelompok ini makin lama makin banyak dan juga akan berkembang (*inti*) menjadi butir (*padat*). Perubahan suatu fasa selalu menuju pada energi bebas yang terendah, perubahan fasa cair ke fasa padat suatu logam disebabkan perubahan logam cair menuju kondisi yang lebih stabil dengan berkurangnya energi bebas. Jika yang terjadi hanya perubahan sejumlah kecil volume maka dapat ditulis seperti pada Persamaan (2.1) :

$$G = H - TS \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana :

G : Energi bebas

H : Energi total

T : Temperatur absolut (K)

S : Entropi

Pada temperatur tertentu energi total sebesar H dalam sistem dapat terdiri dari dua bagian, yaitu :

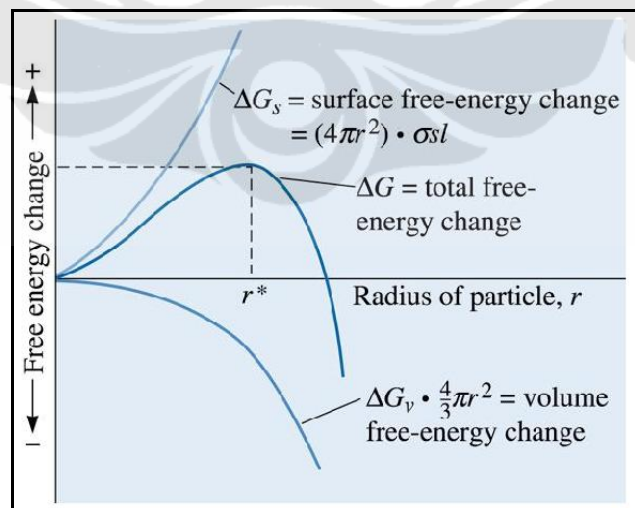
- Energi bebas / *Gibbs Free Energy* (G).
- Energi ikatan / *Bound Energy*.

Kedua bentuk energi ini dapat terjadi secara serentak dalam bentuk yang berlainan, dan pada akhirnya dapat diubah ke dalam bentuk panas. Kandungan panas dalam sistem tersebut dapat dihitung berdasarkan unit termal. Energi bebas *Gibbs* dapat dijelaskan bahwa dalam kondisi tertentu energi dapat diubah dan dilepaskan tanpa perubahan temperatur.

### 2.7.2 Proses Pembentukan Inti (Nukleus)

Untuk pembentukan kristal diperlukan pembentukan inti atau proses nukleasi. Proses pembentukan inti dan pertumbuhan kristal ditentukan oleh dua faktor :

- Energi permukaan yaitu energi yang diperlukan untuk membentuk permukaan sampai tegangan radius kritis ( $r_c$ ), dimana tegangan permukaan adalah  $\gamma$ .
- Energi volume, yaitu energi yang diperlukan untuk pembentukan volume pada temperatur konstan.

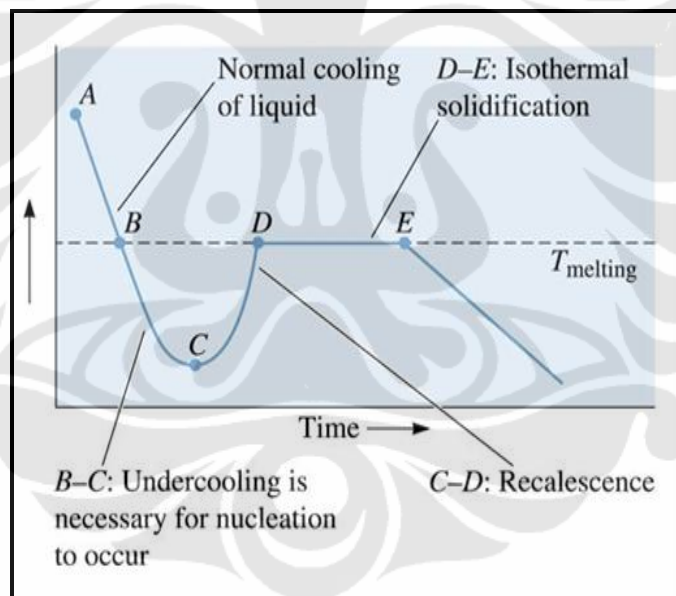


Gambar 2.7 Radius Kritis<sup>[12]</sup>.



Beda energi antara fasa padat dengan fasa cair menghasilkan beda energi volume ( $\Delta G_v$ ) yang bernilai negatif. Saat pembentukan fasa padat tersebut terbentuk suatu batas antar permukaan antara kedua fasa tersebut, permukaan ini memiliki energi bebas permukaan ( $\sigma$ ) sebagai pertumbuhan fasa solid yang bernilai positif.

Jadi, total energi bebas pada sistem fasa cair menjadi fasa padat tergantung pada jari-jari kritis dari inti pembentuk fasa padat. Apabila jari-jari inti kurang dari jari-jari kritisnya maka tidak terjadi pembekuan artinya jika jumlah intinya kurang maka inti akan kembali larut. Apabila fasa cair tepat pada titik pembekuan hanya sedikit molekul yang bersatu karena molekul-molekul tersebut memiliki energi yang tinggi, ketika fasa cair diturunkan dari titik pembekuannya maka banyak molekul yang terbentuk menjadi inti (*nuclei*). Kemudian inti-inti tersebut membesar dan membentuk fasa padat.



**Gambar 2.8** Kurva pembekuan pada logam murni<sup>[12]</sup>.

Dari kurva pendinginan antara waktu dan temperatur, dapat dilihat bahwa untuk terbentuknya nukleasi dibutuhkan *undercooling* (titik B-C), kemudian nukleasi terjadi pada titik C, antara titik C-D terjadi *recalcescence* yaitu melepaskan fusi panas laten karena meningkatnya temperatur pada fasa cair. Kemudian pada titik E pembekuan selesai.

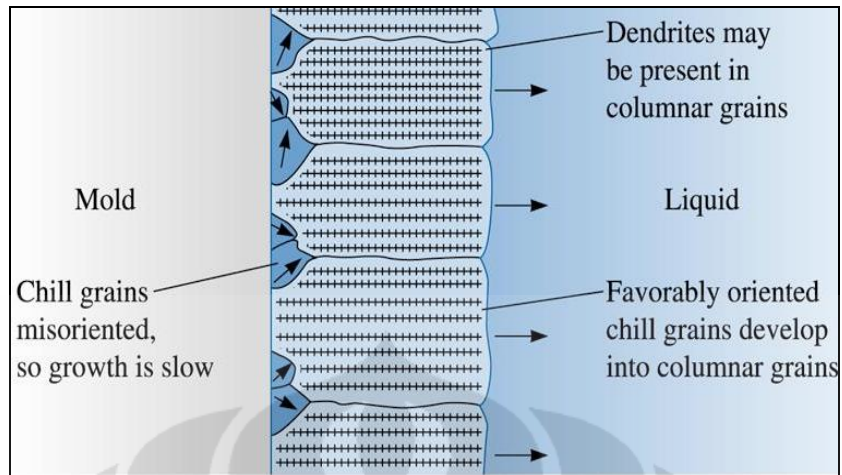
### 2.7.3 Proses Pembentukan Kristal

Pertumbuhan kristal merupakan kelanjutan proses nukleasi dimana proses ini akan menentukan bentuk kristalografi akhir logam tuang. Pada proses pengecoran, pertumbuhan kristal berawal dari dinding cetakan menuju bagian tengah sampai akhirnya semua logam cair membeku. Kecepatan pertumbuhan diatur oleh besarnya derajat pendinginan lanjut dibawah titik lebur. Kecepatan pertumbuhan meningkat seiring dengan naiknya derajat pendinginan lanjut hingga maksimum dan kemudian turun lagi. Kecepatan pembekuan inti dan kecepatan pertumbuhan mengikuti arah yang sama dengan meningkatnya derajat pendinginan lebih lanjut.

#### 2.7.3.1 Struktur Kristal *Columnar*

Ketika dituang ke dalam cetakan, logam cair yang bersentuhan dengan dinding cetakan akan mengalami pendinginan cepat dibawah temperatur liquidusnya, inti-inti padat kemudian terbentuk pada dinding cetakan dan mulai tumbuh ke arah dalam logam cair karena adanya gradien temperatur.

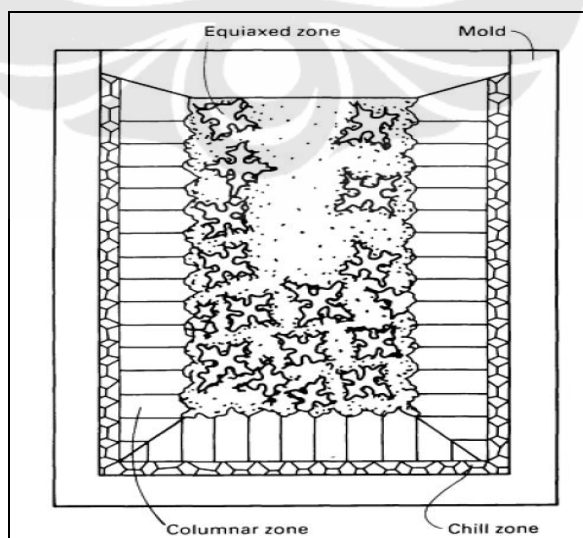
Selama proses pembekuan pertama pada dinding cetakan ini, panas yang berasal dari logam (panas laten) akan dilepaskan sehingga meningkatkan temperatur sekitarnya dan kecepatan pendinginan lanjutpun akan menurun. Perubahan ini akan menghentikan pembentukan inti baru yang selanjutnya akan akan terjadi pertumbuhan secara kontinyu. Pertumbuhan ini dikontrol oleh kecepatan perpindahan panas sehingga menghasilkan suatu struktur yang dinamakan *columnar*. Struktur ini dapat dilihat pada Gambar 2.9. Daerah pada dinding cetakan merupakan daerah pendinginan cepat (*chill zone*) sehingga sering diperoleh struktur yang berbutir halus yang tergantung pada gradien temperatur antara cetakan dan logam cair.



Gambar 2.9 Ilustrasi pembentukan butir pada bagian dekat dinding cetakan<sup>[17]</sup>.

### 2.7.3.2 Struktur Kristal *Equiaxed*

Struktur kristal *equiaxed* pada dinding cetakan dan bagian tengah cetakan menggantikan pertumbuhan *columnar*. Struktur *equiaxed* memiliki orientasi kristalografis yang acak. Pada dinding cetakan, struktur ini terbentuk karena pendinginan cepat sehingga logam cair memiliki kecepatan nukleasi yang tinggi. Pada bagian tengah cetakan, struktur ini terbentuk akibat gradien temperatur antara solid dan liquid sudah sedemikian kecilnya sehingga pendinginan lanjut konstitusional menjadi demikian efektif bagi proses nukleasi kristal-kristal baru.



Gambar 2.10 Struktur yang terjadi pada hasil tuangan logam cair<sup>[15]</sup>.

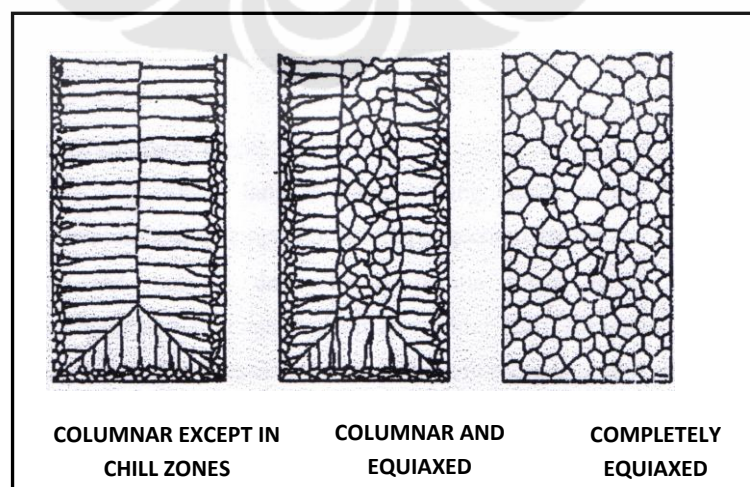
Selanjutnya dendrit *equiaxed* yang terbentuk akan tumbuh dan merupakan awal terbentuknya butir.

## 2.8 Grain Refining

*Grain refining* adalah suatu proses penghalusan butir, sehingga diperoleh ukuran butir yang lebih kecil, halus dan homogen dengan melakukan perlakuan terhadap cairan logam pada saat proses pengecorannya<sup>[2]</sup>.

Paduan aluminium, seperti logam paduan lainnya pada kondisi normal akan membentuk butir yang kasar, *equiaxed* dan *columnar* ketika terjadi pembekuan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11.<sup>[2]</sup> Tingkat kekasaran atau besar butir tergantung pada temperatur tuang logam, gradien temperatur antara cetakan dan logam cair, dan terbentuknya secara alami inti butir seperti intermetalik dan nonmetalik. Penambahan elemen paduan sebagai *grain refiner* ke dalam paduan aluminium cair akan mengurangi ukuran butir, semakin besar kelarutannya maka efek pengecilan butir akan semakin besar<sup>[2]</sup>. Elemen tambahan yang banyak digunakan sekarang ini untuk mengurangi ukuran butir diantaranya adalah Titanium (Ti) dan Boron (B). Titanium (Ti) dan Boron (B) memiliki efisiensi yang tinggi dalam proses penghalusan butir<sup>[2]</sup>.

Untuk memperbaiki sifat-sifat mekanis dari paduan aluminium, maka ukuran butir mempunyai pengaruh yang cukup besar. Kontrol ukuran butir dalam *casting* sangat berperan untuk menghasilkan struktur yang seragam dan memiliki sifat yang lebih baik.

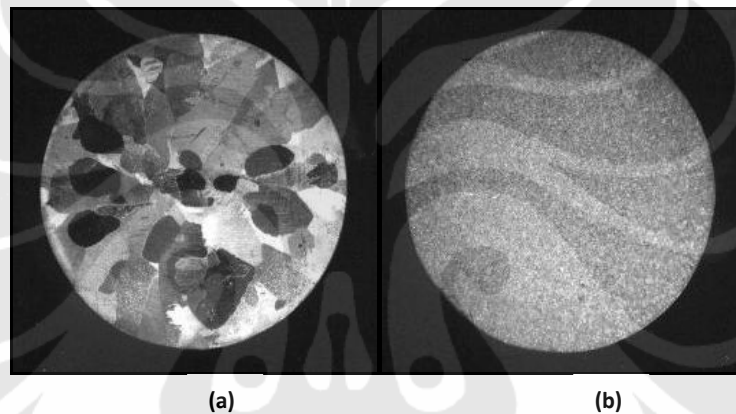


Gambar 2.11 Struktur butir hasil *casting* aluminium

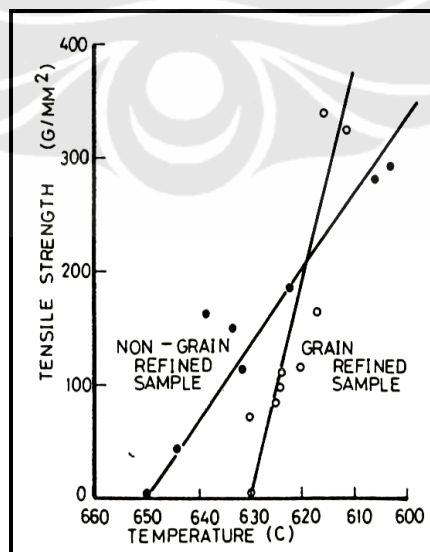
### 2.8.1 Pengaruh *Grain Refining* pada Paduan Aluminium Tuang

Penambahan *grain refiner* ke dalam paduan aluminium tuang akan memberikan efek yang menguntungkan, diantaranya adalah<sup>[2]</sup>:

1. Meningkatkan sifat mekanis material sesuai dengan struktur butir yang lebih halus.
2. Sifat mampu cor lebih baik yang dihasilkan dari struktur butir yang lebih halus, sehingga cacat pengecoran seperti *hot tearing*, *shrinkage*, dan *porosity* akan lebih minimal. Logam dengan butir yang kasar cenderung terjadi *hot tearing* ketika terjadi pembekuan karena butir yang berkembang akan lebih terlokalisasi area regangannya.

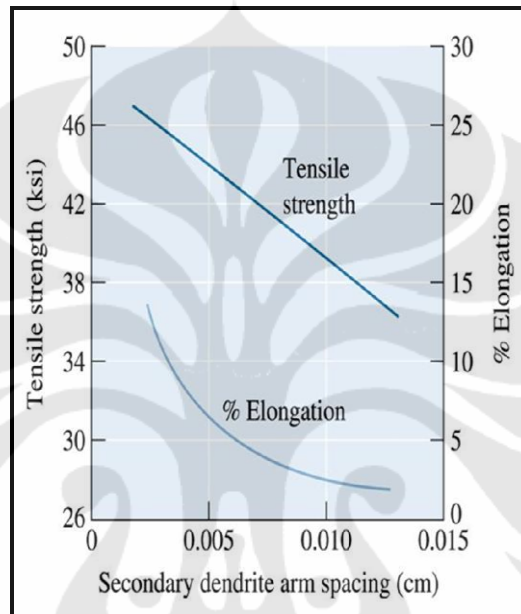


**Gambar 2.12** Perbandingan makrostruktur (a) tanpa *grain refiner*, nominal ukuran butir 4500 $\mu$ ; (b) dengan *grain refiner* AlTi-5%B-1%, nominal ukuran butir 120 $\mu$ <sup>[14]</sup>.



**Gambar 2.13** Perbandingan *hot tensile strength* sampel *grain refined* dan *non-grain refined* pada paduan Al-0.5%Mg-0.4%Si<sup>[4]</sup>.

3. *Dendrite arm spacing* (DAS) mengecil dengan laju pembekuan yang cepat, dimana penambahan *grain refiner* dapat menghasilkan laju pembekuan yang lebih cepat sehingga juga berdampak pada peningkatan kekuatan mekanis benda *casting*. Semakin kecil DAS, maka nilai kekuatannya semakin meningkat dan elongasinya juga bertambah besar.



**Gambar 2.14** Pengaruh nilai DAS terhadap sifat mekanis pada paduan aluminium tuang<sup>[15]</sup>.

4. Kontrol yang lebih baik dan keseragaman respon dari suatu proses perlakuan panas terjadi pada ukuran butir yang lebih halus karena ada keseragaman paduan diseluruh coran.
5. Struktur butir yang lebih halus menghasilkan peningkatan *extrudability*, *sheet formability*, dan *machinability*. Operasi akhir permukaan seperti poles dan *anodizing* menjadi lebih mudah karena struktur butir yang lebih halus.

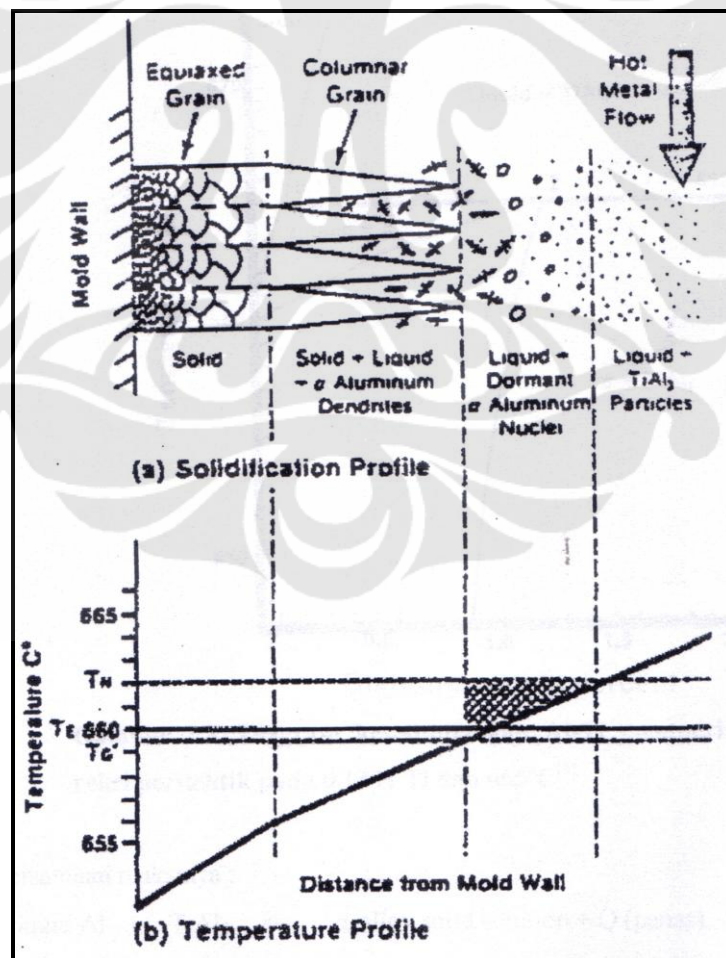
### 2.8.2 Mekanisme *Grain Refining* dengan Penambahan TiB

Mekanisme *grain refining* adalah dengan mempercepat laju nukleasi dan menghambat pertumbuhan kristal sehingga didapat butir yang kecil dan banyak. Peningkatan laju nukleasi ini dan penghambatan pertumbuhan kristal dapat dilakukan dengan penambahan *grain refiner* seperti Titanium (Ti) dan Boron (B).



Untuk paduan aluminium tuang biasanya digunakan 0.02 – 0.15 % titanium atau paduan 0.01 – 0.03 % titanium dan 0.01 % boron. Fungsi boron adalah untuk membuat titanium menjadi lebih efektif. Kedua *grain refiner* ini pada aluminium cair akan membentuk nukleasi (benih) dari titanium borida, titanium karbida, aluminium borida atau senyawa intermetalik kompleks lainnya dalam cairan logam dalam jumlah banyak dan merata. Hal ini menyebabkan terbentuknya butir yang halus ketika aluminium cair ini membeku, tetapi penambahan boron berlebih dapat menyebabkan endapan karbida pada dasar tanur<sup>[4]</sup>.

Berikut gambaran skematik dari nukleasi, pertumbuhan kristal dan distribusi temperatur dengan inti yang ditambahkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15.



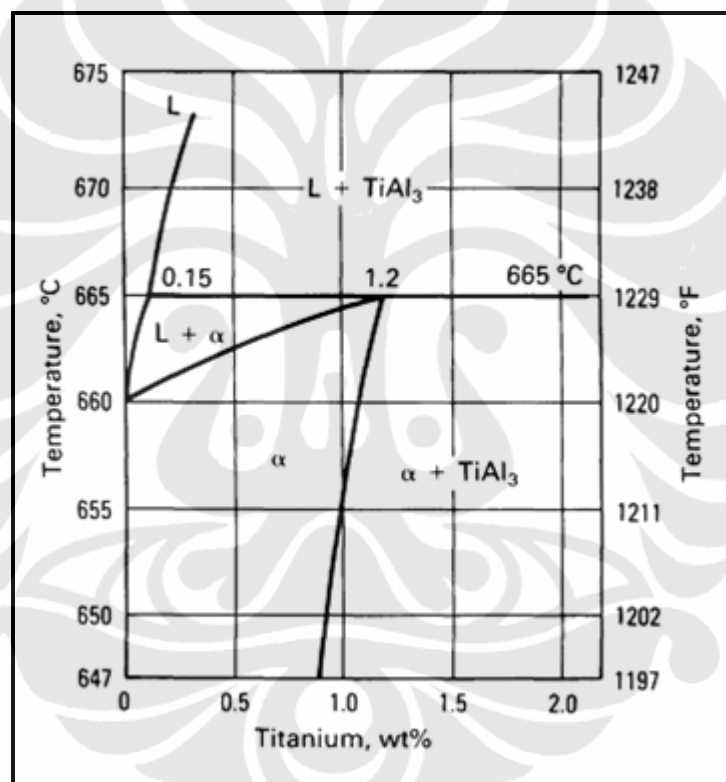
Gambar 2.15 Kurva pembekuan dan profil temperatur Al dengan inti yang ditambahkan<sup>[13]</sup>.



Partikel nukleasi memberikan pembentukan kristal Al yang baru dan bertumbuh berhadapan dengan arah tumbuh sehingga mengurangi pertumbuhan kristal *columnar* dari dinding cetakan dan memberikan struktur butir yang halus. Kondisi pertumbuhan butir yang lebih diinginkan dapat diperoleh dengan partikel nukleasi yang juga berkontribusi pada reaksi peritektik yang terjadi pada temperatur 665 °C dengan kehadiran 0.15 % Ti, dengan reaksi :



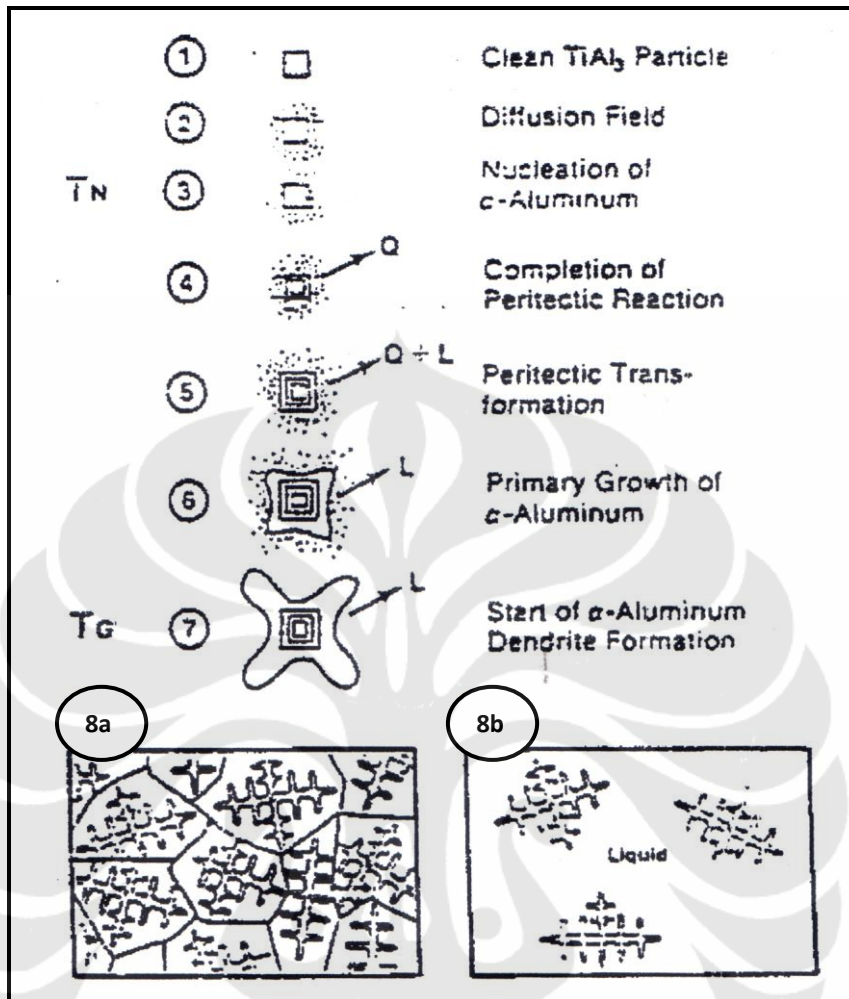
seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.16 Diagram Fasa Al-Ti<sup>[4]</sup>.

Reaksi diatas bersifat eksotermik. Panas dibebaskan sebagai akibat dari reaksi peritektik. Pembentukan solid solution yang baru akan menutupi partikel TiAl<sub>3</sub> yang akan memberikan nukleasi dimana butir akan tumbuh.

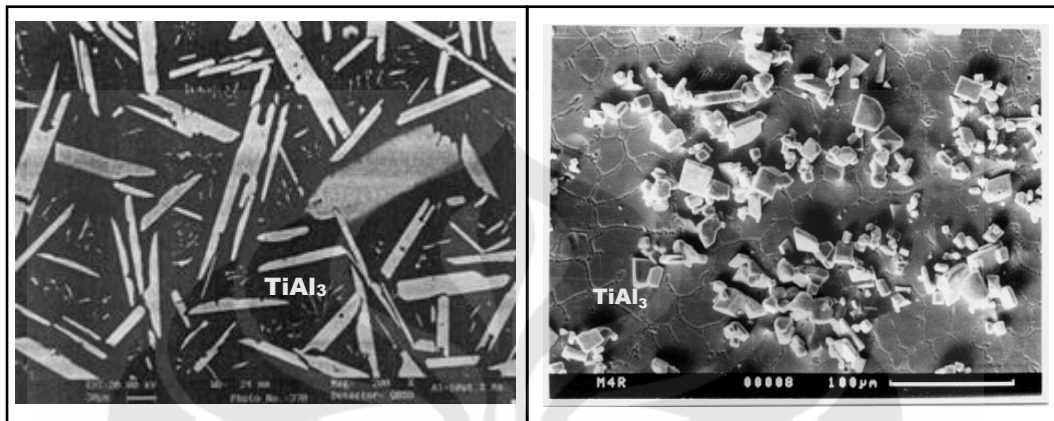
Pembekuan dan pertumbuhan kristal dapat dilihat lebih jelas pada gambar berikut.



Gambar 2.17 Skematik nukleasi dan penghalusan butir dari Al dengan peritektik  $\text{TiAl}_3$ <sup>[13]</sup>.

Pada tahap 1, partikel  $\text{TiAl}_3$  mulai larut dan konsentrasi Ti dalam Al cair akan meningkat di sekitar partikel (tahap 2). Jika komposisi peritektik dan temperatur nukleasi ( $T_n$ ) dicapai maka reaksi peritektik dimulai pada tahap ke-3, yang mengakibatkan nukleasi dari solid Al pada permukaan partikel. Solid kristal dari  $\alpha$ -aluminium akan tumbuh (tahap 4) sampai reaksi peritektik selesai dimana pertumbuhan akan terhenti sehingga partikel menjadi *non* aktif hingga temperatur pertumbuhan ( $T_g$ ) dicapai. Pada keadaan ini panas akan dilepaskan. Pada tahap 5 dan 6 adalah pertumbuhan yang lambat dari  $\alpha$ -aluminium layer pada kristal. Ketika logam cair mengalami pendinginan (pada temperatur pertumbuhan /  $T_g$ ), nukleus akan tumbuh membentuk cabang-cabang dendrit. Ketika temperatur turun, maka ruang dendritik diisi dan membeku. Enstias yang lebih tinggi dari partikel  $\text{TiAl}_3$  dengan karakteristik nukleasi yang baik akan menghasilkan butir

yang lebih halus seperti yang ditunjukkan pada tahap (8a). Jika partikel  $TiAl_3$  tidak cukup, maka dendrit dapat tumbuh lebih besar seperti yang ditunjukkan pada tahap (8b). Morfologi dari partikel  $TiAl_3$  dapat dilihat pada gambar berikut.



(a)

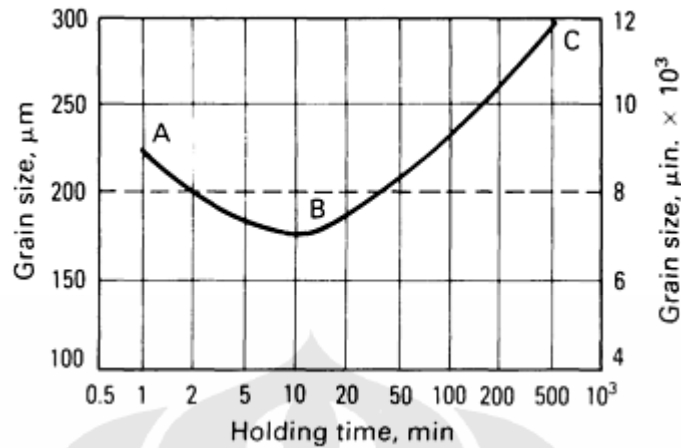
(b)

**Gambar 2.18** (a) Struktur mikro *master alloy* Al-10Ti dengan menggunakan SEM, menunjukkan morfologi  $TiAl_3$  berbentuk *needle* (jarum) <sup>[16]</sup>, (b) Struktur mikro *master alloy* Al-5Ti-1B dengan menggunakan SEM, menunjukkan morfologi  $TiAl_3$  berbentuk *blocky* (balok) <sup>[19]</sup>.

### 2.8.3 Efek *Fading*

Efek *fading* perlu dikontrol saat penambahan *grain refiner* di dalam aluminium cair, yaitu menemukan waktu kontak keefektifan yang paling tinggi (*critical contact time*) *grain refiner* dengan logam cair. Jika waktu kontak terlalu singkat, maka sulit untuk memperoleh butir yang halus, dan jika waktu kontak terlalu lama, keefektifan *grain refiner* juga semakin turun<sup>[6]</sup>. Diketahui waktu pudar minimum secara signifikan terjadi setelah 20 menit hingga 30 menit<sup>[6]</sup>.

Menurunnya keefektifan *grain refiner* dapat dilihat pada Gambar 2.19, penurunan ukuran butir dari A ke B adalah akibat dari penambahan *grain refiner*. Kontak waktu yang semakin lama, mengakibatkan ukuran butir kembali semakin meningkat yaitu dari B ke C. Fenomena inilah yang disebut proses *fading*. Waktu *fading* dari tiap-tiap jenis *grain refiner* berbeda-beda, tergantung dari jumlah persen Ti dan B serta bentuk dari *grain refiner* itu sendiri.

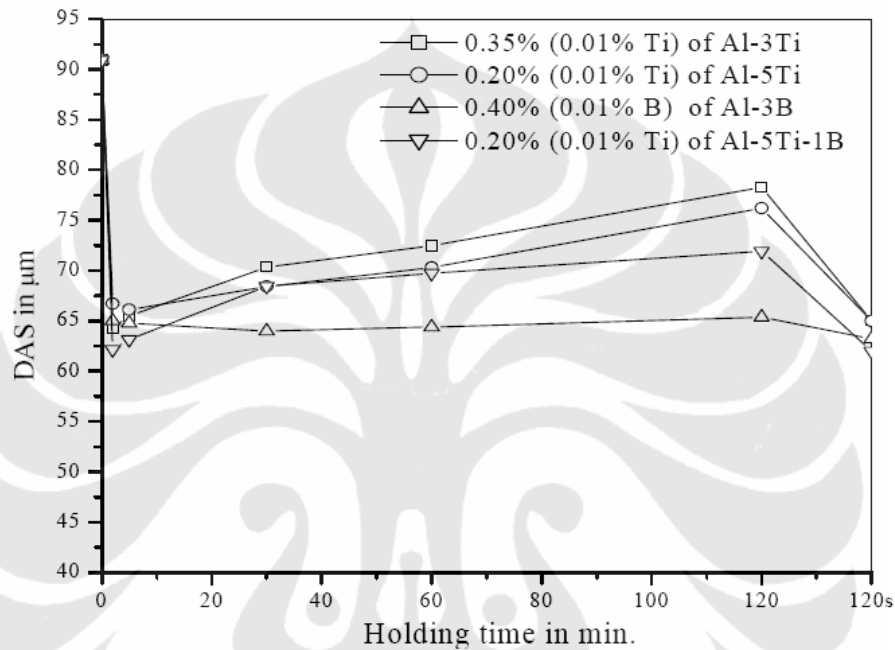


Gambar 2.19. Pengaruh waktu tahan setelah ditambah *grain refiner* tipe *master alloys*<sup>[11]</sup>.

Beberapa penyebab berkurangnya efektifitas *grain refiner* setelah periode waktu tertentu yaitu terjadinya agglomerasi (penggumpalan) dan pengendapan<sup>[18,19,20]</sup>. Agglomerasi terjadi pada senyawa borida yang membentuk gumpalan *cluster* yang luas sehingga densitasnya meningkat dan akhirnya mengendap lebih cepat ke dasar *furnace*<sup>[18]</sup>. Pengendapan terjadi karena logam cair tidak diaduk sehingga terjadi pengendapan. Hal ini dikarenakan senyawa intermetalik  $TiAl_3$  memiliki densitas  $3,35 \text{ gr/cm}^3$ <sup>[17]</sup>. Bila dibandingkan, aluminium cair memiliki densitas  $2.3 \text{ gr/cm}^3$ , maka  $TiAl_3$  mengendap pada dasar *furnace*. Partikel – partikel  $TiB_2$  dan  $TiAl_3$  dapat terlihat dengan jelas pada bagian dasar *furnace* yang berwarna gelap. Oleh karena itu, untuk menghindari efek *fading*, perlu dilakukan pengadukan pada aluminium cair secara berkala agar partikel–partikel tersebut dapat kembali merata ke seluruh aluminium cair dan dapat bertindak sebagai nukleat<sup>[6]</sup>.

Pentingnya efek pengadukan (*stirring*) agar partikel–partikel *grain refiner* kembali efektif untuk memperoleh butir yang halus dibuktikan pada suatu penelitian<sup>[19]</sup>. Salah satu hasil penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.20, bahwa pada kondisi tanpa penambahan *grain refiner*, nilai DAS paduan Al-7Si adalah  $90 \mu\text{m}$  (0 menit). Dengan penambahan 0.35 % (0.01 % Ti) Al-3Ti *master alloy* ke dalam paduan aluminium cair Al-7Si, nilai DAS berkurang dari  $90 \mu\text{m}$  hingga  $66 \mu\text{m}$  pada periode *holding* yang singkat (2 menit). Kemudian pada waktu *holding* yang lama (5-120 menit), nilai DAS semakin meningkat dari  $70 \mu\text{m}$  (5 menit) hingga  $78 \mu\text{m}$  (120 menit). Hal ini mengindikasikan terjadinya

pengendapan partikel  $TiAl_3$  (terjadi efek *fading*). Setelah 120 menit, dilakukan *stirring* selama 10 detik sehingga kembali terjadi penurunan ukuran dendrit  $\alpha$ -Al hingga 64  $\mu m$ . Kondisi yang sama juga terjadi pada penambahan (0.01 % Ti) *master alloy* Al-5Ti, Al-5Ti-1B dan 0.40 % (0.01 % B) *master alloy* Al-3B. Penelitian ini dioperasikan pada dapur induksi dengan temperatur operasi 800 °C.

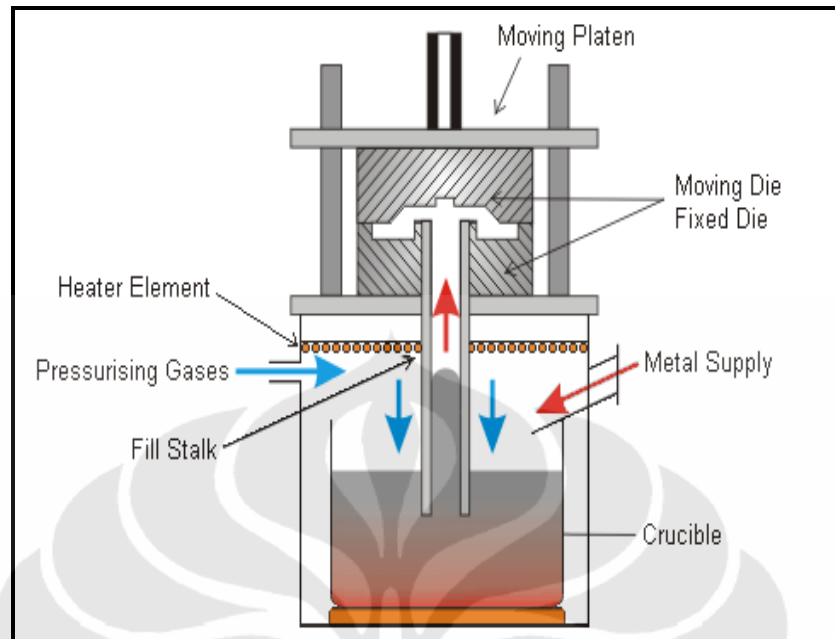


**Gambar 2.20** Hasil pengukuran DAS paduan Al-7Si dengan penambahan berbagai *grain refiner* terhadap selang waktu *holding*<sup>[19]</sup>.

## 2.9 Low Pressure Die Casting (LPDC)

*Die casting* adalah salah satu metode pengecoran dengan menggunakan cetakan logam, dan metode ini adalah cara atau metode tercepat untuk memproduksi produk *casting* dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan pengecoran dengan cetakan pasir.

Salah satu jenis dari proses *permanent mold casting* yaitu dengan menggunakan prinsip *low pressure*, atau dikenal dengan nama *low pressure permanent mold casting (Low Pressure Die Casting)*<sup>[2]</sup>. Proses *Low Pressure Die Casting* (LPDC) menggunakan cetakan permanen yang menggunakan material *tool steel*. Pada bagian bawah dari alat ini terdapat *holding furnace* yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan aluminium cair yang akan dicor. Cetakan logam berada pada bagian atas.



**Gambar 2.21** Proses *Low Pressure Die Casting*

Prinsip kerja dari proses LPDC adalah dengan menggunakan tekanan yang tidak terlalu tinggi (2-15 psi) untuk menekan aluminium cair dibagian *holding furnace* sehingga mengakibatkan aluminium cair naik ke atas melalui bagian *fill stalk* (seperti pipa) menuju cetakan dan akhirnya logam cair mengisi cetakan<sup>[2]</sup>. Bagian cetakan memiliki dua bagian yaitu *cup* dan *drug* dimana bagian *cup* dapat bergerak naik ke atas untuk membuka cetakan sehingga produk cor dapat dikeluarkan.

Keuntungan dari proses *Low pressure casting* diantaranya adalah :

- Part yang dihasilkan sedikit sekali terbentuk *flaw* (salah satu cacat kristal).
- Dapat menghasilkan part dengan ketebalan yang lebih tipis jika dibandingkan dengan part yang dihasilkan dari proses *die casting*.
- Hasil coran berkualitas tinggi.
- Memungkinkan untuk membuat bentuk yang rumit.
- Akurasi dimensi baik.

Adapun kerugiannya yaitu sebagai berikut :

- Kecepatan produksi relatif rendah.
- Modal investasi tinggi (cetakan logam).