

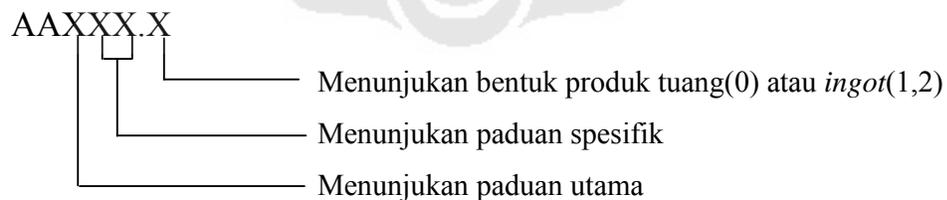
BAB II

DASAR TEORI

II.1 PADUAN ALUMINIUM TUANG

Lebih dari 100 komposisi paduan aluminium telah terdaftar pada *Aluminum Association*, dan lebih dari 300 jenis paduan aluminium telah digunakan di seluruh dunia^[3]. Paduan aluminium dikarakterisasikan memiliki berat jenis yang rendah yang nilainya bisa sedikit di atas atau di bawah dari aluminium murni tergantung dari elemen utama paduan. Keuntungan lainnya dari paduan aluminium tuang yaitu relatif memiliki temperatur lebur yang rendah, kelarutan gas lain bisa diabaikan kecuali gas hidrogen, mampu cor yang sangat baik terutama di dekat komposisi eutektik, kemampuan permesinan dan penyelesaian permukaan yang baik, ketahanan korosi yang baik, dan juga konduktifitas panas dan listrik yang baik. Paduan aluminium tuang mengalami penyusutan volume antara 3,5 % - 8,5 % pada proses pembekuan, keadaan inilah yang menjadikan kerugian utama dari aluminium tuang^[1].

Secara luas di Amerika, tatanama dari aluminium tuang menggunakan standar dari AA (*Aluminum Association*) walaupun tatanama ini tidak digunakan secara universal. Pada sistem tatanama ini terdapat 4 kode angka, dengan masing-masing kode angka menunjukkan^[3]:



Meskipun jenis paduan aluminium tuang jumlahnya sangat banyak, menurut tatanama ini dibagi menjadi 7 kelompok utama. Tabel 1.1 adalah sistem tatanama aluminium paduan berdasarkan unsur paduannya :

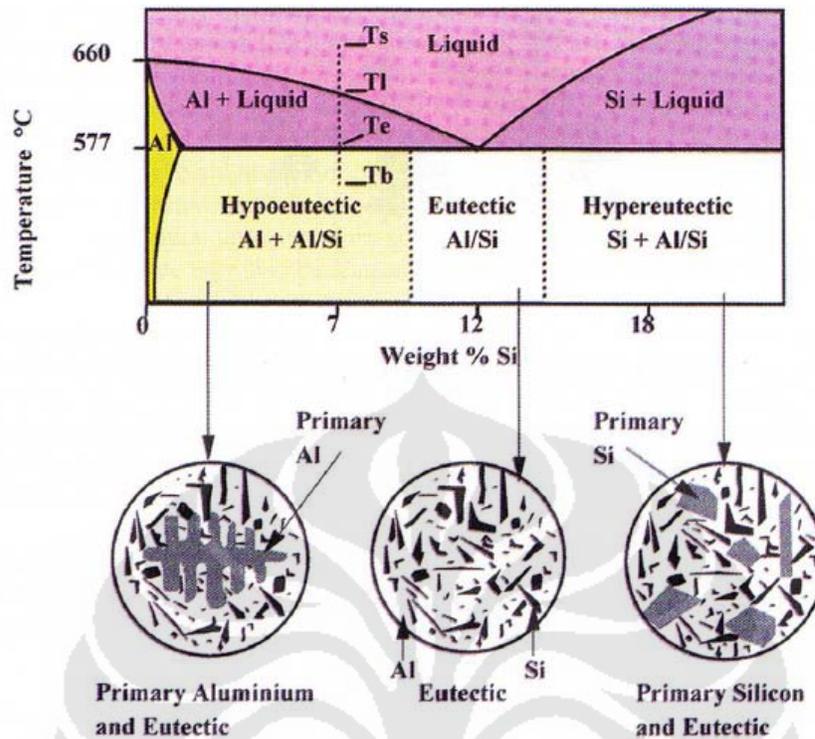
Tabel 2.1. Tatanama Paduan Aluminium Tuang^[3].

Seri	Jenis Paduan
1XX.X	Aluminium murni (99,00 % atau lebih besar)
2XX.X	Al-Cu
3XX.X	Al-Si + Cu, Al-Si + Mg
4XX.X	Al-Si
5XX.X	Al-Mg
7XX.X	Al-Zn
8XX.X	Al-Sn

II.2 PADUAN ALUMINIUM-SILIKON-TEMBAGA

Dari sekian banyak jenis paduan aluminium tuang yang digunakan salah satunya adalah aluminium dengan paduan utama silikon dan tembaga. Jumlah kandungan keduanya cukup banyak dalam paduan aluminium-silikon-tembaga. Unsur tembaga memberi kontribusi dalam meningkatkan kekuatan dan kemampuan permesinan, sedangkan unsur silikon meningkatkan kemampuan cor dan mengurangi *hot shortness*. Sistem paduan yang mengandung konsentrasi hipoeutektik silikon yang cukup tinggi secara normal cocok untuk pengecoran menggunakan cetakan permanen dan proses *die casting*. Paduan aluminium-silikon-tembaga dengan kandungan Cu kurang dari 5,6 % dapat diproses dengan perlakuan panas. Selain itu adanya unsur Mg juga penting pengaruhnya pada jenis paduan ini^[3].

Dari jenis paduan ini banyak diantaranya yang mengandung hipereutektik silikon (12 – 30 % Si) yang membentuk fasa silikon primer. Fasa silikon primer memberikan ketahanan aus yang sangat tinggi dan Cu memberikan kontribusi sebagai matriks penguat dan meningkatkan kekuatan temperatur tinggi^[3]. Gambar 2.1 di bawah ini menunjukkan diagram fasa *binary* dari Al-Si dan juga mikrostrukturnya. Sesuai diagram *binary* tersebut fasa eutektik 100 % terletak pada kandungan Si 12 %, sedangkan untuk fasa hipereutektik akan terbentuk silikon primer.



Gambar 2.1. Diagram fasa Al – Si dan mikrostrukturnya^[7].

Pada paduan aluminium-silikon-tembaga juga terdapat beberapa kandungan unsur lain dalam jumlah sedikit namun berpengaruh pada sifat paduan itu sendiri. Efek dari unsur paduan aluminium-silikon-tembaga adalah^[3]:

a. Silikon (Si)

Unsur ini memiliki efek yang sangat menonjol dalam paduan aluminium tuang terutama untuk meningkatkan karakteristik kemampuan cor, penambahan unsur ini dapat meningkatkan mampu alir dan ketahanan *hot tear*. Silikon juga memiliki berat jenis yang rendah dan mengurangi koefisien ekspansi panas. Jumlah penambahan unsur ini berhubungan dengan kecepatan pendinginan dan mampu alir, jadi jika penambahan unsur ini cukup banyak maka akan meningkatkan mampu alir sehingga kecepatan pendinginan harus ditingkatkan untuk mengurangi *shrinkage*. Maka untuk penambahan unsur Si lebih dari 8 % direkomendasikan untuk menggunakan proses *die casting*.

b. Besi (Fe)

Adanya unsur Fe dapat menurunkan keuletan dan ketahanan korosi. Fe dapat membentuk fasa tidak larut/intermetalik (FeAl_3 , FeMnAl_6 , dan αFeAlSi) yang dapat meningkatkan kekuatan. Namun juga sebagai mikrostruktur yang bersifat *embrittlement*. Unsur Fe dapat meningkatkan ketahanan terhadap *hot tear* dan juga mengurangi kecenderungan terjadi penempelan antara aluminium dengan cetakan.

c. Tembaga (Cu)

Salah satu unsur paduan utama, penambahan unsur ini dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan dalam kondisi setelah proses pengecoran ataupun proses perlakuan panas. Penambahan tembaga juga dapat meningkatkan ketahanan korosi dari aluminium.

d. Magnesium (Mg)

Merupakan salah satu paduan aluminium yang bisa dilakukan perlakuan panas. Unsur ini bersama dengan Si membentuk Fasa Mg_2Si adalah fasa penting yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan.

e. Mangan (Mn)

Pada paduan aluminium tuang, mangan termasuk kategori pengotor. Tetapi keberadaan Mn dalam jumlah kecil dapat meningkatkan kekuatan dengan unsur lainnya membentuk fasa intermetalik FeMnAl_6 .

f. Ni

Unsur ini biasanya digunakan bersama Cu untuk meningkatkan sifat paduan pada temperature tinggi, dan juga mengurangi koefisien ekspansi panas.

II.3 ALUMINIUM PADUAN AC4B

Standar aluminium paduan AC4B mengikuti tatanama dari JIS (*Japan Industrial Standard*) dan memiliki paduan setara dengan paduan 333.0 dalam tatanama standar dari AA (*Aluminum Association*). Jenis ini termasuk kedalam sistem Al-Si-Cu. Tabel 2.2. menunjukkan perbandingan unsur paduan antara AC4B dan paduan 333.0.

Tabel 2.2 Perbandingan Komposisi Kimia Antara AC4B dan Paduan 333.0^{[2][4]}.

Unsur Paduan	AC4B (wt. %)	Paduan 333.0 (wt. %)
Si	7,0 – 10,0	8,0 – 10,0
Fe	0,8 max	1,0
Cu	2,0 – 4,0	3,0 – 4,0
Mn	0,5 max	0,50
Mg	0,5 max	0,05 – 0,5
Ni	0,3 max	0,5.0
Zn	1 max	1,0
Ti	0,2 max	0,25
Pb	0,2 max	-
Sn	0,1 max	-
Cr	0,2 max	-

Kombinasi dari koefisien ekspansi yang rendah dan sifat mekanis yang baik membuat paduan ini sangat cocok untuk aplikasi di dunia otomotif seperti *gear blocks, pistons, cylinder head*. Paduan ini memiliki karakteristik mampu cor yang sangat baik. Berikut adalah karakteristik dari AC4B^[4]:

- **Kemampuan Cor**

Mampu alir baik, ketahanan *hot cracking* sangat baik, memiliki kecenderungan meningkatnya kecepatan pembekuan.

- **Kemampuan Permesinan**

Paduan ini memiliki kemampuan permesinan yang baik.

- **Kemampuan Las**

Paduan ini memiliki mampu las yang baik, pengelasan dengan metode gas, *arc*, dan tahanan. Namun paduan ini tidak dapat di *brazing*.

- **Ketahanan Korosi**

Paduan ini memiliki ketahanan korosi yang baik.

- **Perlakuan Panas**

Paduan ini dapat diproses perlakuan panas di antaranya yaitu O *Annealing*, T5 *Precipitation Treatment*, T6 *Solution Heat Treatment & Precipitation*, T7 *Solution Heat Treatment & Stabilization*.

- **Sifat Mekanis**

Sifat mekanis dari paduan ini ditunjukkan pada Tabel 2.3 di bawah ini :

Tabel 2.3 Sifat mekanis paduan AC4B/Paduan 333.0^[4].

Sifat Mekanis	Casting Process and Temper			
	P.M - F	P.M - T5	P.M - T6	P.M - T7
<i>Ultimate Strength</i> (ksi)	34	34	42	37
<i>Yield Strength</i> (set 0.2 %) (ksi)	19	25	30	28
<i>Elongation</i> (% in 2 in.)	2	1	1.5	2
<i>Shearing Strength</i> (ksi)	27	27	33	28
<i>Compressive Yield Strength</i> (set 0.2 %) (ksi)	19	25	30	28
<i>Brinell Hardness</i> (500 kg load on 10 mm ball)	90	100	105	90
<i>Endurance limit</i> (ksi)	14.5	12	15	12

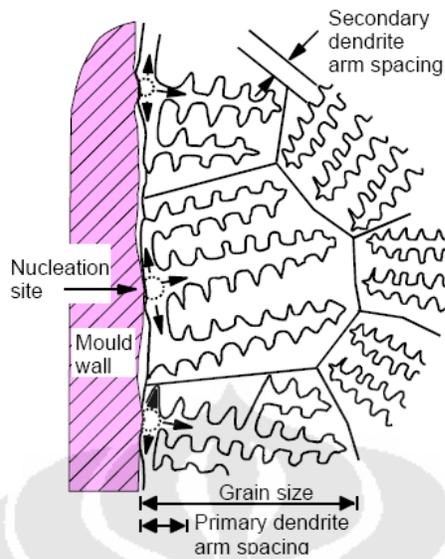
*P.M = Permanent Mold Casting, F = as-cast

II.4 PEMBEKUAN LOGAM

II.4.1 Proses Pembentukan *Dendrite*

Ukuran butir pada fasa tunggal suatu logam telah diketahui akan mempengaruhi sifat mekanis dari logam itu sendiri, misalnya kekuatan tarik, keuletan, ketahanan *fatigue*. Sifat dari paduan Al-Si tuang yang banyak mengandung fasa eutektik sangat bergantung pada ukuran butir. Ukuran butir selama proses pembekuan paduan aluminium tuang dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya yang paling berpengaruh adalah kecepatan pendinginan dengan catatan proses pengecoran tanpa penambahan penghalus butir dan *modifier*^[1].

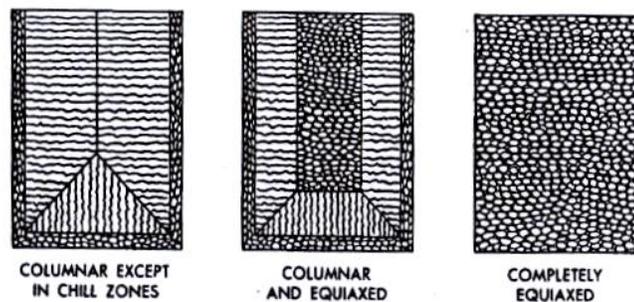
Di tiap butir terdapat kumpulan *dendrite* aluminium yang semuanya mula-mula berasal dari inti yang sama. *Dendrite* dalam inti yang sama tentunya memiliki arah orientasi kristalografi yang sama dan batas butir terbentuk jika ada kumpulan *dendrite* dengan orientasi kristalografi yang berbeda bertemu. Untuk lebih jelasnya kumpulan *dendrite* pada butir dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini^[5]. *Dendrite arm spacing* (DAS) atau jarak antar lengan *dendrite* ditentukan oleh kecepatan proses pendinginan, dengan pendinginan yang sangat lambat DAS yang dihasilkan akan menjadi lebih besar. Di antara lengan *dendrite* banyak terdapat fasa Si eutektik. Pada mikrostruktur paduan aluminium tuang terdapat tiga bagian dengan tiga ukuran berbeda. Butir paduan aluminium tuang umumnya memiliki ukuran 1-10 mm, nilai DAS bervariasi dari 10-150 μm , dan Si eutektik memiliki panjang 2 mm atau dalam bentuk bulatan memiliki diameter kurang dari 1 μm ^[1].



Gambar 2.2. Formasi pembentukan *dendrite*^[5].

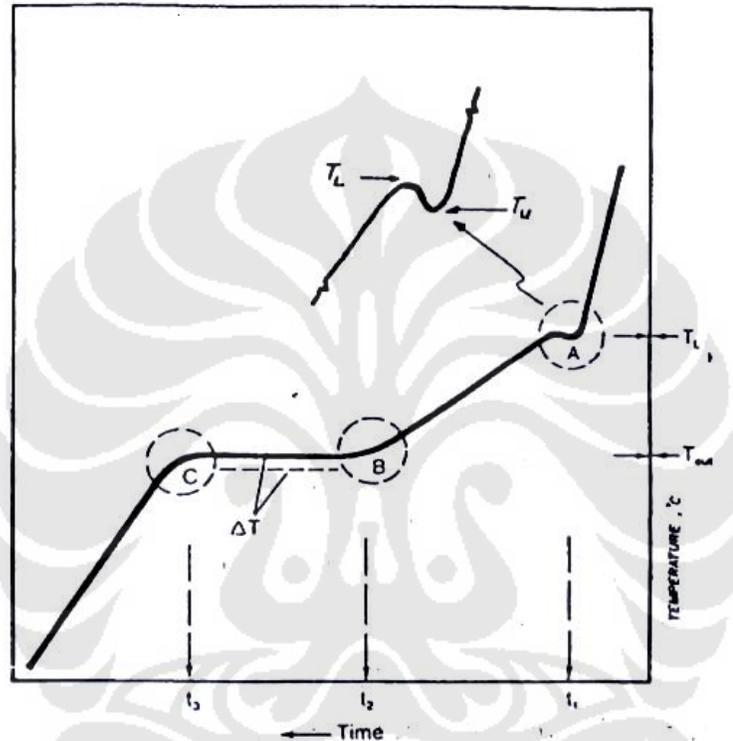
II.4.2 Proses Pembekuan Logam

Paduan Al seperti kebanyakan paduan logam ringan yang lain, secara normal akan memiliki struktur butir yang kasar, yaitu butir kristal *equiaxed* dan *columnar* selama proses pembekuan (Gambar 2.3). Tingkat kekasaran atau panjang dari kristal *columnar* tergantung dari temperatur penuangan. Paduan yang memiliki kelarutan tinggi dalam aluminium (Cu, Mg, Zn) secara alami membentuk fasa padat yang halus, yaitu butir dengan struktur *equiaxed* yang berukuran kecil, dibandingkan dengan paduan yang memiliki kelarutan kurang seperti Si. Jadi paduan aluminium Al-Cu (A2xx.x) lebih mudah membentuk butir yang halus dari pada aluminium yang mengandung Si dalam jumlah yang banyak^[4].



Gambar 2.3. Struktur butir pada aluminium tuang^[4].

Gambar 2.4 merupakan kurva proses pendinginan paduan Al-Si tuang. Kurva di bawah ini dibagi menjadi 3 bagian : A, B, dan C. Temperatur *liquidus* ditunjukkan oleh T_L dan temperatur *undercooling* ditunjukkan oleh T_U ; pada waktu t_1 , proses pembekuan dimulai. Pada bagian A jika penghalus butir tidak digunakan, larutan akan tetap menjadi cair dengan temperatur di bawah titik temperatur *liquidus*, karena pengintian dari fasa padat belum terjadi^[4].



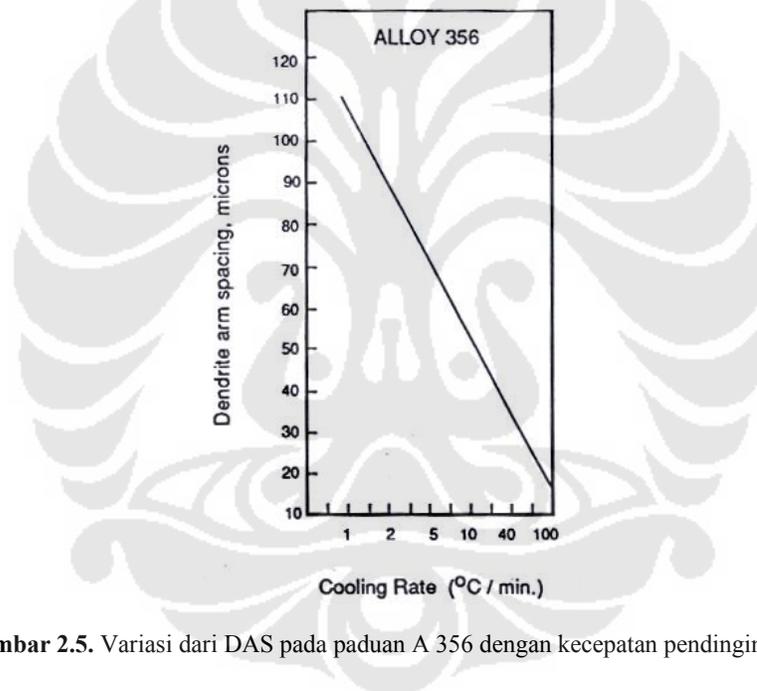
Gambar 2.4. Kurva pendinginan yang dihasilkan selama analisis *thermal*^[4].

Antara bagian A dan B, yaitu antara jarak t_1 dan t_2 , pada bagian ini fasa padat telah terbentuk dan berdampingan dengan fasa *liquid*, fasa *liquid* mengelilingi jaringan *dendritic* padat. Pembentukan fasa eutektik terjadi antara t_2 dan t_3 dengan temperatur yang konstan. Jika leburan tidak dimodifikasi (dengan penambahan Na atau Sr) akan menghasilkan fasa eutektik yang kasar. Jika leburan dimodifikasi akan menghasilkan fasa *dendrite* padat yang halus^[4].

Kurva pendinginan juga mengindikasikan tingkat modifikasi pada larutan. Jika tidak dimodifikasi garis pembentukan fasa padat antara waktu t_2 dan t_3 pada kurva pendinginan tidak akan terjadi. Setelah titik C terlewati terjadi proses

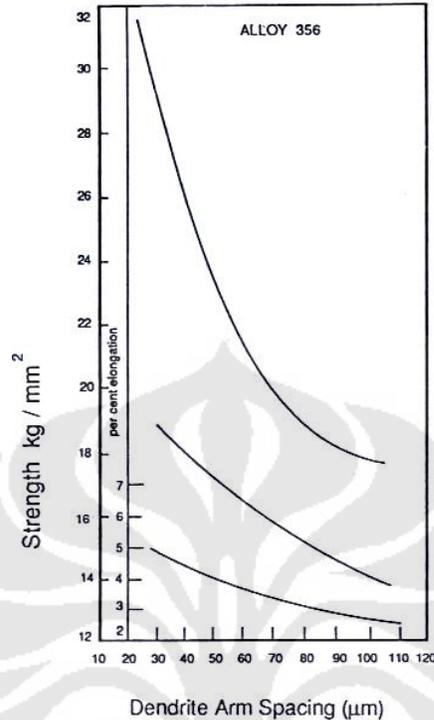
pembekuan fasa yang tidak terlarut membentuk fasa intermetalik (seperti Mg_2Si dan $CuAl_2$)^[4].

Dengan meningkatkan kecepatan pendinginan, ukuran dari sel *dendrite* (bentuk dan cabangnya) dan DAS akan berkurang (Gambar 2.5). Untuk meningkatkan kecepatan pembekuan secara progresif bisa dilakukan dari *sand casting* menjadi *permanent mold casting* atau *die casting*. Ukuran butir juga cenderung berkurang dengan meningkatnya kecepatan pembekuan. Ukuran butir sendiri tidak selalu menggambarkan kecepatan pembekuan sejak digunakannya penghalus butir yang akan meningkatkan jumlah inti pada proses pembekuan terjadi^[4].



Gambar 2.5. Variasi dari DAS pada paduan A 356 dengan kecepatan pendinginan^[1].

DAS jauh lebih penting dalam menentukan sifat mekanis dari suatu paduan dengan banyak jenis fasa seperti keluarga dari paduan Al-Si tuang. Beberapa tipikal sifat mekanis sebagai fungsi dari DAS dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.6, DAS yang kecil disebabkan oleh pembekuan yang sangat cepat yang biasanya diikuti oleh ukuran butir yang halus. Jadi pendinginan yang sangat cepat sangat diperlukan untuk menghasilkan DAS yang kecil yang akhirnya akan didapat sifat mekanis yang baik dan ukuran butir itu sendiri bukan faktor utama dalam menentukan sifat mekanis paduan^[1].



Gambar 2.6. Variasi dari beberapa sifat kekuatan tarik dari paduan A.356 dengan DAS^[1].

II.4.3 Proses Pembentukan Fasa Intermetalik

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

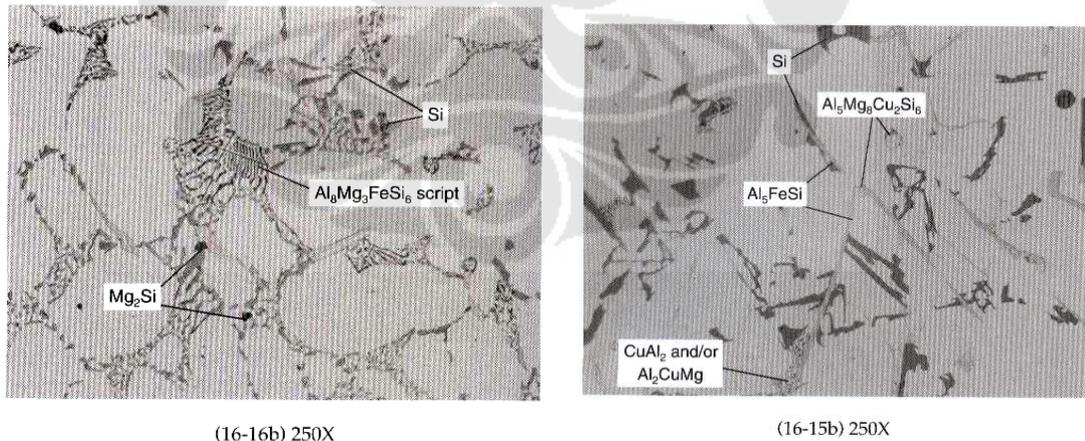
Pada reaksi pembekuan paduan Al – Si hipoeutektik dan eutektik terjadi beberapa mekanisme pengendapan fasa, yaitu^[8]:

- Pembentukan jaringan dendritik α -aluminium
- Reaksi eutektik Al-Si
- Pengendapan fasa kedua eutektik seperti Mg_2Si dan Al_2Cu

Sebagai tambahan dari reaksi utama di atas terjadi juga pengendapan fasa yang mengandung Mn dan Fe. Fasa yang paling sering muncul pada paduan Al-Si adalah fasa Al_3FeSi dan $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$. dan selanjutnya pada tahap terakhir proses pembekuan terjadi pengendapan fasa Mg_2Si dan Al_2Cu ^[8].

Seperti tertulis pada bagian sebelumnya mengenai pengaruh paduan terhadap sifat mekanis, jenis paduan Fe dan Mn memegang peranan penting dalam meningkatkan sifat mekanis yang didasarkan pada struktur mikro. Keberadaan Fe dalam 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 permesinan. Fasa metalik α -aluminium lebih mudah tumbuh dibandingkan dengan kristal silikon dan fasa intermetalik lainnya. Namun di antara fasa intermetalik, terdapat perbedaan kecepatan pertumbuhan, di mana fasa $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ lebih mudah tumbuh dibandingkan fasa Al_5FeSi sehingga fasa ini lebih mendominasi pada saat pembekuan cepat^[8].

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 secara merata. Gambar 2.7 di bawah ini menunjukkan beberapa morfologi fasa intermetalik pada paduan aluminium^[8].

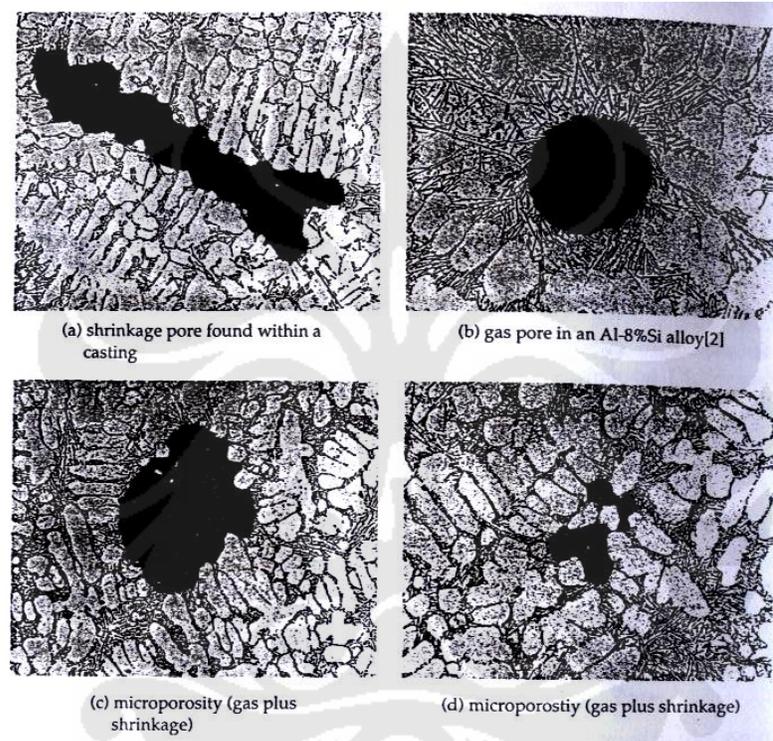


Gambar 2.7. Mikrostruktur secara umum fasa intermetalik pada paduan aluminium^[4].

II.4.4 Cacat yang Terbentuk Selama Proses Pembekuan

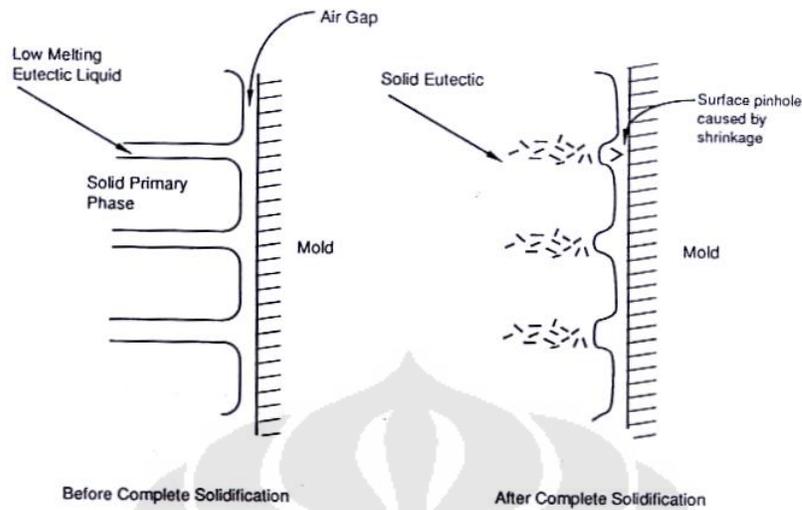
Porositas adalah salah satu cacat yang sering terjadi pada produk aluminium tuang, dan akan menjadi awal suatu produk dikatakan gagal. Porositas

pada aluminium tuang ada dua jenis yaitu yang berasal dari *shrinkage* dan gas. Namun pada kebanyakan kasus porositas terjadi adalah kombinasi dari keduanya, yaitu akibat *shrinkage* dan juga gas yang terperangkap selama proses pembekuan. Hanya sedikit kasus di mana porositas karena *shrinkage* murni atau karena gas murni dapat diidentifikasi. Gambar 2.8 menunjukkan berbagai tipikal porositas yang terjadi pada paduan aluminium^[1].

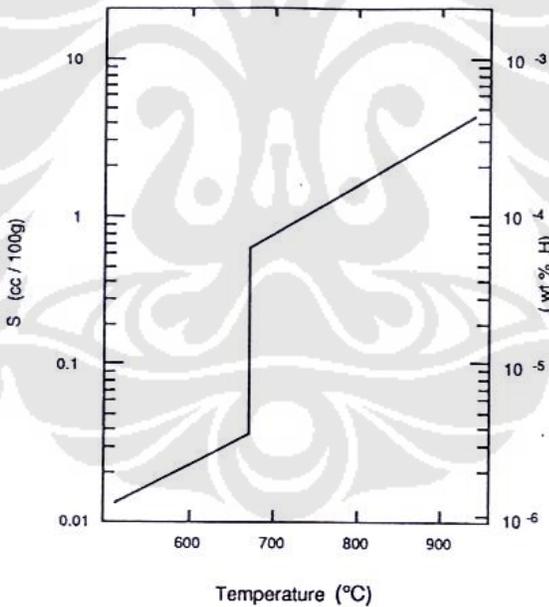


Gambar 2.8. Bentuk porositas pada paduan aluminium tuang^[1].

Porositas akibat *shrinkage* biasanya terbentuk pada bagian saluran masuk logam cair atau juga terjadi pada bagian penambah (*riser*), atau dapat juga terjadi pada bagian permukaan yang berdekatan dengan cetakan. Selama proses pembekuan yang cukup lama, sesuai arah pembekuan yang bermula dari bagian paling dekat dengan cetakan yang kemudian pada saat fasa *liquid* mulai membeku dan menyusut ke arah dalam sehingga pada bagian permukaan meninggalkan porositas yang disebut *pinhole*, proses ini ditunjukkan oleh Gambar 2.9^[1].



Gambar 2.9. Kemungkinan mekanisme *shrinkage* dalam membentuk formasi dari porositas *pinhole* di permukaan^[1].

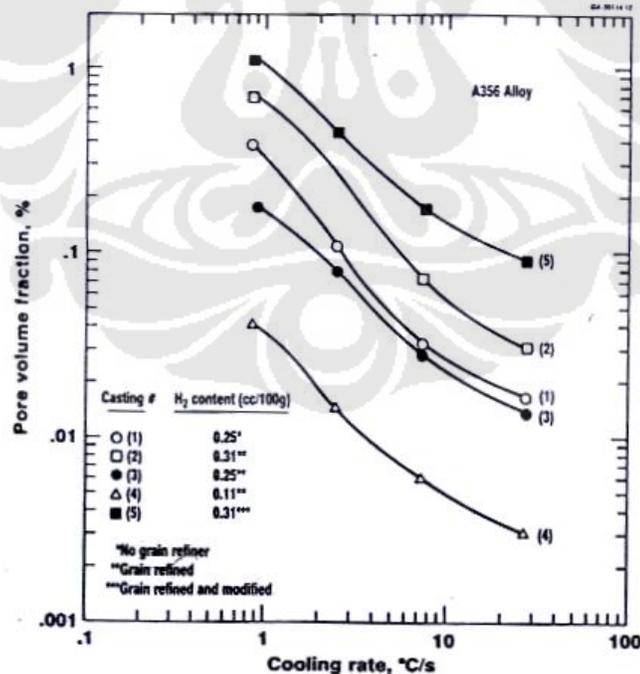


Gambar 2.10. Kelarutan dari gas hidrogen pada tekanan 1 atm dalam aluminium murni^[1].

Porositas juga bisa disebabkan oleh gas yang terperangkap pada saat pembentukan fasa padat. Gas hidrogen merupakan gas yang sangat mendominasi karena kelarutannya yang sangat tinggi dalam larutan aluminium, terutama pada suhu melewati 600° C, kelarutan gas hidrogen pada aluminium murni dengan tekanan 1 atm ditunjukkan oleh Gambar 2.10. Untuk kasus ini banyak metode

untuk mengontrol kelarutan gas yang tinggi pada larutan aluminium seperti seperti proses *degassing* yang berguna untuk menghilangkan gas hidrogen dari larutan aluminium sampai serendah mungkin. Seperti yang disebutkan di atas bahwa porositas yang sering terjadi adalah kombinasi dari akibat dari gas dan *shrinkage*. Porositas yang ditimbulkan keduanya terjadi pada wilayah *interdendritic* yaitu pada bagian yang mengalami pembekuan terakhir^[1].

Dengan meningkatkan kecepatan pembekuan akan memberikan efek mengurangi total jumlah porositas dan rata – rata ukuran porositas. Dengan meningkatkan kecepatan pembekuan (Gambar 2.11) maka hanya sedikit waktu yang tersedia oleh hidrogen untuk berdifusi ke dalam ruang *interdendritic*. Seperti pada konsep pertumbuhan inti maka untuk gas hidrogen juga sama, jika kecepatan pembekuan meningkat akan menyebabkan waktu untuk gas hidrogen berdifusi dan membesar menjadi lebih sedikit sehingga akhirnya akan menghasilkan ukuran porositas yang kecil^[1].



Gambar 2.11. Fraksi volume porositas sebagai fungsi dari kecepatan pendinginan pada paduan A356.0^[1].

II.5 PENGHALUS BUTIR

II.5.1 Titanium dan Titanium - Boron Sebagai Penghalus Butir

Penghalus butir yang ditambahkan pada paduan Al yaitu 0,02 – 0,15 % Ti atau pada Ti – B campuran dalam rentang 0,01 – 0,03 % Ti dan 0,01 % B. Titanium dan boron ditambahkan dalam bentuk *ingot* atau campuran garam. Penambahan Ti saja sebagai penghalus butir masih mungkin dilakukan, namun bagaimanapun keberadaan unsur boron akan membuat Ti lebih efektif sebagai awal pembentukan inti^[1].

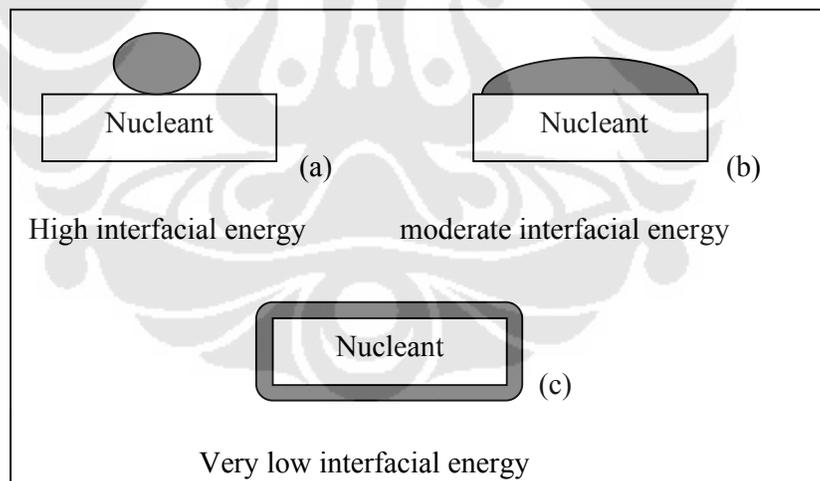
Material dalam bentuk serbuk (dalam campuran garam) digunakan sebagai penghalus butir pada paduan aluminium tuang. Beberapa industri pengecoran lebih suka menggunakan dalam bentuk serbuk karena memiliki keunggulan seperti memberikan keseragaman dari penghalus butir lebih baik, membutuhkan tenaga kerja yang lebih sedikit, dapat ditambahkan pada kondisi temperatur rendah. Penghalus butir dalam bentuk serbuk biasanya digunakan dengan kandungan titanium, boron, atau kombinasi dari keduanya akan memberikan hasil yang lebih efektif. Kombinasi dari campuran garam, seperti *potassium fluorotitanate* dan *potassium fluoroborate*, digunakan sebagai media oleh titanium dan boron pada cairan paduan aluminium tuang^[4].

II.5.2 Prinsip dari Penghalus Butir

Ukuran butir pada paduan aluminium tuang berbanding terbalik dengan jumlah inti yang dihasilkan dalam larutan selama proses pembekuan. Dengan banyaknya inti akan memungkinkan lebih banyak butir terbentuk, dan menghasilkan butir dengan ukuran kecil. Dalam proses pengintian butir, setidaknya dibutuhkan waktu tertentu untuk menjadi aktif dalam fasa *liquid*. Kombinasi yang paling baik adalah banyaknya jumlah inti dengan proses pembekuan berjalan lambat, jadi inti memiliki jangka waktu yang cukup untuk tumbuh^[1]. Selang waktu di sini diperlukan agar inti memiliki ukuran minimum yang harus dibentuk pada *liquid* sebelum fasa padat terbentuk dan inti mulai tumbuh^[6].

Tidak semua partikel pada larutan logam efektif sebagai inti, menurut penelitian oleh Mondolfo^[1] energi *interfacial* antara *nucleant* (inti) dan *nucleus*

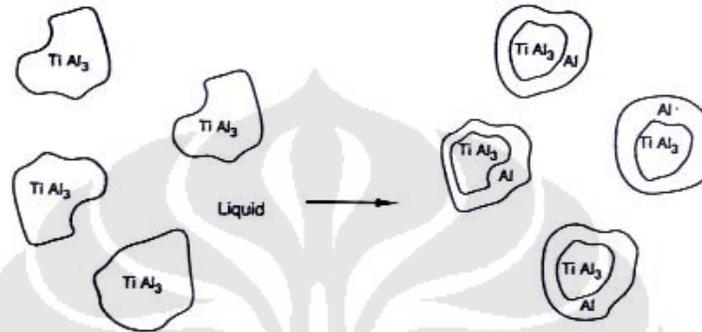
(material yang mengalami pembekuan), sangat penting. Energi *interfacial* antara *nucleant* (inti) dan *nucleus* yang sangat rendah membuat proses pengintian menjadi efektif. Kemungkinan terjadinya proses tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.12 di bawah ini. Kondisi (c) merupakan kondisi yang optimum, jadi energi *interfacial* antara *nucleant* dan *nucleus* sangat rendah sehingga memungkinkan *nucleus* untuk menyelimuti *nucleant*. Energi *interfacial* yang sangat rendah akan terjadi apabila struktur kristal antara *nucleant* dan *nucleus* sama. Jadi bidang atom pada kisi kristal inti serupa dengan bidang atom pada kisi kristal yang diintikan. Partikel yang memiliki struktur kristalografi yang serupa dengan aluminium akan menjadi inti yang efektif tanpa membutuhkan temperatur *undercooling* yang tinggi, sedangkan partikel yang tidak memiliki kemiripan struktur kristalografi akan membutuhkan temperatur *undercooling* yang lebih tinggi untuk menjadi inti yang efektif^[1]. Temperatur *undercooling* adalah temperatur di mana logam *liquid* harus dingin di bawah kesetimbangan temperatur pembekuan sebelum pengintian terjadi^[6].



Gambar 2.12. Efek dari energi *interfacial* pada geometri dari sebuah *nucleus* yang tumbuh pada *nucleant*^[1].

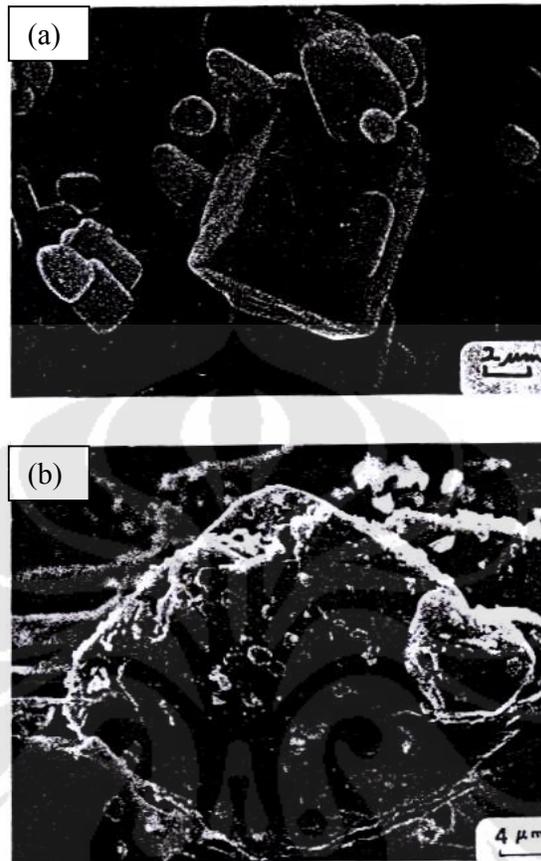
Seperti disebutkan sebelumnya paduan aluminium dihaluskan butirnya dengan penambahan Ti atau campuran dari Ti-B. Al-Ti *master alloy* yang ditambahkan pada larutan aluminium memiliki fasa intermetalik $TiAl_3$. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa antara $TiAl_3$ dan aluminium memiliki energi

interfacial yang rendah karena keduanya memiliki struktur kristal yang serupa. Oleh karena itu $TiAl_3$ akan menjadi inti yang efektif untuk aluminium. Partikel dari $TiAl_3$ yang diselimuti fasa padat aluminium diilustrasikan pada Gambar 2.13 dan nantinya $TiAl_3$ akan menjadi awal pembentukan inti yang kemudian akan menjadi tempat pertumbuhan dari butir aluminium^[1].



Gambar 2.13. Pengintian oleh reaksi *peritectic* pada sistem Al-Ti^[1].

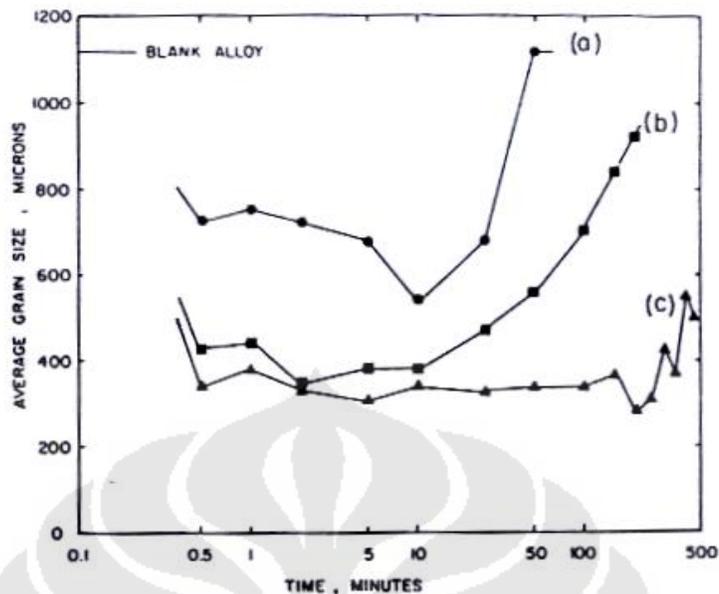
Hasil akhir dari ukuran butir paduan aluminium tuang berhubungan dengan mikrostruktur dari *master alloy* yang ditambahkan. Paduan Al-Ti yang mengandung banyak fasa $TiAl_3$ berukuran kecil lebih baik sebagai penghalus butir dari pada yang mengandung sedikit fasa $TiAl_3$ namun berukuran besar^[1]. Dengan penggunaan campuran Ti-B selain fasa $TiAl_3$ maka juga ada fasa TiB_2 yang akan membuat $TiAl_3$ akan bekerja sebagai penghalus butir lebih efektif, namun masih diperdebatkan bagaimana tepatnya mekanisme pengintian terjadi dengan penambahan partikel ini ke dalam larutan aluminium. Beberapa menyebutkan bahwa mekanisme pengintian aluminium pada lapisan $TiAl_3$ akan distabilkan oleh partikel TiB_2 ^[7]. Kemampuan dari penghalus butir juga tergantung dari morfologi dari fasa intermetalik di dalamnya. Gambar 2.14 merupakan hasil penelitian Guzowski *et al*^[1], mengilustrasikan jenis morfologi yang ada pada penghalus butir sistem Al-Ti-B. Penghalus butir yang buruk mengandung kristal $TiAl_3$ yang berbentuk blok atau balok (Gambar2.14a). Sedangkan penghalus butir yang baik adalah mengandung fasa intermetalik *duplex* (Gambar2.14b), yang terdiri dari partikel $TiAl_3$ yang permukaannya dilapisi oleh partikel *boride* yang kecil, kemungkinan adalah TiB_2 atau $(Ti,Al)B_2$ ^[1].



Gambar 2.14. Morfologi dari beberapa fasa intermetalik yang ditemukan pada penghalus butir Al-Ti-B: tipe blok $TiAl_3$ (a); *duplex* intermetalik terdiri dari $TiAl_3$ diselimuti dengan *borides*(b)^[1].

II.5.3 Proses *Fading* pada Penghalus Butir

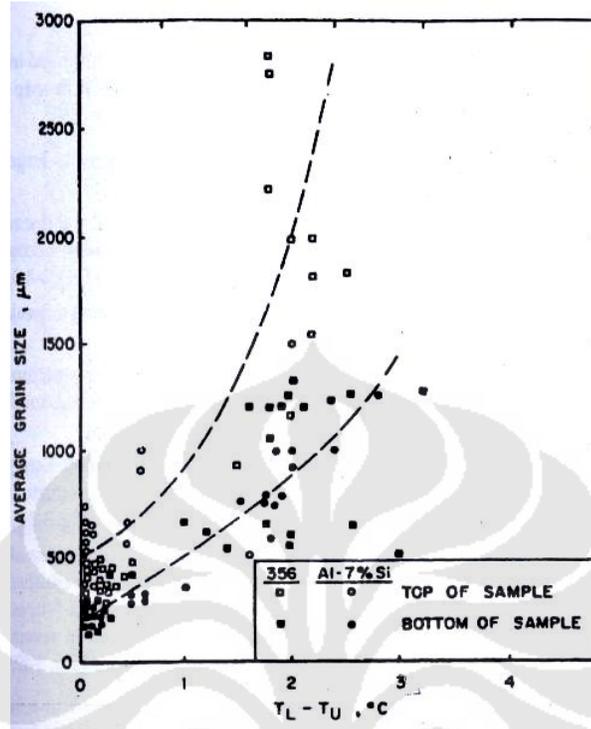
Kemampuan penghalus butir juga akan semakin berkurang seiring dengan berjalannya waktu. Proses ini dikenal sebagai proses *fading*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.15 kurva (a) menunjukkan hasil rata – rata dari ukuran butir sebagai hasil dari penambahan Al-Ti *master alloy*, mengindikasikan bahwa setelah 40 menit waktu tahan ukuran butir akan kembali. Gambar tersebut juga menunjukkan jika Ti dikombinasikan dengan B tidak hanya ukuran butir yang menjadi lebih halus namun juga waktu *fading* juga menjadi lebih lama.^[1]



Gambar 2.15. *Fading* pada logam 99.7 % Al yang ditambahkan penghalus butir 0,01 wt. % Ti dalam bentuk^[1]: (a) 5,35 % Ti *master alloy* ; (b) 5,4 % Ti-0,034 % B *master alloy* ; (c) 5,35 % Ti-0,2 % B *master alloy*.

II.5.4 Pengaruh Penambahan Penghalus Butir Terhadap Pembekuan Logam

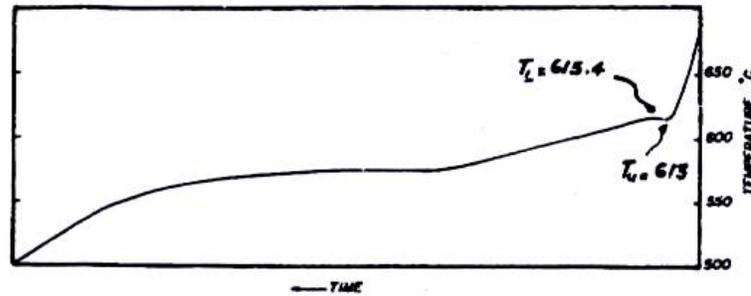
Penambahan penghalus butir adalah salah satu cara yang dilakukan untuk merubah struktur logam tuang menjadi lebih halus, atau membentuk butir kristal *equiaxed* selama proses pembekuan. Menurut penelitian yang ada menyebutkan bahwa jika temperatur ($T_L - T_U$) besar ; maka relatif akan menghasilkan butir yang besar. Namun ketika temperatur ($T_L - T_U$) kurang dari 0.5 °F (0,3 °C), maka tidak akan ada rintangan untuk terjadinya pengintian dan akhirnya ukuran butir relatif halus. Gambar 2.16 menunjukan rata – rata ukuran butir yang dihasilkan pada sampel aluminium tuang dari A356.0 dan Al-7 % Si memiliki jumlah kandungan penghalus butir yang berbeda (Al-5Ti-B *master alloy*) melalui analisis *thermal* kurva bagian bawah menjelaskan perhitungan ukuran butir pada dasar permukaan dari sampel yang mengalami pendinginan cepat. Pada kurva bagian atas menunjukan perhitungan ukuran butir pada bagian atas permukaan dari sampel. Data yang dihasilkan dari bagian atas sampel dilakukan dengan proses *sand casting* dan data yang dihasilkan dari bagian dasar permukaan dilakukan dengan *permanent mold casting*^[4].



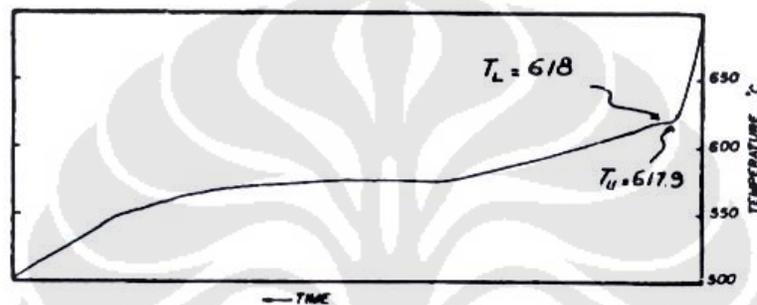
Gambar 2.16. Rata – rata ukuran butir sebagai fungsi dari perubahan temperatur ($T_L - T_U$) dilakukan dengan analisis *thermal* kurva pendinginan dari paduan A356.0 dan Al-7 % Si. T_L adalah temperatur *liquidus* dan T_U adalah temperatur *undercooling*^[4].

Memang beralasan adanya penambahan penghalus butir memberikan kontribusi pada saat pengintian selama proses pembekuan, yang akan mengontrol bentuk struktur dari butir. Dengan temperatur ($T_L - T_U$) yang kecil, akan menghasilkan ukuran butir yang halus pada proses pembekuan.

Gambar 2.17 dan 2.18 menunjukkan kurva analisis *thermal* untuk 2 larutan yang berbeda. Gambar 2.17 menunjukkan analisis *thermal* untuk larutan tanpa penambahan penghalus butir dan Gambar 2.18 menunjukkan analisis *thermal* untuk larutan dengan penambahan penghalus butir. Terlihat jelas bahwa larutan dengan penambahan penghalus butir dapat mengurangi temperatur ($T_L - T_U$) dari 2,4 °C menjadi hanya 0,1 °C^[4].



Gambar 2.17. Analisis *thermal* kurva pendinginan dari paduan A356.0 yang tidak menggunakan penghalus butir^[4].



Gambar 2.18. Analisis *thermal* kurva pendinginan dari paduan A356.0 yang menggunakan penghalus butir^[4].

II.5.5 Pengaruh Penghalus Butir pada Sifat Paduan Aluminium Tuang

Penghalusan butir memberikan pengaruh yang positif pada beberapa sifat paduan aluminium tuang, khususnya pada kecenderungan *hot tearing* dan distribusi porositas dan *shrinkage*. Beberapa keuntungannya meliputi :

- Mengurangi *hot tearing*
Butir yang besar lebih cenderung menyebabkan *hot tearing* selama proses pembekuan karena mereka akan membentuk daerah *strain* lokal lebih banyak. Dengan ukuran butir yang kecil juga cenderung mencegah *crack* kontraksi garis rambut pada paduan larutan padat.
- Distribusi porositas dan *shrinkage*.
Ketika penghalus butir digunakan mungkin mengurangi jumlah porositas, penambahan penghalus butir memiliki keunggulan utama yaitu dapat memproduksi distribusi porositas yang baik secara seragam.
- Distribusi intermetalik

Pada paduan yang mengandung fasa eutektik dengan jumlah yang banyak, seperti Al-Si, tidak diharapkan bahwa penghalus butir akan mempengaruhi distribusi fasa intermetalik. Di sana ditemukan ruang *interdendritic* oleh karena itu DAS lebih penting dari pada ukuran butir.

- Sifat mekanik

Sifat seperti kekuatan tarik dan elongasi biasanya meningkat dengan adanya penghalusan butir. Pada paduan Al-Si yang utama adalah meningkatkan distribusi porositas dari pada mengurangi ukuran butir. Sifat dari paduan ini dikontrol oleh fasa eutektik dan beberapa pengaruh dari ukuran butir.

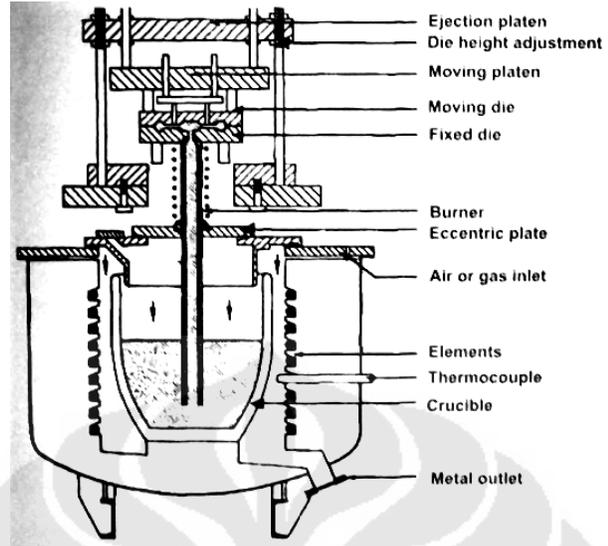
II.6 LOW PRESSURE DIE CASTING (LPDC)

Pada proses ini, cetakan permanen diletakkan di atas furnace yang tertutup (Gambar 2.19). Sebuah tabung menghubungkan antara lubang cetakan dengan logam cair di bawahnya. Tekanan diberikan pada furnace sehingga logam cair naik dan mengisi cetakan. Ketika logam membeku maka tekanan dapat dilepaskan dan cetakan dapat dibuka untuk mengambil hasil coran. Skematis dari mesin LPDC dapat dilihat pada Gambar 2.19^[3].

Parameter proses dari LPDC ini antara lain :

- Kecepatan tekanan
- Besar tekanan
- Perbedaan suhu antara cetakan dengan logam cair

Proses LPDC ini langsung membawa logam cair kedalam cetakan dan tidak memerlukan riser sebagai transfer *shrinkage*, sehingga *yield* dari proses ini sangat tinggi dan proses mesin sangat sedikit dilakukan. Resiko adanya kontaminasi material cukup besar pada metode ini, pada saat hasil coran diambil, maka tekanan dilepaskan. Pada saat itu logam cair yang berada pada tabung akan kembali turun kedalam *furnace*. Siklus naik turunnya logam cair ini dapat membuat oksida – oksida semakin banyak dan dapat menyumbat tabung. Solusinya adalah dengan menggunakan tekanan balik pada sistem agar logam cair tidak kembali turun pada saat tekanan dilepaskan. Filtrasi juga sering dilakukan agar hasil coran tidak terkontaminasi^[3].



Gambar 2.19. Skematis mesin LPDC^[3].