

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium Secara Umum

Aluminium pertama kali ditemukan sebagai suatu unsur pada tahun 1809 oleh Sir Humphrey Davy. Beberapa tahun sesudahnya, yaitu pada tahun 1886 secara bersamaan Paul Heroult dari Perancis dan Charles Martin Hall dari Ohio memperoleh logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa^[7].

Aluminium pada saat ini telah menempati peranan penting dalam industri manufaktur dunia. Industri otomotif, sebagai contoh penggunaan aluminium menduduki peringkat kedua untuk logam setelah besi dan baja. Produksi tahunnya di dunia mencapai 15 juta ton per tahun pada tahun 1981^[7]. Hal ini didasarkan karena salah satu sifat mekanik aluminium yaitu massa jenisnya yang hanya $\pm 2.79 \text{ g/cm}^3$ ^[5]. Oleh karena sifatnya yang sangat ringan tersebut disukai dalam industri otomotif.

Proses manufakturnya pun tidak terlalu sulit. Aluminium mempunyai titik lebur $\pm 660 \text{ }^\circ\text{C}$ membuat 80 % proses manufakturnya menggunakan proses pengecoran^[6]. Selain ringan, sifat-sifat mekanisnya yang lain seperti sifat mampu cor, mampu permesinan, ketahanan terhadap korosi, konduktivitas panas dan kelistrikan serta sifat mampu lasnya dapat ditingkatkan dengan pepaduan dengan unsur-unsur lain seperti Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni dan sebagainya secara satu persatu atau bersama-sama^[7]. Selain pepaduan tersebut, kualitas aluminium hasil pengecoran juga dapat dimodifikasi menjadi lebih baik lagi dengan metode pemodifikasian (*modifier*), penghalusan butir (*grain refinement*) atau bahkan dengan metode perlakuan panas (*heat treatment*).

2.2 Sistem Penamaan Aluminium dan Paduannya

Secara garis besarnya, aluminium digolongkan atas 2 kelas yaitu kelas aluminium tempa (*wrought aluminum*) dan aluminium tuang (*cast aluminum*). Kedua kelas tersebut disusun berdasarkan standar *Aluminium Association* (AA). Khusus untuk jenis aluminium tuang, sistem penamaan aluminium berdasarkan standar AA dibagi

lagi atas 8 kelas dimana kelas-kelas tersebut disusun berdasarkan unsur paduan utama yang digunakan. Sistem tata nama ini menggunakan sistem digit 4 angka, seperti pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Klasifikasi Aluminium tuang (*cast aluminum*) sesuai standar AA ^[8]

Kelas	Unsur paduan utama
1xx.x	Aluminium murni (99.00 % atau lebih)
2xx.x	Al-Cu alloy
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 dengan unsur-unsur lain

Pada kelas 1xx.x, digit kedua dan ketiga mengindikasikan kadar minimum aluminium yang terdapat didalamnya dimana kedua digit tersebut merupakan perlambangan dari 0.01% Al. Sebagai contoh, penamaan Al paduan 170.0 mengandung $99\% \text{ Al} + (0.01\% \times 70) \text{ Al} = 99.70\% \text{ Al}$. Sedangkan pada kelas 2xx.x sampai dengan kelas 8xx.x, digit kedua dan ketiga tidak terlalu signifikan perannya hanya untuk mengidentifikasi paduan dalam groupnya. Untuk semua kelas, digit terakhir menentukan bentuk produknya yaitu 0 untuk spesifikasi produk hasil pengecoran, 1 untuk spesifikasi bentuk produk *ingot* sesuai standar dan 2 untuk spesifikasi produk *ingot* dengan *range* komposisi yang lebih sempit dari standarnya.

Sistem penamaan sesuai standar AA ini hanya berlaku di negara Amerika bagian utara dan sekitarnya. Biasanya untuk negara-negara lain, sistem penamaan disesuaikan dengan standar yang berlaku di negara tersebut ^[8].

2.3 Paduan AC4B

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, standar dan sistem penamaan untuk aluminium terutama aluminium tuang berbeda dari satu wilayah terhadap wilayah lainnya. Jika wilayah Amerika Utara dan sekitarnya menggunakan standar penamaan sesuai yang ditetapkan oleh AA maka untuk wilayah Jepang dan sekitarnya, sistem tata nama untuk penggolongan aluminium menggunakan standar *Japan International*

Standar (JIS). Namun walaupun terdapat perbedaan antara standar JIS dan AA, masih dapat ditemukan korelasi antar standar tersebut.

Aluminium jenis AC4B sesuai standar JIS memiliki komposisi kimia sebagai berikut ^[9] :

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Al seri AC4B

Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
2-4	7-10	0.5 %	1 %	0.8	0.5	0.35	0.2	0.2	0.1	0.2	sisa
%	%	max	max	%	%	%	%	%	%	%	
				max	max	max	max	max	max	max	

Berdasarkan tabel komposisi diatas, aluminium jenis ini memiliki unsur paduan utama silikon (Si) dan tembaga (Cu). Sehingga, jika dikorelasikan kedalam standar AA, maka aluminium jenis AC4B dapat dimasukkan kedalam kelas paduan aluminium Al-Si-Cu (kelas 3xx.x). Untuk lebih spesifiknya, dengan komposisi kimia sesuai tabel diatas, maka paduan aluminium AC4B bisa disesuaikan dengan paduan Aluminium 333.0 sesuai standar AA yang memiliki komposisi kimia seperti pada tabel berikut ^[9] :

Tabel 2.3 Komposisi Kimia Al seri 333.0

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Unsur lain	Al
8-10%	1% max	3-4%	0.5%	0.05- 0.5%	0	0.5%	1% max	0.25%	0.5%	Sisa

Paduan aluminium tuang AC4B memiliki beberapa kelebihan yaitu kekuatan dan kekerasan yang baik, sifat mampu cor (*castability*) yang baik, sifat mampu las yang baik dan juga paduan ini dapat dilakukan perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Oleh karena itu, jenis paduan ini cocok untuk diaplikasikan dalam dunia otomotif yang membutuhkan keseimbangan antara sifat kekuatan dan kekerasan serta konduktivitas panas yang baik seperti *crankcases*, *cylinder head*, *air compressor*, dan piston ^[8] .

2.4 Paduan Al-Si-Cu

Paduan Al-Si-Cu adalah jenis paduan yang paling umum digunakan dalam proses pengecoran aluminium. Kadar Si dan Cu dalam paduan ini sangat bervariasi, tetapi umumnya untuk jenis AC4B, Si memiliki kadar yang lebih besar ($\pm 10-12\%$) daripada kadar Cu ($\pm 2-4\%$)^[9]. Pada paduan ini, Cu mempengaruhi paduan dalam hal peningkatan kekuatan dan Si meningkatkan *castability* serta menurunkan retak panas (*hot tear*). Oleh karena itu, kadar Si yang lebih banyak ditambahkan dalam paduan ini untuk proses pengecoran terlebih untuk *permanent mold* dan *die casting*.

Biasanya, didalam paduan ini tidak hanya terdapat unsur Si dan Cu sebagai unsur paduan utamanya tetapi tidak jarang ditemukan unsur-unsur paduan lainnya dalam jumlah kecil sehingga disebut dengan unsur paduan minor. Unsur-unsur paduan minor tersebut juga mempengaruhi karakteristik paduan Al-Si-Cu. Namun, unsur-unsur paduan tersebut memiliki batasan kadar penambahan dalam proses peleburannya karena jika terlalu banyak dikhawatirkan akan mengganggu sifat-sifat utama dari aluminium tersebut. Adapaun pengaruh dari unsur paduan utama dan minor terhadap sifat mekanik dan karakteristik paduan aluminium antara lain sebagai berikut :

1) Silikon

Silikon merupakan unsur yang umum digunakan dalam paduan aluminium. Hal ini dikarenakan penambahan unsur silikon meningkatkan karakteristik pengecoran seperti meningkatkan mampu alir (*fluidity*), ketahanan terhadap retak panas (*hot tearing*), dan *feeding characteristic*^[8].

Paduan Al-Si ini dibagi menjadi tiga daerah utama dalam diagram fasanya yaitu komposisi hipoeutektik; dengan kadar Si yang dipadukan \pm dibawah 11.7 %, eutektik; dengan kadar Si yang dipadukan \pm 11.7 % sampai dengan 12.2 % dan hipereutektik; penambahan silikon dengan kadar \pm diatas 12.2 %, seperti yang terlihat pada Gambar 2.1

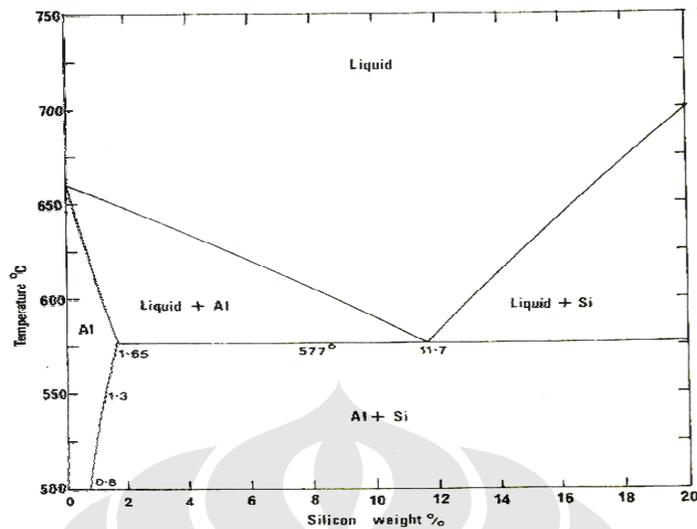


Figure 3.87 Aluminium-silicon equilibrium diagram

Gambar 2.1 Diagram Fasa Al-Si ^[8]

Fasa utama dari ketiga komposisi paduan ini adalah fasa α -Al yang mengandung banyak Al. Perbedaan antara ketiga daerah ini terletak pada fasa-fasa pendamping matriks α -Al, yaitu fasa silikon primer, aluminium primer, maupun fasa eutektik. Pada komposisi hipoeutektik, sesuai dengan diagram fasanya, maka aluminium dari keadaan cair akan membeku mengikuti garis lurus sesuai dengan penurunan temperatur sesuai persamaan reaksi berikut ini :



yang akan menghasilkan fasa Al primer yang berdampingan dengan fasa α -Al dan fasa eutektik sebagai fasa tambahannya ^[11].

Komposisi eutektik, pembekuan Al liquid tidak harus melalui proses pembekuan fasa cair-padat seperti pada pembekuan hipoeutektik melainkan dapat langsung membeku. Skema pembekuannya sesuai persamaan berikut :



bentuk akhir fasa ini adalah fasa eutektik. Sedangkan untuk komposisi hipereutektik, proses pembekuan kembali mengikuti fasa liquid + Si terlebih dahulu sebelum akhirnya membeku menjadi fasa Al+Si dimana fasa terakhirnya memiliki struktur

yang kaya akan silikon primer dengan fasa eutektik sebagai struktur tambahan ^[11] sesuai dengan skematis berikut :



Komposisi hipereutektik ini menghasilkan kristal silikon primer yang menyebabkan paduan aluminium menjadi keras, mempunyai ketahanan aus yang baik serta ekspansi panas yang rendah sehingga cocok untuk aplikasi temperatur tinggi seperti piston. Namun, *machinability*-nya menjadi kurang baik ^[12].

Secara umum, kandungan optimum dari silikon dapat ditentukan berdasarkan proses pengecorannya. Kadar optimum Si untuk proses pengecoran dengan pendinginan lambat seperti *investment* dan cetakan pasir adalah 5 % sampai dengan 7 % sedangkan untuk proses *die casting* adalah 8 % sampai dengan 12 % ^[8].

Namun, jika unsur silikon yang digunakan bersamaan dengan penambahan sejumlah AlTiB yang bertindak sebagai *grain refiner*, maka kadar silikon yang lebih dari 2 wt. % akan dapat memicu efek *poisoning* terhadap keefektifan TiAl₃ sebagai inoculan. Hal ini telah diteliti oleh Qiu dan Taylor ^[10], yang menyatakan bahwa keefektifan TiAl₃ yang bertindak sebagai inoculan atau nuklean sebagai tempat tumbuh kisi kristal aluminium akan terganggu oleh hadirnya senyawa Ti₅Si₃ yang menggantikan kisi kristal aluminium. Penelitian yang dilakukan berdasarkan atas kesesuaian kisi kristal antar senyawa TiAl₃, Ti₅Si₃, aluminium dan TiB₂. Dari hasil penelitian yang dilakukan, ternyata didapati fakta bahwa kesesuaian kisi kristal antara TiAl₃ dengan Ti₅Si₃ lebih banyak dibandingkan dengan TiB₂. Oleh karena itu, seyogyanya walaupun TiAl₃ telah mengalami efek *poisoning* dikarenakan kadar Si yang lebih dari 2 wt. %, namun partikel TiB₂ masih dapat menjalankan tugasnya sebagai inoculan ^[10].

2) Tembaga (Cu)

Unsur tembaga mempunyai kelarutan sekitar 5.65 % pada temperatur 550 °C ^[12]. Pada paduan aluminium, penambahan unsur tembaga dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, baik dalam kondisi *as cast* atau *heat treatment* membentuk CuAl₂ serta dapat mengurangi ketahanan terhadap retak panas (*hot tear*). Namun,

efek sampingnya adalah mengurangi *castability* karena menurunkan fluiditas dan menurunkan ketangguhan^[12].

3) Magnesium (Mg)

Magnesium adalah unsur yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada paduan *heat-treated* Al-Si dan umumnya digunakan pada paduan Al-Si kompleks yang mengandung Cu, Ni dan elemen lain yang berfungsi sama^[8]. Magnesium memiliki kelarutan 17.4 % pada temperatur 450 °C^[12]. Magnesium bersama-sama dengan Si membentuk fasa Mg₂Si yang mengendap pada perlakuan panasnya. Pada kadar 0.1 % - 1.3 %, endapan Mg₂Si yang terbentuk optimal. Mekanisme penguatannya adalah melalui mekanisme *precipitation hardening*. Selain meningkatkan kekuatan dan kekerasan, unsur Mg juga meningkatkan ketahanan terhadap korosi paduannya namun menurunkan *castability*^[12].

4) Seng (Zn)

Kelarutan seng pada 443 °C bisa mencapai 88.8 %. Penambahan unsur seng pada paduan Al-Si tidak akan memiliki pengaruh yang signifikan. Namun, bila dipadu bersama dengan tembaga (Cu) dan atau magnesium (Mg) dapat meningkatkan sifat kekerasan dan kekuatan karena menghasilkan paduan yang *heat-treatable* dikarenakan terbentuknya presipitat MgZn₂ dan CuAl₂. Namun, dalam kadar yang berlebih, unsur Zn meningkatkan kegetasan, menurunkan ketangguhan dan menurunkan ketahanan terhadap korosi. Oleh karena itu, kandungannya dibatasi kurang dari 1 % sampai dengan maksimal hanya 0.1 %^[12].

5) Besi (Fe)

Unsur besi merupakan pengotor yang sering ditemukan di aluminium. Kelarutan unsur ini cukup kecil pada aluminium cair yaitu 0.05 % pada 655 °C. Efek penambahannya yaitu meningkatkan ketahanan terhadap retak panas, menurunkan tingkat terjadinya *die sticking* atau *soldering* pada proses *die casting*^[8]. Peningkatan kadar Fe dalam paduan akan meningkatkan kekuatan terutama pada suhu tinggi.

Namun, menurunkan keuletan dan *flowability*. Penambahan kadar Fe kurang dari 0.05 % mengakibatkan terbentuknya fasa-fasa yang tidak larut seperti FeAl_3 , FeMnAl_6 dan αAlFeSi . Oleh karena itu, umumnya peningkatan kadar Fe dalam paduan aluminium dibatasi maksimum hanya 1 % saja ^[12].

6) Mangan (Mn)

Pada dasarnya, unsur mangan dianggap sebagai unsur pengotor dalam paduan Al-Si ^[8]. Kelarutan unsur Mn dalam paduan aluminium sebesar 1.82 % pada temperatur 658 °C ^[12]. Mangan tidak akan memberikan efek yang signifikan pada coran paduan Al jika tidak mendapatkan perlakuan *work hardening* ^[8]. Efek penambahan unsur ini yaitu meningkatkan kekuatan dan kekerasan, meningkatkan ketahanan terhadap temperatur tinggi, meningkatkan ketahanan terhadap korosi namun menurunkan sifat mampu cor (*castability*) ^[12].

7) Nikel (Ni)

Unsur nikel mempunyai batas kelarutan maksimum pada aluminium cair sekitar 0.05 %. Hal ini dikarenakan jika melebihi batas tersebut, nikel bersama-sama dengan Fe akan menghasilkan fasa intermetalik. Penambahan kadar Ni sampai dengan 2 % pada aluminium murni dapat meningkatkan kekuatan namun mengurangi keuletan. Selain itu, unsur Ni sering dipadukan pada paduan Al-Cu dan Al-Si untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada aplikasi temperatur tinggi dan mengurangi koefisiensi ekspansi panas ^[8].

8) Timbal (Pb)

Timbal biasa digunakan sebagai paduan pada konsentrasi lebih dari 0.1 % untuk meningkatkan *machinability* ^[8].

9) Timah (Sn)

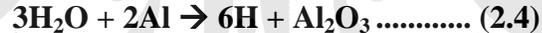
Unsur timah sangat efektif digunakan dalam paduan aluminium karena meningkatkan sifat anti-friksi dan karenanya sering digunakan pada aplikasi *bearing*. Biasanya, penambahan unsur Sn pada aluminium tuang mencapai 25 %. Selain itu, penambahan unsur ini juga meningkatkan *machinability* ^[8].

10) Kromium (Cr)

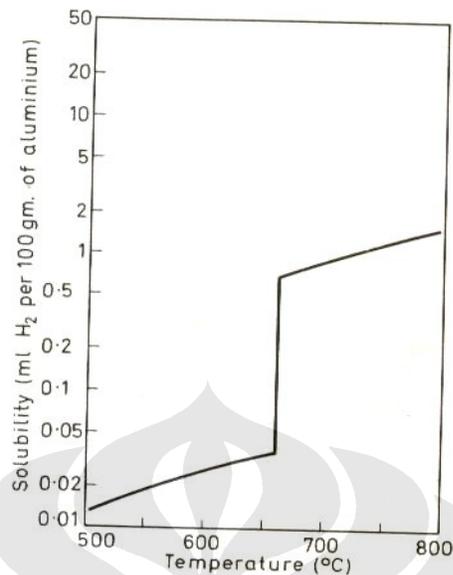
Penambahan unsur kromium pada paduan aluminium tuang biasanya membentuk CrAl_7 yang berfungsi untuk membantu mekanisme *grain growth*. Kromium juga meningkatkan ketahanan terhadap korosi ^[8].

11) Hidrogen

Hidrogen adalah satu-satunya gas yang dapat larut pada aluminium dan paduannya. Hal ini dikarenakan afinitas kelarutan hidrogen pada *range* temperatur yang tinggi sesuai persamaan reaksi :



di dalam cairan aluminium, hidrogen larut secara atomik. Selama proses pendinginan dan pembekuan, hidrogen berlebih yang terdapat pada aluminium cair akan mengendap membentuk molekul dan akhirnya mengakibatkan pembentukan porositas, baik porositas primer maupun sekunder ^[8]. Proses pengendapan hidrogen mengikuti hukum nukleasi dan pertumbuhan fasa selama proses pembekuan. Semakin tinggi temperatur pada paduan aluminium, maka kelarutan hidrogen didalam paduan juga semakin meningkat, seperti yang diperlihatkan dari kurva kelarutan hidrogen – temperatur dibawah ini ^[8].



Gambar 2.2 Kurva Kelarutan Hidrogen pada Aluminium cair ^[8]

Hal ini akan mengakibatkan hidrogen yang tidak larut (*supersaturated*) membentuk kumpulan molekul H₂ menjadi *gas porosity*. *Gas porosity* atau porositas yang disebabkan oleh gas mempengaruhi beberapa sifat mekanik dari aluminium tuang antara lain menurunkan kekuatan tarik dan elongasi serta menurunkan kekuatan fatik dan impak. Bahkan, porositas yang saling terhubung akan menyebabkan bocor dalam kondisi *under pressure* serta memicu terjadinya *hot tear* ^[12].

Umumnya, hidrogen masuk kedalam aluminium melalui atmosfer lingkungan yang lembab, pemakaian fluks yang tidak optimal, krusibel dan batu tahan api yang basah dan memiliki banyak pori, peralatan yang basah seperti alat pengaduk, pengambil *dross* bahkan bisa dari bahan baku seperti *scrap* basah, kotor, dan berminyak ^[12]. Pencegahan terjadinya hidrogen berlebih pada aluminium tuang dapat dilakukan dengan menghindari sumber-sumber masuknya hidrogen, menghindari *over heating* cairan aluminium dan melakukan proses *degassing* dengan penginjeksian gas-gas *inert* seperti nitrogen (N) atau argon (Ar) kedalam cairan Al ^[12].

Selain itu penambahan unsur paduan juga berpengaruh terhadap kelarutan gas hidrogen dalam aluminium. Unsur paduan seperti silikon dan atau tembaga dapat

menurunkan kelarutan gas hidrogen karena dapat menghambat terjadinya reaksi penguraian uap air. Hal yang sebaliknya diberikan oleh penambahan unsur paduan magnesium karena magnesium bertindak sebagai katalisator reaksi penguraian uap air oleh aluminium cair ^[13].

12. Titanium

Titanium umumnya dipadukan di dalam aluminium untuk mengecilkan struktur butir dari paduan aluminium tuang dan sering dikombinasikan dengan sedikit penambahan kadar boron (B). Fasa Al_3Ti yang terbentuk nantinya akan bertindak sebagai titik awal nukleasi selama pembekuan aluminium tuang.

2.5 Pengaruh Struktur Mikro Terhadap Sifat Mekanis Paduan Aluminium Tuang

Sifat-sifat mekanis dari paduan aluminium tuang ditentukan oleh struktur mikronya. Semakin baik struktur mikronya, maka semakin baik pula sifat-sifat mekanisnya. Struktur mikro dari paduan aluminium tuang dipengaruhi oleh komposisi, kecepatan pembekuan dan perlakuan panasnya. Sedangkan bagian-bagian dari struktur mikro yang mempengaruhi sifat mekanis pada aluminium tuang adalah ^[8]:

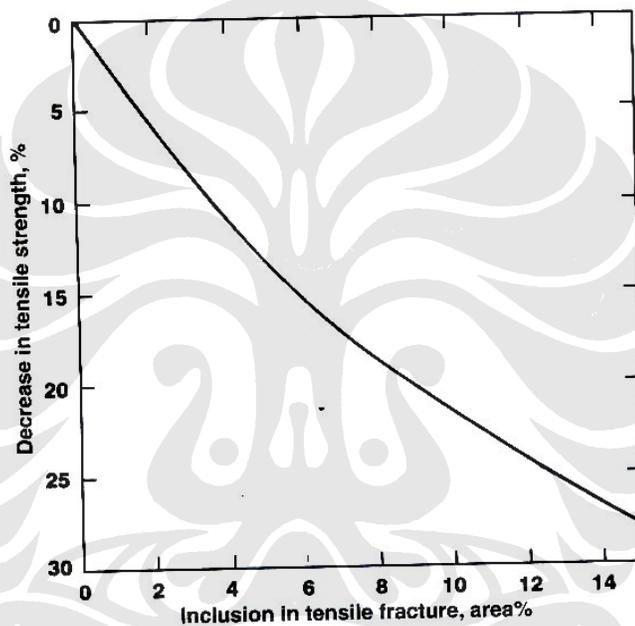
- 1) Inklusi, ukuran, bentuk, dan pendistribusian fasa intermetalik
- 2) Ukuran dan bentuk butir serta *Dendrit Arm Spacing* (DAS)

2.5.1 Inklusi dan Fasa Intermetalik

Inklusi adalah pengotor yang tidak diinginkan terdapat dalam paduan aluminium tuang. Umumnya, inklusi yang terdapat pada cairan aluminium adalah oksida (Al_2O_3 , MgO), karbida (Al_3C_4 , TiC) atau bahkan fasa intermetalik ($MnAl_3$, $FeAl_3$). Keberadaan inklusi dapat menimbulkan masalah terhadap sifat-sifat paduan aluminium tuang seperti menyulitkan proses *machining* dikarenakan kadang kala inklusi terdiri atas partikel keras sehingga lebih keras daripada *tool*, mengurangi kekuatan dan ketahanan terhadap *fatigue* hingga meningkatkan porositas dan meningkatkan korosi ^[12].

Tabel 2.4 Jenis inklusi dan sumber masuknya pada paduan aluminium tuang ^[12]

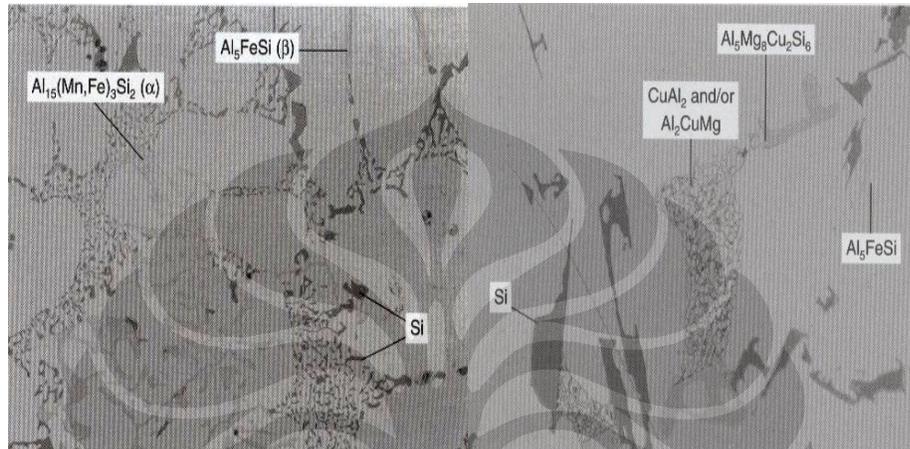
Jenis Inklusi	Rumus kimia	Sumber masuk
Non-metalic exogenous	Beberapa macam partikel refraktori seperti Al_3C_4	Degradasi refraktori, remelt ingot, reaksi antara refraktori dengan logam cair
Non-metalic in-Situ	-MgO, Al_2O_3 films, clusters, dispersoid - $MgAl_2O_4$ films dan clusters	Peleburan, pemaduan, turbulensi ketika terjadinya transfer aliran logam
Garam halida	$MgCl_2$ - $NaCl$ - $CaCl_2$ -dll $MgCl_2$ - $NaCl$ - $CaCl_2$ / MgO , dll	Proses fluxing yang tidak optimal

**Gambar 2.3** Hubungan antara distribusi inklusi dengan kekuatan tarik pada aluminium ^[8]

Salah satu jenis inklusi yang sering ditemukan pada paduan aluminium tuang adalah fasa intermetalik. Fasa intermetalik merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro paduan aluminium, bisaanya antara logam dan logam sebagai hasil dari kadar berlebih yang melebihi batas kelarutannya ^[14].

Selama reaksi pembekuan paduan Al-Si hipoeutektik dan eutektik, terdapat beberapa tahap mekanisme pembekuan fasa yaitu pembekuan matriks $\alpha-Al$, reaksi pembentukan eutektik Al-Si serta pengendapan fasa-fasa kedua seperti Mg_2Si dan Al_2Cu ^[14].

Salah satu faktor yang mempengaruhi ukuran, bentuk, dan distribusi fasa intermetalik adalah kecepatan pembekuan. Pembekuan dengan kecepatan yang lambat akan menghasilkan bentuk fasa intermetalik yang kasar dan terjadinya konsentrasi fasa kedua pada batas butir. Sebaliknya, dengan kecepatan pembekuan yang cepat akan menghasilkan partikel yang lebih halus dan terdispersi merata ^[13].



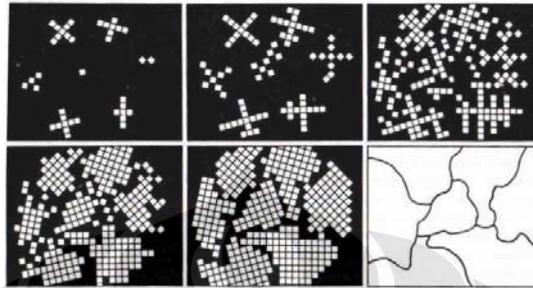
Gambar 2.4 Fasa-fasa intermetalik pada paduan Aluminium tuang ^[8]

Selain itu, penambahan unsur paduan terutama unsur Fe dan Mn kedalam paduan aluminium tuang juga dapat memicu terjadinya fasa intermetalik dalam keadaan yang berlebih. Fasa Al_5FeSi dan juga fasa $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ yang terbentuk dapat menurunkan keuletan dan sifat *machinability* karena partikel ini bersifat sangat keras dan getas ^[8].

2.5.2 Dendrite Arm Spacing (DAS)

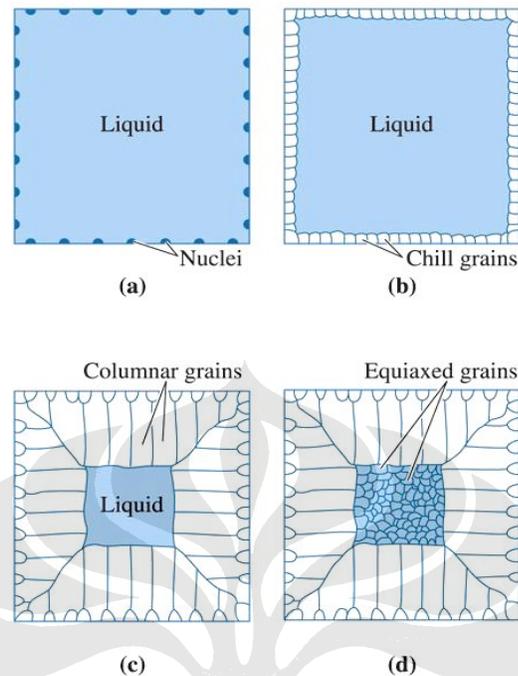
Mekanisme pembekuan dendrit dapat dijelaskan melalui suatu teori yaitu teori pembekuan (*solidification theory*). Teori ini menyatakan bahwa selama proses pembekuan, dimana terjadi perubahan fasa cair menjadi padat, logam akan terkristalisasi sehingga atom-atom menyusun diri mereka sendiri dalam keteraturannya. Proses kristalisasi ini dimulai dari keadaan yang disebut nuklei. Nuklei terbentuk ketika logam cair mencapai temperatur $660\text{ }^\circ\text{C}$ dan bertambah besar ukurannya dengan sangat cepat sehingga atom-atom aluminium dapat menyusun

dirinya sendiri disekitar nuklei tersebut. Pertumbuhan nuklei tersebut terus bertambah hingga akhirnya berhenti dikarenakan kristal tetangga^[15]. Satu nuklei yang mempunyai keteraturan atom-atom disekitarnya disebut dengan butir^[16].



Gambar 2.5 Mekanisme pembekuan^[16]

Biasanya, struktur yang terbentuk pada proses pengecoran logam cair adalah kolumnar dan *equiaxed*. Struktur kolumnar adalah daerah struktur butir hasil pengecoran logam cair dimana berbentuk memanjang dengan arah yang sama sebagai hasil dari persaingan pertumbuhan selama pembekuan^[15]. Bentuknya yang memanjang disebabkan bahwa secara umum pertumbuhan nuklei dan proses kristalisasi terjadi dengan arah yang berlawanan dengan perpindahan panasnya. Struktur ini bisaanya terjadi pada bagian yang bersentuhan dengan dinding cetakan^[16]. Sedangkan struktur *equiaxed* adalah suatu struktur butir hasil pengecoran logam cair dimana sering ditemukan pada bagian tengah *ingot* dimana daerah ini mempunyai arah butir yang berbeda satu dengan yang lainnya. Hal ini dikarenakan bahwa proses pembentukan nuklei terjadi secara menyebar^{[15][16]}. Mekanisme pembentukan struktur kolumnar dan *equiaxed* dapat dilihat dari gambar berikut.

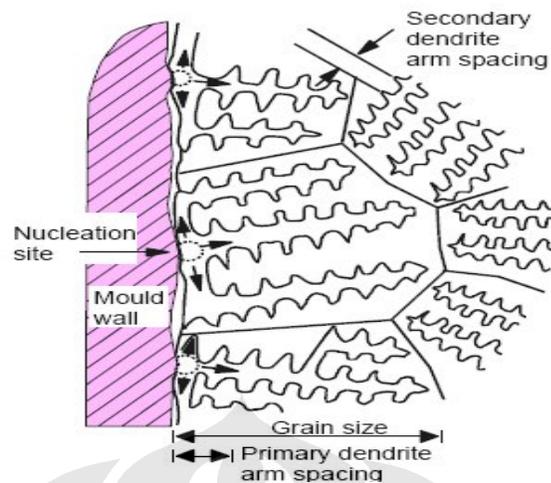


Gambar 2.6 Mekanisme Pembentukan Kolumnar dan Equiaxed ^[15]

Namun, tak selamanya proses kristalisasi menghasilkan bentuk kolumnar ataupun *equiaxed*. Tak jarang bentuk dendrit ditemukan pada produk pengecoran. Dendrit merupakan suatu struktur khas pada produk hasil pengecoran dimana berbentuk seperti pohon cemara yang tumbuh dalam keadaan *undercooled* ^[15]. Bentuk ini tumbuh dikarenakan bahwa secara termodinamika, pertumbuhan kristal lebih disukai pada sisi sudut dari kristal yang sedang tumbuh, yang berbentuk kubus, daripada daerah pusatnya ^[16].

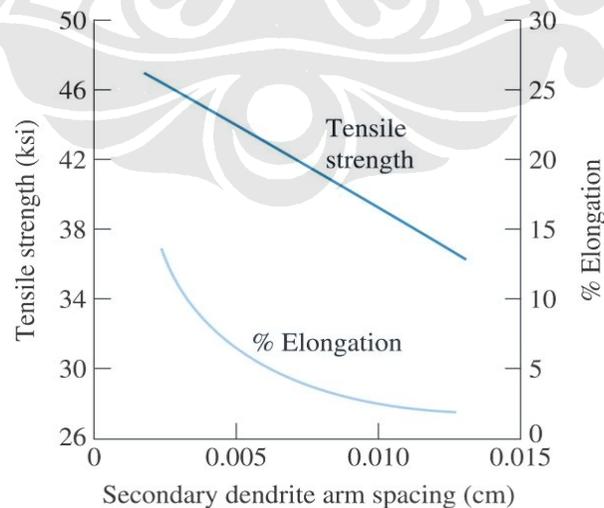
Sejatinya, dendrit-dendrit terdiri dari tiga karakteristik yaitu ^[8]:

- a) *Dendrit Arm Spacing* (DAS) yaitu jarak antara lengan sekunder .
- b) *Dendrit Cell Interval* yaitu jarak antara garis sumbu tengah antara dendrit-dendrit yang berdekatan.
- c) *Dendrit Cell Size* yaitu lebar dendrit itu sendiri.



Gambar 2.7. *Dendrit Arm Spacing* ^[8]

Dendrit Arm Spacing (DAS) sangat dipengaruhi oleh kecepatan proses pembekuan logam cair pada proses pengecoran. Selain itu, DAS juga mempengaruhi sifat mekanis suatu logam paduan terkait dengan struktur mikronya. Semakin besar nilai DAS maka akan semakin kasar struktur mikro paduan tersebut dan mengakibatkan menurunnya sifat mekanisnya. Sebaliknya, nilai DAS yang lebih kecil mengindikasikan bahwa paduan tersebut mempunyai struktur mikro yang halus dan akan meningkatkan sifat mekanis paduan tersebut seperti yang terlihat dari kurva dibawah ini.



Gambar 2.8. Pengaruh *Dendrit Arm Spacing* terhadap sifat mekanis ^[8]

2.6 Penghalus Butir

Penghalusan butir (*Grain Refinement*) adalah proses penghalusan ukuran butir primer aluminium selama pembekuan^[12]. Seperti yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, selama proses pembekuan, aluminium cair membentuk struktur dendrit. Kumpulan dari struktur dendrit-dendrit yang berawal dari nukleus disebut dengan butir. Dari Gambar 2.8 juga didapati bahwa *Dendrit Arm Spacing* (DAS) mempengaruhi nilai dan sifat-sifat mekanis dari paduan aluminium tuang. Semakin kecil DAS, maka semakin baik sifat-sifat mekanisnya. Hal ini berarti, semakin kecil ukuran butir juga dapat meningkatkan sifat-sifat mekanis tersebut karena ukuran butir berbanding lurus dengan nilai DAS^[16].

Jenis penghalus butir yang umum digunakan adalah yang mengandung unsur Ti dan B dalam bentuk senyawa logam seperti $TiAl_3$ atau TiB_2 . Penambahan kadar Ti antara 0.02 % sampai dengan 0.15 % atau campuran Ti-B dengan kadar 0.01 % sampai dengan 0.03 % Ti dan 0.01 % B sering digunakan dalam praktiknya. Penambahan penghalus butir ini dapat berupa *master alloy* batangan (*rod*) ataupun serbuk (*flux*).



Gambar 2.9 Penghalus Butir Bentuk Master alloy (*rod*)

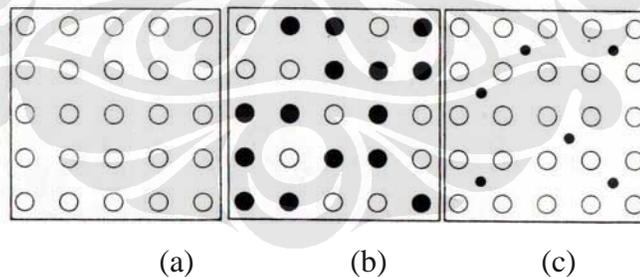
2.6.1 Mekanisme Penghalusan Butir

2.6.2.1 Nukleasi dan Pembekuan

Mekanisme penghalusan butir dapat dimengerti dengan memahami konsep nukleasi dan pertumbuhan butir pada logam, khususnya aluminium. Hal ini sesuai dengan Teori Valmer dan Welber dimana nukleasi pada logam dibedakan atas dua bentuk, yaitu nukleasi homogen dan nukleasi heterogen^[17].

Seperti yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya, umumnya aluminium yang digunakan pada berbagai industri dunia mengandung 10 % Fe dan atau Si serta unsur paduan lainnya. Pada keadaan cair, Fe dan atau Si serta unsur paduan lainnya larut dalam matriks aluminium. Namun, ketika terjadi pembekuan, atom Fe dan atau Si serta unsur paduan lainnya akan mengikuti konsep pembekuan secara nukleasi homogen dan nukleasi heterogen.

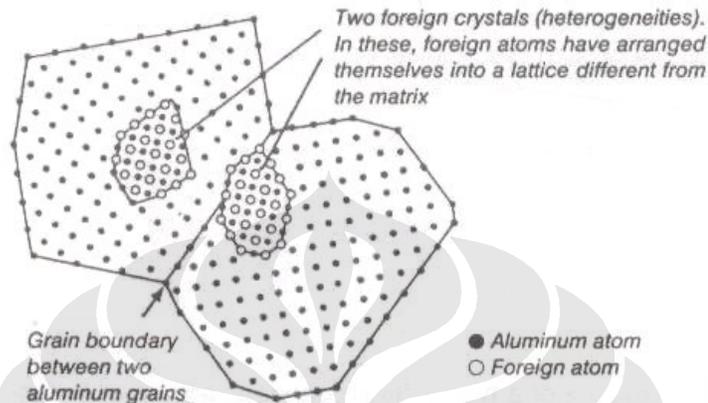
Pada nukleasi homogen, atom-atom penyusun paduan tersebut, baik *host atom* maupun *foreign atom*, tersusun secara teratur dan terdistribusi merata (*mixed*) satu dengan lainnya. Hal ini disebabkan karena unsur paduan mempunyai kelarutan yang sempurna dengan aluminium. Sehingga, penambahan unsur paduan cenderung akan membentuk *solid solution*, baik substitusi ataupun interstisi^[16].



Gambar 2.10 Nukleasi Homogen (b) substitusi dan (c) interstisi^[16]

Namun, kenyataanya tidak semua unsur paduan memiliki kelarutan yang sempurna terhadap aluminium atau memiliki batas nilai kelarutan. Seperti contoh, Fe atau Ti hanya memiliki nilai kelarutan sempurna jika kadar yang ditambahkan kedalam aluminium cair adalah sekitar 0.63 %. Di luar nilai tersebut, pada saat pembekuan maka atom-atom tersebut akan membentuk suatu tatanan kristal

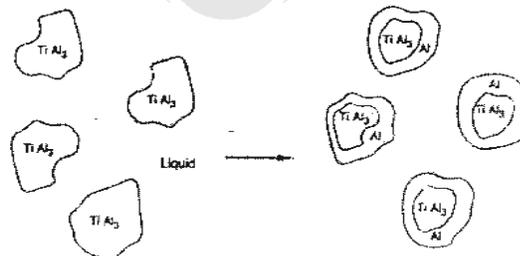
tersendiri, seperti contoh dimana 1 atom Fe akan membentuk suatu struktur kristal dengan 3 atom Al membentuk FeAl_3 . Pada kasus lainnya, unsur tersebut akan mengendap bersama-sama seperti Mg_2Si atau malah mengendap sendiri. Umumnya, kristal-kristal tersebut berada pada dan atau butir aluminium ^[16].



Gambar 2.11 Nukleasi Heterogen ^[16]

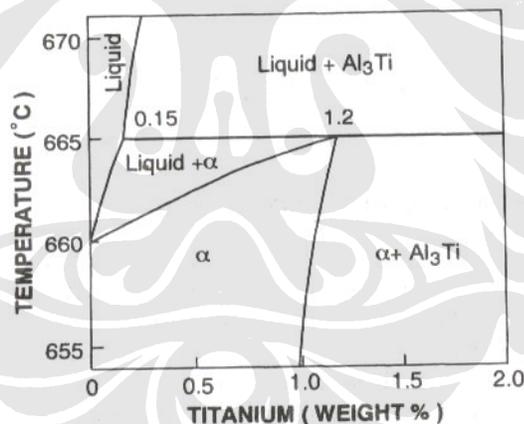
2.6.2.2 Teori-Teori Tentang Penghalusan Butir

Pada tahun 1949, Cibula mengungkapkan suatu teori mengenai mekanisme penghalus butir dimana senyawa TiC dan atau TiB_2 merupakan suatu nuklean yang terbentuk dari nukleasi heterogen. Sebagai nuklean, TiC dan atau TiB_2 berfungsi sebagai inti pembekuan pada paduan aluminium tuang. Namun, pada tahun 1951, Crossley dan Mandolfo mengemukakan Teori Peritektik (*Peritectic Theory*) dimana senyawa TiAl_3 yang terdapat pada *master alloy*-lah yang bertindak sebagai nuklean sesuai reaksi :



Gambar 2.12 Nukleasi Pada Teori Peritektik ^[17]

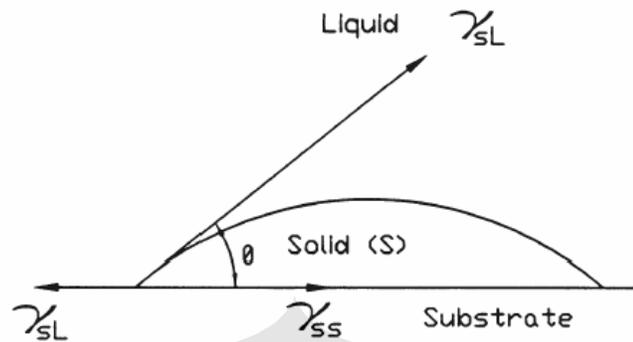
Pendukung teori Cibula yang menyatakan bahwa TiB_2 dan atau TiC adalah nuklean yang terbentuk pada nukleasi heterogen membuktikan teorinya tersebut dengan menambahkan Al-Ti-B master alloy dengan kadar Ti < 0.15 %. Percobaan tersebut memberikan hasil bahwa setelah diamati, partikel boron (B) ataupun aglomeratnya terdapat pada pusat butir. Hal ini membuktikan bahwa boron bertindak sebagai nuklean. Namun, pada tahun 1995, Mohanty menyatakan bahwa partikel boron hanya terdapat pada batas butir dan tidak terjadinya pengecilan butir jika tidak terdapat titanium yang terlarut. Hal ini juga dibuktikan oleh Guzowski yang menyatakan bahwa boron adalah nuklean yang buruk dan tidak dapat berfungsi sebagaimana $TiAl_3$. Selain itu, pembuktian teori peritektik juga dilakukan oleh Davies dan Arnberg pada tahun 1970 dan 1982 yang menemukan $TiAl_3$ berada pada pusat butir yang kaya akan matriks α -Al. Oleh karena itu, jika dilihat dari diagram fasa Al-Ti, maka pembuktian teori peritektik benar adanya ^[17].



Gambar 2.13 Diagram Fasa Al-Ti ^[8]

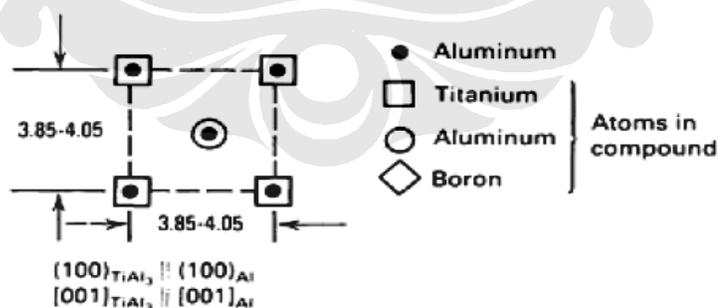
Untuk dapat bertindak sebagai nuklean, maka sesungguhnya terdapat beberapa kondisi yang wajib dipenuhi oleh nuklean, yaitu :

1. Energi *Interfacial* yang rendah antara nuklean dan nukleus. *Interfacial* energi yang rendah mengakibatkan sudut kontak antara *solid* (nuklean) dan *liquid* (nukleus) sangat kecil atau bahkan mendekati 0° sehingga nukleus dapat menyelimuti nuklean ^[17].



Gambar 2.14 Mekanisme Pembasahan Nukleus dengan Nuklean ^[17]

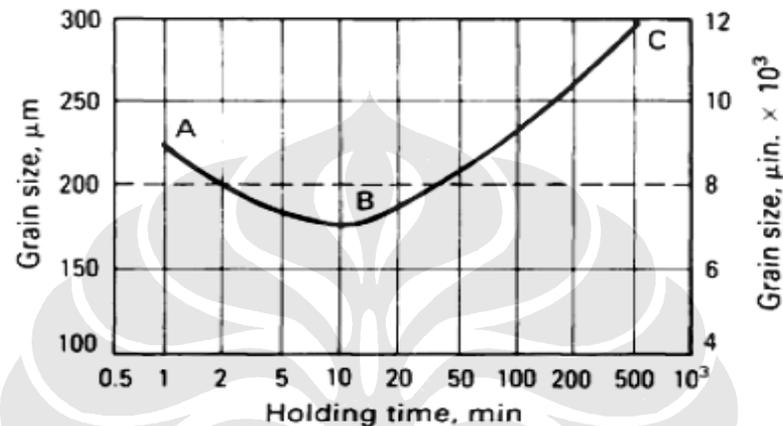
2. Terdapatnya kesamaan dalam struktur kristal, minimal dalam 1 bidang atom antara nuklei dan nuklean. $TiAl_3$ mempunyai kesamaan struktur kristal dengan aluminium dimana $(001)_{TiAl_3} \parallel (001)_{Al}$ dan $[001]_{TiAl_3} \parallel [001]_{Al}$ ^[8]. hal ini diperkuat oleh penelitian yang dilakukan oleh Zhang dan Taylor (2004) ^[23] yang menyatakan bahwa secara kristalografi, kesesuaian antara kisi kristal $TiAl_3$ dengan kisi kristal aluminium memiliki 4 buah kesesuaian dibandingkan dengan kesesuaian kisi kristal AlB_2 ataupun TiB_2 dengan kisi kristal aluminium. Pengujian yang dilakukan menggunakan metode *edge-to-edge matching model*.



Gambar 2.15 Struktur kristal Aluminium dengan $TiAl_3$ ^[8]

Kemampuan dari penghalus butir ini akan menurun seiring dengan bertambahnya waktu, yang umum dinamakan dengan waktu pudar (*fading time*). Sesuai teori peritektik, yang bertindak sebagai nuklean adalah $TiAl_3$ dengan berat

jenis 3.35 g/cm^3 , jauh lebih tinggi bila dibandingkan dengan Al yang hanya 2.7 g/cm^3 . Hal ini menyebabkan seiring dengan bertambahnya waktu, TiAl_3 akan mengendap pada bagian bawah *furnace*. Akibatnya, butir akan tetap bertambah besar kembali seperti pada waktu sebelum penambahan AlTiB. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 2.16 ^{[8][12]}



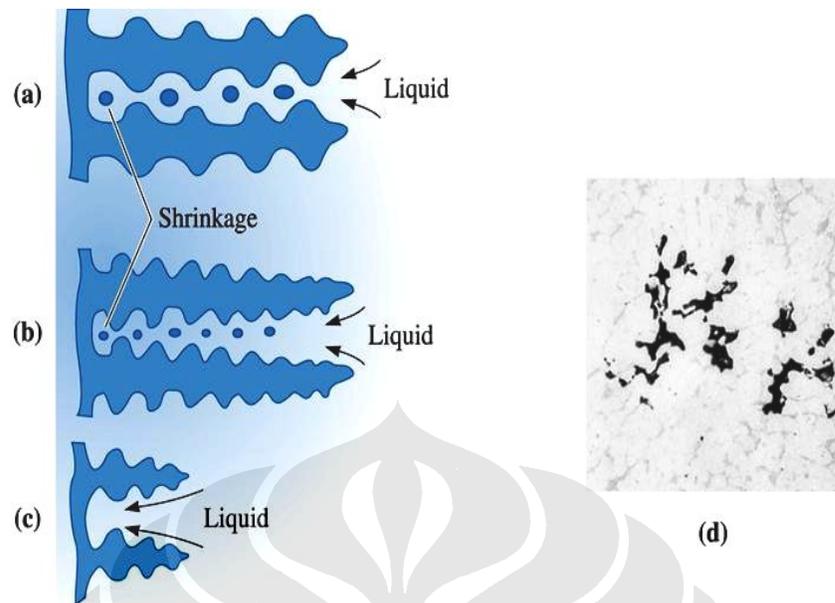
Gambar 2.16 Pengaruh waktu tahan terhadap ukuran butir dari logam yang diberi penghalus butir. A – B merupakan waktu kontak, B – C adalah waktu pudar

2.6.3 Pengaruh Penghalus Butir Terhadap Sifat Mekanis Aluminium

Selain menghaluskan butir, penambahan penghalus butir juga memberikan pengaruh-pengaruh lainnya terhadap sifat-sifat mekanis pada paduan aluminium tuang yaitu :

1) Pendistribusian mikroporositas secara merata

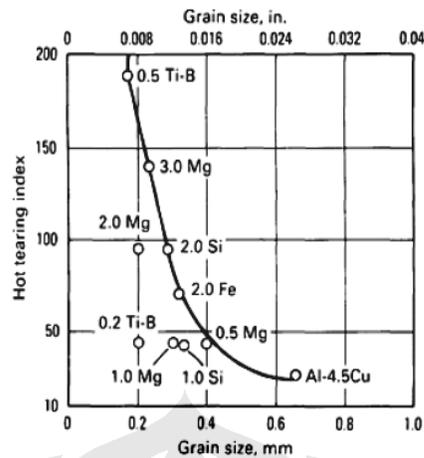
Selama proses pembekuan, terjadi apa yang dinamakan porositas atau lubang pori. Porositas tidak dapat dihilangkan secara keseluruhan namun dapat diminimalisir. Kumpulan dari beberapa mikroporositas dapat membentuk porositas dan hal tersebut dapat menurunkan sifat mekanis paduan aluminium tersebut. Selain itu, mikroporositas bisa juga membentuk *shrinkage* porositas yang terdapat pada celah antara DAS, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.17.



Gambar 2.17 (a)(b)(c) Ilustrasi *shrinkage porosity* pada *Dendrit Arm Spacing*. **(d)** Mikrostruktur dari *interdendritic porosity* (perbesaran 80 x) ^[16]

2) Menurunkan terjadinya retak panas (*Hot Tearing*)

Hal ini disebabkan oleh adanya lapisan tipis cairan yang menyelimuti butir logam sehingga menurunkan temperatur saat penyusutan terjadi dan rentang temperatur dimana retak panas dapat terjadi. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 2.18 yang menyatakan bahwa pengecilan butir akan menurunkan rentang terjadinya retak panas (*hot tearing*) ^[8].



Gambar 2.18. Pengaruh besar butir terhadap kecenderungan *hot tearing* pada paduan Al – 4.5Cu. Nilai dibawah 50 rentan terhadap *hot tearing*^[16]

3) Meningkatkan *machinability*

Hal ini disebabkan oleh fasa sekunder dan porositas yang terdistribusi merata^[8].

4) Meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi

Seperti yang telah diketahui bahwa salah satu cara untuk meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi adalah dengan efek *grain boundary strengthening*. Dimana, batas butir akan menjadi penghalang bagi dislokasi untuk bergerak. Oleh karena butir-butir menjadi kecil, maka seyogyanya batas butir akan semakin banyak dan meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi^[12].

Tabel 2.5. Pengaruh penghalus butir dan laju pendinginan pada sifat mekanis paduan A356^[16]

Sifat Mekanis	Pendinginan lambat (<i>as - cast</i>)		Pendinginan cepat (<i>as - cast</i>)	
	A	B	A	B
<i>Ultimate Strength</i> (ksi)	20.815	22.648	24.363	24.15
<i>Yield Strength</i> (ksi)	13.043	13.572	12.15	13.58
<i>Elongation</i> (%)	3	3	5.4	4.6

A – komposisi = 0.39Mg, 0.2Cu, 0.19Fe, 6.79Si,0.08Ti,0B,tanpa penghalus butir

B – komposisi = 0.39Mg, 0.2Cu, 0.19Fe, 6.85Si, 0.14Ti, 0.0065B,ditambah penghalus butir

5) Meningkatkan kemampuan *anodizing finish*

Butir-butir dengan struktur besar akan mengakibatkan struktur permukaan produk hasil pengecoran berbentuk seperti kulit jeruk (*orange peel*). Struktur ini sangat kasar sehingga jika dilakukan *anodizing* akan tidak efektif karena permukaannya yang tidak rata. Penambahan penghalus butir akan membuat butir-butir menjadi kecil dan mengurangi struktur *orange peel* tersebut sehingga meningkatkan kemampuan dan keefektifan proses *anodizing* ^{[12][8]}.

6) Mengurangi fluiditas

Sesuai dengan teori peritektik, maka nuklean $TiAl_3$ yang lebih berat daripada cairan logam Al akan menyebabkan aliran *slurry*. Aliran *slurry* adalah aliran padatan dalam cairan sehingga menyebabkan aliran ini mengalir lebih lambat dibandingkan dengan aliran biasa dan mengakibatkan turunnya nilai fluiditas ^[12].

2.6.4 Penghalus Butir AlTiB Master Alloy Berbentuk Rod

Penghalus butir yang akan ditambahkan kedalam paduan aluminium tuang terdiri dari dua bentuk yaitu bentuk *master alloy rod* ataupun bentuk serbuk (*flux*). Pemilihan bentuk tersebut didasarkan atas kelebihan dan kekurangan masing-masing. Penggunaan *rod* dipilih dikarenakan alasan praktis dan tingkat kepresisiannya yang tinggi. Umumnya, kandungan yang dimiliki oleh master alloy AlTiB *rod* tersebut antara lain Ti, B, V, dll.

Metode pemasukan *master alloy* tersebut juga banyak ragamnya. Namun, yang paling umum digunakan adalah metode pemasukan penghalus butir pada saat *degassing*. Metode ini banyak dipilih dikarenakan pada saat *degassing*, inklusi akan naik ke permukaan logam cair membentuk *dross*. Selain itu, aliran turbulen yang terjadi pada logam cair akan mendistribusikan secara merata partikel-partikel penghalus butir sehingga nantinya diharapkan hasil yang optimal ^[19].

2.7 Low Pressure Die Casting (LPDC)

Salah satu metode pengecoran yang digunakan pada industri logam adalah *Low Pressure Die Casting* (LPDC). LPDC merupakan jenis dari *permanent mold casting* dimana pada jenis pengecoran ini digunakan cetakan yang terbuat dari logam dengan salah satu sisi cetakan yang dapat bergerak (*moving dies*). Umumnya, LPDC dipilih karena beberapa faktor antara lain ^[12]:

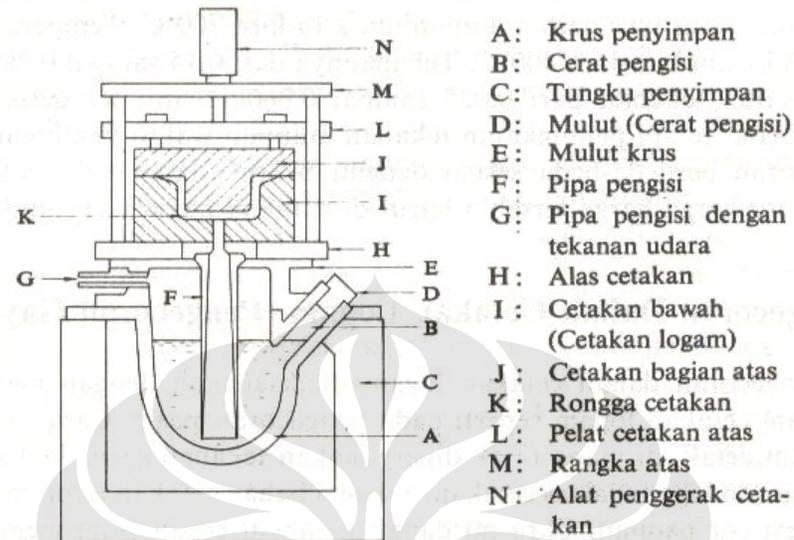
1. adanya *part* yang diproduksi dalam kapasitas yang massal yang seragam disetiap bentuknya (*identitical parts*);
2. *part* yang diproduksi membutuhkan tingkat keakurasian yang tinggi;
3. *part* yang diproduksi dituntut untuk memiliki kestabilan dimensi yang tinggi;
4. mengeliminasi biaya akibat proses *machining* lanjutan;
5. *recycleable*.

Mesin LPDC ini terdiri dari dua komponen yaitu mesin LPDC dan tanur tunggu (*Holding Furnace*) dimana logam cair hasil peleburan dimasukkan dan dijaga konstan temperaturnya. Prinsip kerjanya adalah dengan menginjeksikan logam cair yang berada pada tanur tunggu menggunakan tekanan rendah. Sehingga logam cair akan masuk menuju cetakan. Ketika logam telah membeku, maka tekanan dilepaskan dan *dies* akan membuka untuk kemudian benda hasil coran siap diambil.

Pengecoran dengan menggunakan metode ini dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu tekanan yang diberikan pada logam cair dan temperatur *dies*; baik *moving dies* ataupun *fixed dies*. Selain itu, temperatur logam cair yang masuk menuju cetakan juga mempengaruhi hasil pengecoran. Umumnya, tanur tunggu yang dilengkapi dengan *thermocouple* dipasang *heater* agar logam cair tetap berada pada temperatur leburnya dan tidak mengalami pembekuan (± 700 °C).

Kelemahan dari metode ini adalah adanya kemungkinan inklusi yang terbentuk pada saluran masuknya logam cair. Hal ini dikarenakan oleh naik turunnya cairan logam pada saluran menuju cetakan dimana pada saat cetakan dibuka dan tekanan dilepaskan, cairan logam yang masih tersisa di saluran akan turun kembali ke tanur, dan proses yang berulang-ulang dapat menyebabkan terbentuknya oksida di permukaan bagian dalam dari saluran. Untuk mengurangi risiko tersebut dapat

dilakukan dengan memberikan tekanan balik pada saluran sehingga logam cair akan tetap mengisi saluran pada setiap waktu^[8].



Gambar 2.19 Skematis penampang vertikal dari sebuah mesin LPDC^[8].