

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PADUAN ALUMINIUM AC4B

2.1.1 Aluminium Sebagai Penyusun Paduan Aluminium AC4B

Aluminium adalah logam utama yang menyusun paduan aluminium AC4B. Aluminium murni berwarna keputih-putihan yang beratnya hampir sepertiga kali jika dibandingkan dengan baja dan tembaga^[6]. Berat jenis logam yang memiliki struktur kristal FCC (*face centered cubic*) ini adalah 2.71 g/cm^3 pada temperatur kamar dan memiliki titik lebur sebesar $660.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[1]. Aluminium juga memiliki ketahanan korosi yang tinggi di lingkungan air, industri, dan atmosfer laut karena aluminium dapat membentuk lapisan pasif aluminium oksida yang tipis di permukaannya. Selain itu, aluminium juga memiliki sifat *machinability*, *formability*, *workability*, dan *castability* yang cukup bagus. Salah satu kekurangan aluminium adalah kekuatan dan kekerasannya yang rendah. Kekuatan aluminium murni hanya mencapai 7.2 kg/mm^2 sedangkan kekerasannya 19 BHN^[6].

Karena keterbatasan pada faktor kekuatan dan kekerasannya, aluminium biasanya dipadukan dengan material lain dalam aplikasinya^[6]. Menurut Aluminium Association of United States (AA), paduan aluminium diklasifikasikan menjadi dua macam yaitu paduan aluminium tempa (*wrought aluminium alloys*) dan paduan aluminium tuang (*cast aluminium alloys*)^[7]. Paduan aluminium tuang memiliki komposisi khusus yang diciptakan tidak hanya untuk mendapatkan kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan korosi, melainkan juga untuk mendapatkan sifat mampu cor yang baik. Aluminium tuang memiliki komposisi silikon yang lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium tempa. Silikon membentuk sistem eutektik sederhana dengan aluminium, sehingga pada tahap akhir pembekuan akan ada aluminium cair yang tetap encer untuk membeku secara normal ke rongga cetakan. Kehadiran silikon pada paduan aluminium dengan *range* 4–12 wt. % mampu menghasilkan pengecoran yang berkualitas meskipun dengan variasi ketebalan dinding cetakan yang rumit^[2].

Aluminium tuang memiliki sifat-sifat yang menguntungkan dan juga merugikan. Sifat-sifat yang menguntungkan dari aluminium tuang yaitu^[8]:

- Titik lebur rendah;
- Fluiditas bagus;
- Struktur butir dapat dikontrol;
- Kualitas permukaan bagus;
- Kelarutan gas rendah (kecuali hidrogen);
- Bisa dikuatkan dengan perlakuan panas.

Sedangkan sifat-sifat yang merugikan dari aluminium tuang yaitu^[8]:

- Penyusutan cukup tinggi (4–8 %);
- Kelarutan hidrogen tinggi;
- Dapat mengalami *hot cracking*;
- Keuletan rendah.

2.1.2 Sifat-Sifat Paduan Aluminium AC4B

AC4B merupakan paduan aluminium tuang yang mengikuti tatanama JIS (Japan Industrial Standard)^[2]. Paduan aluminium AC4B ini memiliki kesetaraan dengan paduan aluminium 333.0. Menurut standar klasifikasi AA, aluminium jenis ini termasuk ke dalam paduan Al–Si–Cu. Pada Tabel 2.1 diperlihatkan komposisi paduan aluminium AC4B serta perbandingannya dengan paduan aluminium 333.0^{[9][10]}. Sedangkan karakteristik yang dimiliki oleh paduan aluminium AC4B atau paduan aluminium 333.0 hasil pengecoran (*as-cast*) diperlihatkan pada Tabel 2.2:

Tabel 2.1 Perbandingan unsur paduan pada paduan aluminium AC4B dan 333.0^{[9][10]}

Elemen Paduan	AC4B		333	
Si	7 – 10	wt. %	8 – 10	wt. %
Fe	0.8	wt. % maks	1	wt. % maks
Cu	2 – 4	wt. %	3 – 4	wt. %
Mn	0.5	wt. % maks	0.5	wt. % maks
Mg	0.5	wt. % maks	0.5	wt. % maks
Ni	0.35	wt. % maks	0.5	wt. % maks
Zn	1	wt. % maks	1	wt. % maks
Sn	0.1	wt. % maks	-	wt. % maks
Ti	0.1	wt. % maks	0.25	wt. % maks

Tabel 2.2 Karakteristik yang dimiliki paduan aluminium AC4B^[2]

Karakteristik	Nilai	Satuan
Kekuatan Tarik	≥ 193	MPa
Kekerasan	65 – 100	HB
Modulus Elastisitas	73000	MPa
Modulus Geser	27400	MPa
Kekuatan Geser	119	MPa
Titik Lebur	516 – 585	°C
Konduktivitas Panas	105	W/m-K
Difusi Panas	389	J/g

2.1.3 Pengaruh Unsur Paduan pada Paduan Aluminium AC4B

2.1.3.1 Silikon (Si)

Silikon pada paduan aluminium tuang dapat menurunkan temperatur lebur. Semakin mendekati komposisi eutektiknya, maka temperatur lebur akan semakin rendah. Selain itu, silikon juga dapat meningkatkan fluiditas, dan mengurangi kemungkinan terjadinya *hot-cracking*^[11].

Kelarutan silikon dalam aluminium pada temperatur ruang tidak lebih dari 0.1 wt. % saja, sehingga sebagian besar silikon membentuk fasa sendiri^[11]. Pada paduan aluminium AC4B silikon membentuk fasa eutektik bersama aluminium pada temperatur ruang^[12]. Morfologi silikon yang seperti ini menimbulkan sifat aluminium menjadi lebih keras dan getas. Oleh karena itu, semakin banyak kandungan silikon pada paduan aluminium maka kekuatan akan meningkat dan keuletan menurun^[13].

2.1.3.2 Tembaga (Cu)

Tujuan utama penambahan tembaga pada aluminium adalah untuk meningkatkan sifat mekanik. Sifat mekanik aluminium dapat meningkat jika ditambahkan 12 wt. % tembaga, namun penambahan yang melebihi batas tersebut cenderung memberikan ketegangan. Peningkatan sifat mekanik mencapai nilai maksimalnya ketika paduan aluminium yang mengandung tembaga diberikan perlakuan pengerasan endapan (*precipitation hardening*). Terbentuknya fasa Al_2Cu halus yang terdispersi merata di seluruh paduan menambah kekerasan dan kekuatan aluminium. Selain itu, tembaga juga dapat meningkatkan sifat aluminium terhadap temperatur tinggi dan meningkatkan *machinability*^[11]. Namun, penambahan tembaga pada aluminium juga memiliki efek yang

merugikan. Efek merugikan tersebut antara lain menurunnya keuletan dan menurunnya ketahanan korosi^[14].

2.1.3.3 Besi (Fe)

Besi merupakan pengotor yang paling banyak ditemukan pada aluminium. Kelarutan besi dalam aluminium cair cukup tinggi, namun karena kelarutannya hanya 0.04 wt. % pada temperatur ruang, besi akan berkombinasi dengan unsur lain membentuk fasa intermetalik^[13]. Efek positif yang diberikan besi pada paduan aluminium antara lain meningkatkan kekuatan dan kekerasan, mengurangi resiko hot-cracking, serta mengurangi resiko *soldering* antara aluminium dengan *dies*. Sedangkan keberadaan fasa intermetalik pada aluminium menjadi efek merugikan yang diberikan besi pada aluminium sebab fasa intermetalik memiliki titik leleh yang tinggi dan cukup keras sehingga dapat menyebabkan masalah saat *machining*^[14].

2.1.3.4 Magnesium (Mg)

Kelarutan atom magnesium dalam aluminium murni pada suhu kamar cukup besar yaitu 2.5 wt. %. Dengan kelarutan tersebut, magnesium mampu meningkatkan kekerasan aluminium dengan membentuk larutan padat (*solid solution*). Jika terdapat silikon, magnesium dapat memberikan pengerasan endapan (*precipitation hardening*). Magnesium dan silikon bereaksi membentuk fasa Mg₂Si sebagai presipitat^[11].

2.1.3.5 Mangan (Mn)

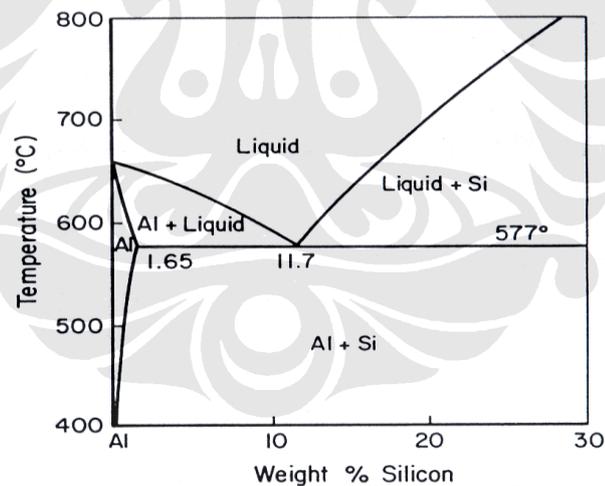
Kelarutan mangan pada aluminium di suhu kamar maksimal 0.3 wt. %. Mangan pada aluminium dapat berwujud larutan padat dan endapan fasa intermetalik. Mangan biasa dikombinasikan bersama besi untuk meningkatkan sifat mampu cor dan mengurangi penyusutan (*shrinkage*). Penambahan mangan pada aluminium juga dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan^[11].

2.1.3.6 Nikel (Ni)

Kelarutan nikel pada aluminium di suhu kamar tidak lebih dari 0.04 wt. %. Lebih dari batas ini, nikel hadir dalam bentuk intermetalik, biasanya berkombinasi dengan besi, mangan, atau silikon. Nikel dianggap sebagai pengotor dan jumlah nikel pada aluminium biasanya dibatasi agar tidak lebih dari 0.5 wt. %. Namun secara umum, penambahan nikel pada aluminium tuang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada temperatur tinggi, serta mengurangi koefisien ekspansi^[13].

2.1.3.7 Seng (Zn)

Jika penambahan seng pada aluminium melebihi 3 wt. %, kekuatan aluminium dapat meningkat pesat. Namun, jika kurang dari itu seng hanya dianggap tidak berguna. Efek-efek merugikan seng adalah menurunkan kemampuan cor, meningkatkan kecenderungan terjadinya *stress corrosion cracking*, *shrinkage*, dan retak panas^[11].

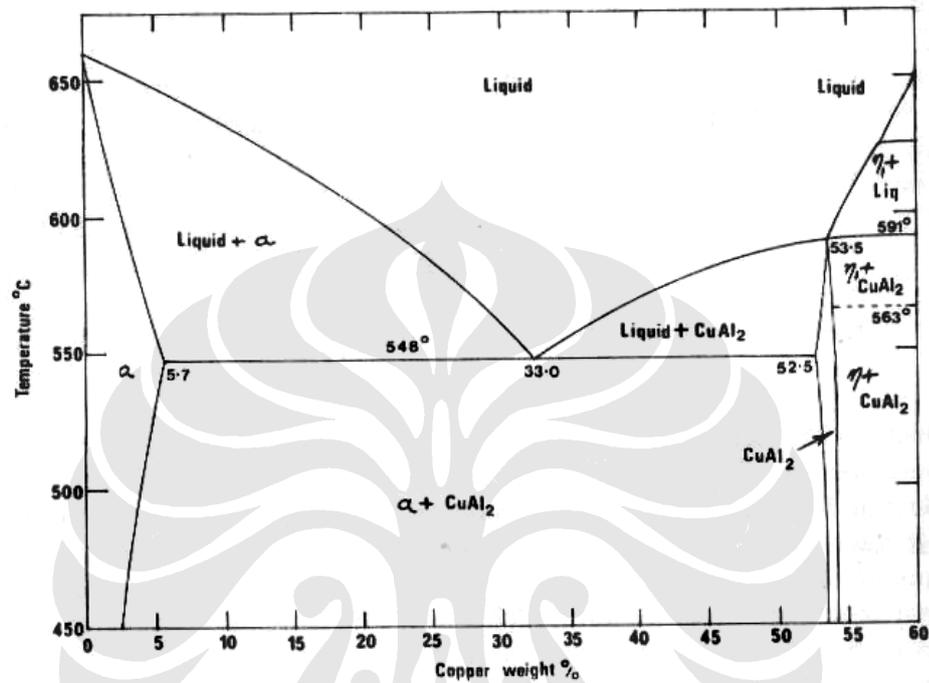


Gambar 2.1 Diagram fasa Al-Si^[15]

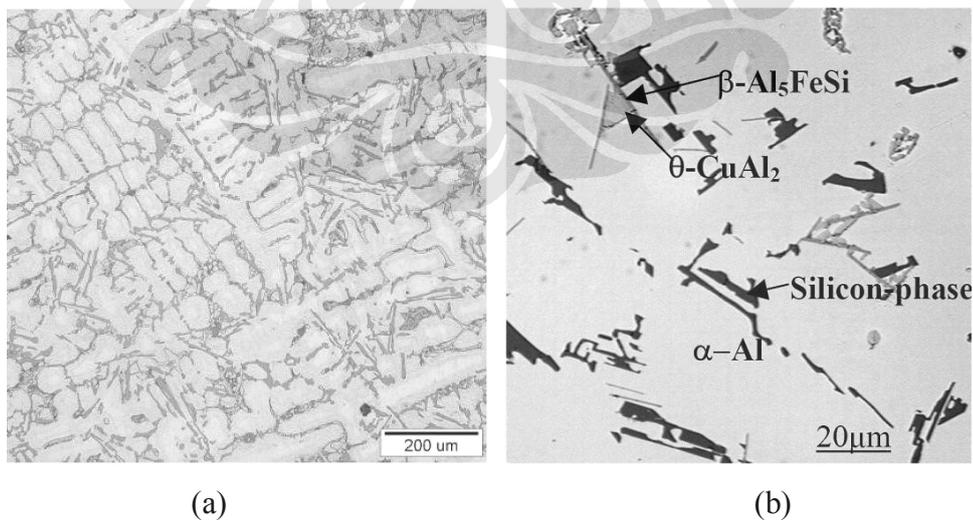
2.1.4 Fasa-Fasa yang Terdapat pada Paduan Aluminium AC4B

Seperti yang terlihat pada Tabel 2.1, komposisi unsur paduan terbanyak pada paduan aluminium AC4B adalah silikon dan tembaga. Paduan aluminium AC4B memiliki kandungan silikon sebanyak 7–10 wt. % dan tembaga sebanyak 2–4 wt. %. Dengan komposisi tersebut, fasa-fasa yang dominan terdapat pada

paduan aluminium AC4B merupakan fasa-fasa yang terdapat pada diagram fasa Al-Si dan Al-Cu seperti yang terlihat pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2. Fasa-fasa lain dari unsur paduan lain juga dapat terbentuk, namun dalam intensitas yang lebih sedikit.

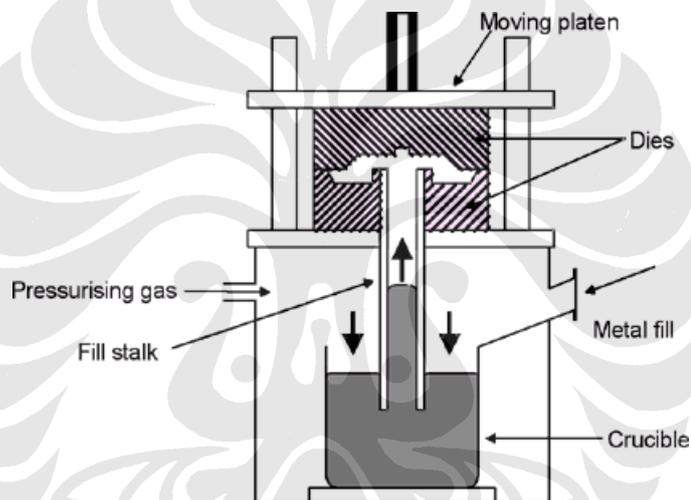


Gambar 2.2 Diagram fasa Al Cu^[16]



Gambar 2.3 (a) Mikrostruktur dendritik pada Al-9Si-4Cu *as-cast*, (b) Fasa-fasa penting pada Al-7Si-2Cu *as-cast*^{[17][18]}

Struktur mikro dari paduan Al-9Si-4Cu *as-cast* ditunjukkan pada Gambar 2.3a. Pada gambar tersebut terlihat adanya dendrit-dendrit aluminium primer berwarna terang dan fasa Al-Si berbentuk lamelar dengan fasa silikon berwarna abu-abu gelap. Dengan perbesaran yang lebih besar, struktur mikro dari paduan Al-7Si-2Cu *as-cast* terlihat pada Gambar 2.3b. Gambar tersebut memperlihatkan adanya fasa-fasa intermetalik selain aluminium primer dan silikon yang terbentuk dari unsur paduan lain. Intermetalik terbanyak adalah Al_2Cu yang terbentuk karena sudah terlampauinya batas daya larut Cu pada Al. Selain itu, intermetalik lain yang bisa dijumpai pada paduan aluminium tuang Al-Si-Cu adalah Al_5FeSi , $\text{Al}_{15}\text{Mn}_3\text{Si}_2$, Mg_2Si , dan $\text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$ ^{[17][18]}.



Gambar 2.4 Prinsip kerja mesin *low pressure die casting*^[19]

2.2 LOW PRESSURE DIE CASTING

2.2.1 Prinsip LPDC

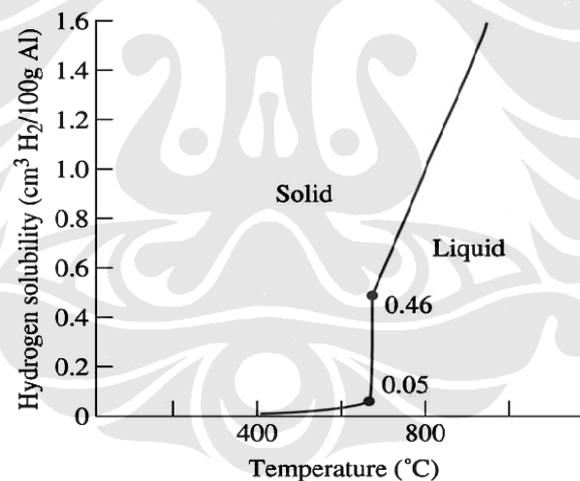
Penamaan “*low pressure die casting*” berhubungan dengan mekanisme dan kondisi pengecoran yang terjadi. *Low pressure die casting* (LPDC) merupakan proses pengecoran dengan menggunakan cetakan permanen (*dies*) yang biasa diaplikasikan untuk pengecoran logam-logam dengan temperatur lebur tidak terlalu tinggi, contohnya aluminium, timah dan seng. Prinsip kerja dari mesin LPDC diperlihatkan melalui Gambar 2.4. Dibawah cetakan (*dies*) terdapat pipa vertikal yang menghubungkan *dies* dengan *holding furnace*. Ketika *holding furnace* diberikan tekanan, sejumlah aluminium yang terdapat dalam pipa vertikal

akan naik. Dengan turbulensi yang minimal, rongga cetakan akan terisi perlahan hingga penuh, kemudian membeku dari ujung paling jauh (bagian paling atas) ke bagian *gate* (paling bawah)^[3].

2.2.2 Dua Parameter Penting pada LPDC

2.2.2.1 Kelarutan Hidrogen

Hidrogen merupakan satu-satunya gas yang memiliki kelarutan yang cukup besar pada aluminium cair dan paduannya. Pada Gambar 2.5 terlihat bahwa kelarutan hidrogen pada aluminium meningkat tajam ketika aluminium sudah memasuki fasa cairnya. Penyerapan hidrogen pada aluminium cair terjadi apabila ada kontak antara permukaan aluminium cair dengan uap air pada atmosfer sehingga air tereduksi menghasilkan hidrogen^[20].



Gambar 2.5 Peningkatan kelarutan hidrogen pada aluminium pada tekanan parsial $\text{H}_2=1\text{atm}$ ^[21]

Jumlah hidrogen yang tinggi pada aluminium cair dapat berdampak buruk sebab selama pendinginan hidrogen terlarut yang kelarutannya sangat rendah pada keadaan padat, berkumpul dalam bentuk molekulnya sehingga menghasilkan porositas pada benda cor. Dalam praktiknya, mekanisme masuknya hidrogen ke aluminium cair tidak bisa dicegah dengan mudah. Selain dengan melakukan proses upaya pengangkatan hidrogen, hidrogen pada produk cor diatur

sedemikian rupa sehingga posisi dan morfologi dari hidrogen tersebut tidak berdampak buruk terhadap produk cor. Hidrogen yang berukuran halus dan terdistribusi merata pada produk cor lebih diinginkan daripada yang berukuran besar dan pada satu tempat saja. Salah satu cara untuk mendapatkan hidrogen yang berukuran halus dan terdistribusi merata adalah dengan mempercepat proses pembekuan. Dengan proses pembekuan yang lebih cepat, hidrogen tidak akan sempat berdifusi dan membentuk molekul gas hidrogen yang besar^[22].

Sumber-sumber hidrogen pada aluminium cair antara lain^[20]:

- **Atmosfir dapur.** Dapur yang menggunakan api sebagai peleburnya dapat menghasilkan hidrogen dari minyak yang tidak terbakar sempurna.
- **Bahan baku aluminium.** *Scrap* dan *ingot* dapat mengandung oksida, produk korosi, dan ikutan-ikutan dari cetakan sebelumnya seperti *coating*, dapat menghasilkan hidrogen melalui reduksi senyawa organiknya atau pun karena terkontaminasi oleh air.
- **Flux.** Kebanyakan garam-garam *flux* yang digunakan pada aluminium bersifat higroskopis sehingga dapat membawa hidrogen masuk ke aluminium cair melalui dekomposisi air.
- **Alat-alat dapur.** Alat-alat dapur seperti penggaruk, pengaduk, sekop dan penyedok dapat memberikan hidrogen ke aluminium apabila tidak bersih. Sisa-sisa *flux* dan juga refraktori dapur yang tertempel dapat menjadi sumber hidrogen yang potensial.
- **Reaksi logam dalam cetakan.** Turbulensi logam yang besar selama proses pengisian cetakan dapat memerangkap udara. Jika udara tidak dapat keluar sebelum cetakan membeku maka hidrogen akan terperangkap di dalam produk cor.

Secara alami, keberadaan oksida aluminium pada permukaan cairan dapat menahan mekanisme masuknya hidrogen dari atmosfir, namun jika oksida tersebut mengalami gangguan dan rusak, pelarutan hidrogen akan terjadi dengan cepat. Salah satu upaya untuk menghilangkan hidrogen dari aluminium cair adalah dengan melakukan *degassing*. *Degassing* dilakukan dengan memasukan senyawa kimia kering yang mengandung nitrogen, argon, klorin atau freon, namun yang paling umum digunakan adalah senyawa heksakloroetana. Senyawa tersebut akan

terurai pada aluminium cair menjadi fluks gas yang mampu mengikat dan mengangkat hidrogen keluar dari aluminium cair dengan mekanisme difusi tekanan parsial. Selain itu, jumlah hidrogen pada aluminium cair dapat dikurangi dengan menahan temperatur aluminium cair mendekati temperatur *liquidus* dalam waktu yang lama^[22].

2.2.2.2 Pembentukan Oksida

Aluminium dan paduannya mudah teroksidasi dalam keadaan padat maupun cair. Namun, aluminium dalam keadaan cair lebih mudah teroksidasi daripada aluminium dalam keadaan padat, sebab laju oksidasi akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Oksida dapat terbentuk melalui beberapa mekanisme yaitu oksidasi langsung dengan udara, reaksi dengan uap air, atau pun reaksi *aluminothermic* dengan logam lain seperti silikon dan besi yang terdapat pada refraktori dan peralatan. Oksida yang terbentuk baik pada aluminium padat maupun cair memberikan keuntungan berupa halangan terhadap difusi hidrogen. Namun, karena berat jenis oksida hampir sama dengan aluminium cair, adanya turbulensi dapat menyebabkan tercampurnya partikel oksida ke dalam aluminium cair^[22].

Aluminium cair biasanya diberikan perlakuan khusus untuk mencegah terbentuknya oksida dan menghilangkannya. Perlakuan tersebut biasanya disebut dengan istilah *fluxing*. *Fluxing* dilakukan dengan memasukan senyawa kimia yang mengandung klorin, flourin, klorida, dan florida ke dalam *molten*. Ada empat jenis *flux* menurut fungsinya yaitu^[20]:

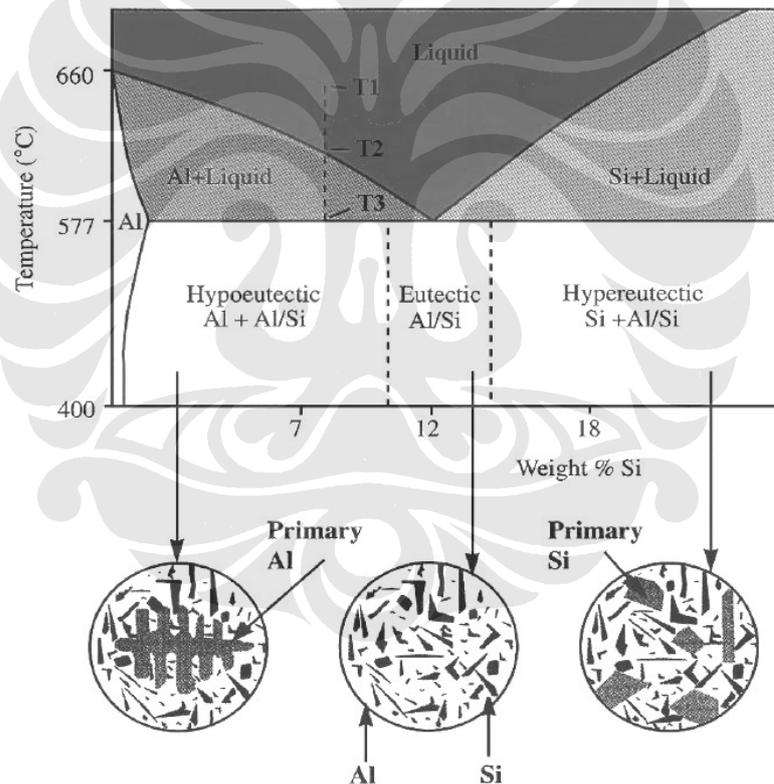
1. *Cover flux*, berfungsi mencegah reaksi oksidasi di permukaan cairan serta menghalangi masuknya hidrogen.
2. *Cleaning flux*, berfungsi untuk membasahi oksida aluminium dalam *molten* agar terangkat ke permukaan dan mudah untuk dipisahkan dari *molten*.
3. *Drossing flux*, berfungsi mengembalikan aluminium cair yang terperangkap oksida aluminium
4. *Refining flux*, berfungsi untuk membersihkan aluminium cair dari unsur-unsur pengotor yang tidak diinginkan seperti magnesium, kalsium, lithium, natrium dan kalium.

2.2.3 Proses Pembekuan

Pada dasarnya logam mengalami tiga tahap kontraksi ketika membeku dari cair ke padat, yaitu:

1. kontraksi cair,
2. kontraksi pembekuan, dan
3. kontraksi padat.

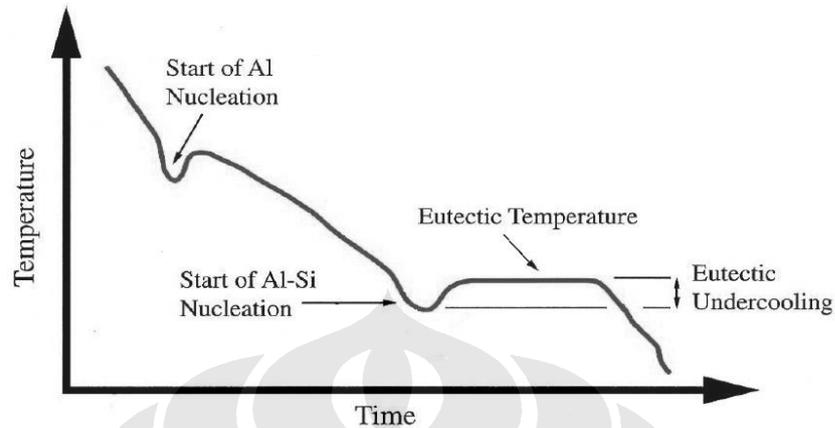
Kontraksi cair terjadi ketika logam mendingin dari temperatur tuang ke temperatur beku. Kontraksi pembekuan terjadi ketika logam melalui tahap pembekuan. Sedangkan kontraksi padat terjadi pada saat logam mendingin dari temperatur beku ke temperatur ruang. Kontraksi cair dan pembekuan dapat menyebabkan *shrinkage* sedangkan kontraksi padat dapat menyebabkan *hot-tear*^[23].



Gambar 2.6 Diagram fasa Al-Si dan struktur mikro yang terbentuk berbeda pada komposisi silikon yang berbeda^[12].

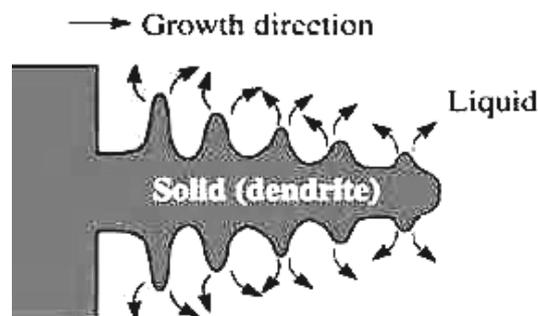
Paduan aluminium AC4B termasuk paduan *hypoeutectic* antara aluminium dengan silikon. Pada Gambar 2.6, temperatur tuang adalah T1, temperatur *liquidus* adalah T2, dan temperatur solidus adalah T3. Perbedaan

antara temperatur tuang (T_1) dan temperatur *liquidus* (T_2) dinamakan *superheat*. Sedangkan daerah diantara temperatur *liquidus* dan temperatur *solidus* (T_3) dinamakan *mushy zone* (zona lumpur).



Gambar 2.7 Pembekuan aluminium - silikon *hypoeutectic*^[12]

Grafik pembekuan pada paduan aluminium-silikon diperlihatkan melalui Gambar 2.7. Pembekuan dimulai ketika aluminium cair mencapai temperatur T_2 , ditandai dengan terbentuknya aluminium primer (pro-eutektik). Namun, awal pembekuan harus terjadi dibawah temperatur T_2 untuk dapat membentuk inti awal aluminium primer. Disini terlihat adanya selisih temperatur antara T_2 dan temperatur pembekuan aktual dibawah T_2 , selisih temperatur tersebut dinamakan *undercooling*. Aluminium primer yang terbentuk memiliki struktur dendritik (seperti terlihat pada Gambar 2.8) dan merupakan larutan padat (*solid solution*) antara aluminium dengan silikon. Pembekuan terus berlangsung dan tidak terjadi pada satu temperatur saja, melainkan pada rentang temperatur T_2 sampai mencapai temperatur T_3 ^[12].



Gambar 2.8 Struktur dendrit yang sedang tumbuh^[21]

Dendrit merupakan struktur aluminium padat menyerupai pohon yang tumbuh ketika aluminium cair yang *undercooled* membeku^[21]. Dalam Gambar 2.8 diperlihatkan bagaimana dendrit terus menjalar diikuti dengan pertumbuhan lengan dendrit (*dendrite arms*). Panjang lengan dendrit utama dinamakan *dendrite arm spacing* (DAS), sedangkan jarak antara dua buah lengan dendrit dari lengan utamanya dinamakan *secondary dendrite arm spacing* (SDAS)^[24]. Nantinya, dendrit dapat dikenali sebagai butir-butir aluminium pada mikrostruktur akhir^[12].

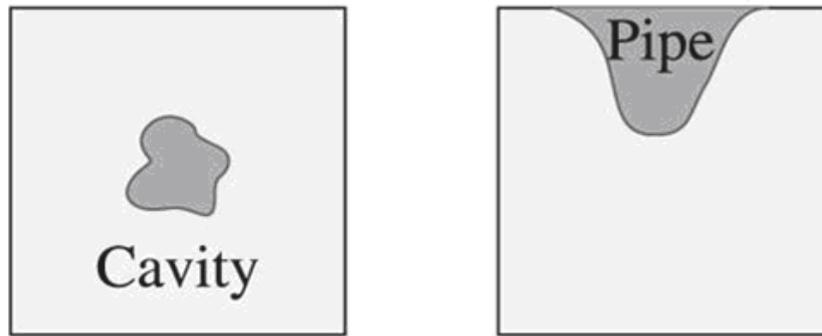
Pertumbuhan dendrit berhenti ketika aluminium cair sudah mencapai temperatur T3. Pada temperatur tersebut, semua aluminium cair yang belum membeku akan berubah menjadi fasa eutektik aluminium–silikon. Sama halnya seperti pembekuan pada T2, awal pembekuan eutektik juga harus terjadi di bawah temperatur T3 (*undercooling*) untuk membentuk inti awal. Namun, tidak seperti pembentukan aluminium primer, pembentukan fasa eutektik aluminium–silikon terjadi pada temperatur yang konstan. Hasilnya berupa struktur lamelar antara silikon dan aluminium. Dibawah temperatur T3, fasa-fasa yang terjadi karena adanya penambahan unsur lain seperti Cu dan Mg biasanya mulai terbentuk tergantung komposisi paduannya^[12].

2.2.4 Cacat-Cacat pada Produk LPDC

2.2.4.1 *Shrinkage*

Kebanyakan logam mengalami pengurangan volume ketika berubah dari cair menjadi padat. Pada paduan aluminium, volume penyusutan yang terjadi selama pembekuan berkisar antara 3.5–8.5 %. Hal ini diperparah dengan bentuk produk cor yang ketebalannya tidak seragam sehingga terjadi perbedaan kecepatan pembekuan diantara bagian-bagian produk tersebut. Fenomena kontraksi tersebut dapat menciptakan lubang atau rongga pada produk cor^[23].

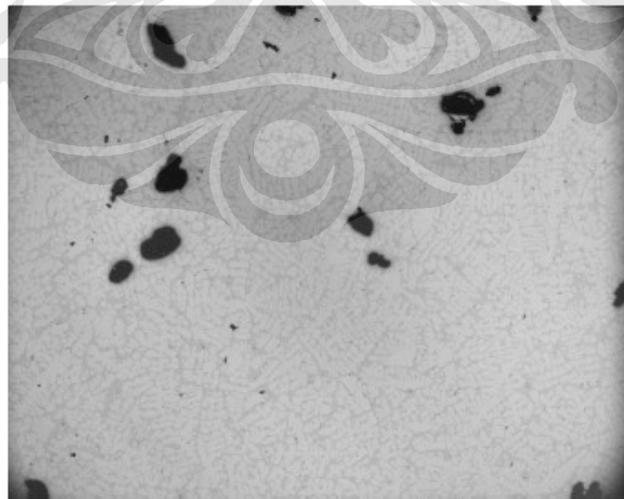
Shrinkage pada produk aluminium terdapat dalam dua jenis yaitu *cavity* (rongga) dan *pipe* (pipa). Kedua tipe tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9 . Tipe pipa ditandai dengan rongga kasar yang tertarik ke dalam bagian yang tebal sedangkan tipe rongga terdapat di dalam bagian yang tebal^[21]. Tipe rongga tidak terlihat dari luar namun kadang dapat diketahui dengan adanya lubang kecil pada bagian tebal yang jika dibelah merupakan rongga kasar pula^[25].



Gambar 2.9 Dua jenis shrinkage^[21]

2.2.4.2 Porositas

Pada aluminium, kebanyakan porositas merupakan kombinasi dari *shrinkage* dan gas hidrogen. Selama pembekuan aluminium akan berkontraksi. Ketidakmampuan logam cair untuk melakukan *feeding* melalui daerah interdendritik menyebabkan *molten* dikelilingi padatan dan terperangkap di dalamnya, hal ini menyebabkan *shrinkage*. Di sisi lain, kelarutan gas hidrogen juga berkurang, proses pembebasan gas hidrogen selama pembekuan tersebut menyebabkan porositas pula. Contoh porositas yang terjadi pada suatu benda *casting* diperlihatkan pada Gambar 2.10^[26].



Gambar 2.10 Porositas pada aluminium^[27]

2.2.4.3 Retak Panas

Retak panas pada produk aluminium dapat terlihat sebagai garis-garis hitam kasar yang terlihat di permukaan. Retak panas kebanyakan terlihat pada bagian-bagian bersudut pada benda casting. Penyusutan selama pembekuan dan kontraksi termal dapat menyebabkan adanya tegangan yang signifikan. Karena hal tersebut, retak dapat terjadi pada bagian-bagian dengan kekuatan yang masih rendah. Pada daerah yang demikian biasanya logam belum semuanya membeku dan terjadi *hot spot*^[26].

2.2.4.4 Misrun

Ada dua tanda *misrun* yang bisa dikenali pada produk aluminium. *Misrun* pada produk aluminium dapat terlihat sebagai lubang pada bagian yang tipis. Sisi-sisi lubang tersebut cembung dan halus serta daerah di sekelilingnya juga halus dan mengkilat. *Misrun* juga bisa terlihat sebagai garis cekung pada pinggir bagian yang tipis yang menunjukkan adanya dua aliran aluminium cair yang belum sempat bertemu.

Penyebab terjadinya *misrun* antara lain^{[23][25]}:

1. Temperatur tuang yang terlalu rendah,
2. Fluiditas aluminium cair yang rendah,
3. Sistem *venting* yang bermasalah,
4. Kurangnya *coating* atau pelapisan,
5. Temperatur *dies* yang terlalu rendah, dan
6. Tersumbatnya *gate*.

2.3 GRAIN BOUNDARY HARDENING

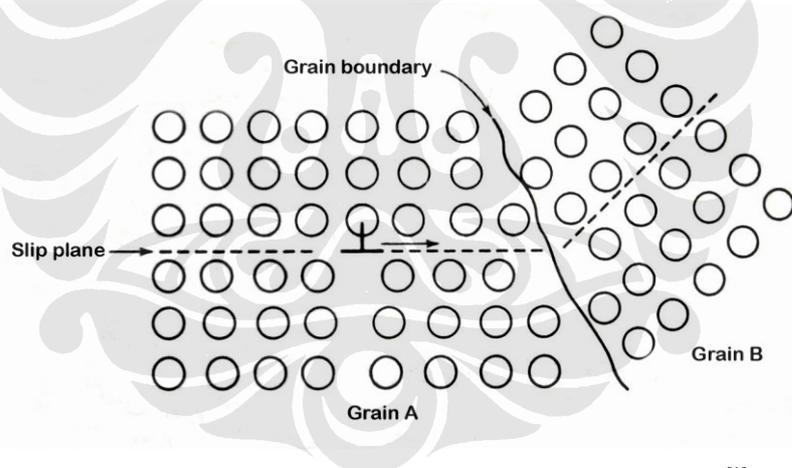
Hampir semua material kristalin padat tersusun atas kumpulan banyak kristal kecil yang disebut butir. Dalam setiap butir, semua sel satuan teratur dalam satu arah dan satu pola tertentu. Bentuk butir dalam logam biasanya diatur oleh adanya butir-butir disekitarnya. Pada batas butir, antara dua butir yang berdekatan terdapat daerah transisi yang tidak searah dengan pola butir keduanya. Ketidakteraturan orientasi antara butiran yang berdekatan menghasilkan tumpukan atom yang kurang efisien sepanjang batas butir. Oleh karena itu, atom

di sepanjang batas butir memiliki energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan atom yang terdapat di dalam butir^[16].

Mekanisme penghambatan dislokasi pada batas butir dapat dilihat pada Gambar 2.11. Butir yang bersebelahan dibatasi oleh batas butir dan memiliki arah kristal yang berbeda. Selama terjadi deformasi plastis, pergerakan dislokasi harus mampu melintasi batas butir menuju butir sebelahnyanya. Ketika sampai di batas butir, dislokasi tertahan oleh batas butir tersebut. Ada dua alasan mengapa batas butir dapat menjadi penahan pergerakan dislokasi yaitu^[16]:

1. Karena dua butir bersebelahan orientasi kristalnya berbeda, dislokasi yang melewati batas butir tersebut harus mengubah arah pergerakannya.
2. Ketidakteraturan pada daerah batas butir akan menghasilkan diskontinuitas bidang *slip* dari butir yang satu ke yang lain.

Berdasarkan fakta diatas, dapat dikatakan bahwa semakin kecil ukuran butir dari suatu logam maka akan semakin keras dan kuat logam tersebut.



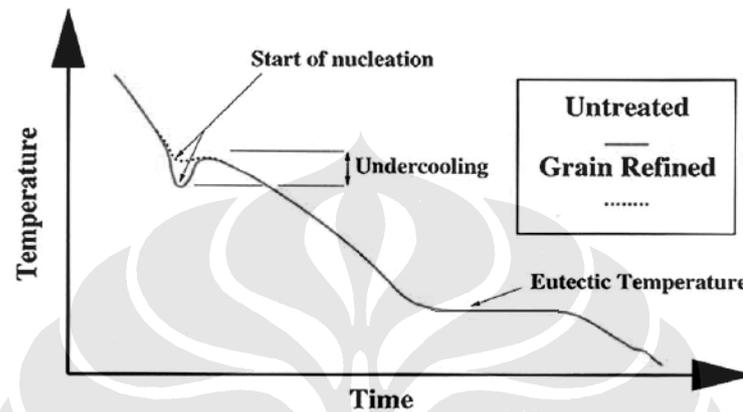
Gambar 2.11 Pergerakan dislokasi yang terhambat batas butir^[1]

2.4 PENGHALUS BUTIR

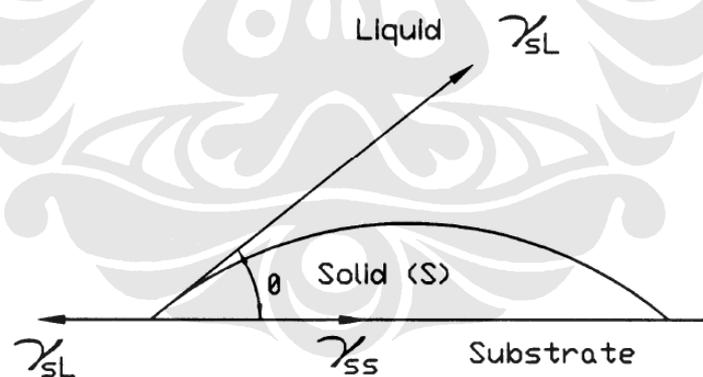
2.4.1 Prinsip Penghalus Butir

Penghalus butir merupakan suatu material yang ditambahkan ke dalam *molten* paduan untuk membentuk butir yang halus dengan cara menekan pertumbuhan butir yang memanjang (*columnar*) dan menghasilkan butir yang rata sisi (*equiaxed*)^[31]. Butir-butir yang halus dapat diperoleh jika pada awal pembekuan terdapat banyak dendrit dan semuanya tumbuh dalam kecepatan yang

sama. Hal ini dapat dicapai apabila pembentukan inti yang terjadi berada dekat dengan temperatur *liquidus*, atau dengan kata lain *undercooling* yang terjadi seminimal mungkin, seperti yang terlihat pada Gambar 2.12. *Undercooling* yang minimal dicapai jika terdapat banyak partikel dimana aluminium dapat dengan cepat membentuk inti dan tumbuh pada partikel tersebut^[5].



Gambar 2.12 Perbandingan grafik pembekuan paduan aluminium dengan dan tanpa penghalus butir^[5]



Gambar 2.13 Daerah antarmuka *molten*, substrat dan padatan^[28]

Penghalusan butir berhubungan langsung dengan proses pembentukan dan pertumbuhan inti dari butir-butir aluminium. Hal tersebut berdasarkan pada teori pembentukan inti oleh Volmer dan Weber (1925). Teori ini melibatkan perhitungan adanya sudut kontak, energi permukaan antarmuka, serta *driving force* untuk menentukan laju pertumbuhan inti per unit volume. Pada Gambar 2.13 terlihat adanya fasa padat yang menempel pada suatu partikel dengan γ_{SL}

adalah energi permukaan antarmuka *solid-liquid*, γ_{ss} adalah energi permukaan antarmuka *solid-solid*, dan θ adalah sudut kontak. Menurut teori ini, dengan adanya partikel yang heterogen pada *molten* maka sudut kontak θ akan makin mendekati nol. Dengan sudut kontak yang mendekati nol maka aksi pembasahan pada partikel akan terjadi dengan efektif dan laju pertumbuhan inti per unit volume akan meningkat^[28].

2.4.2 AlTiB Sebagai Penghalus Butir

Pada Tabel 2.3 diberikan macam-macam jenis penghalus butir yang biasa beredar secara komersial di pasaran. Penghalus butir untuk aluminium yang sering digunakan adalah *master alloy* aluminium-titanium dan aluminium-titanium-boron^[29].

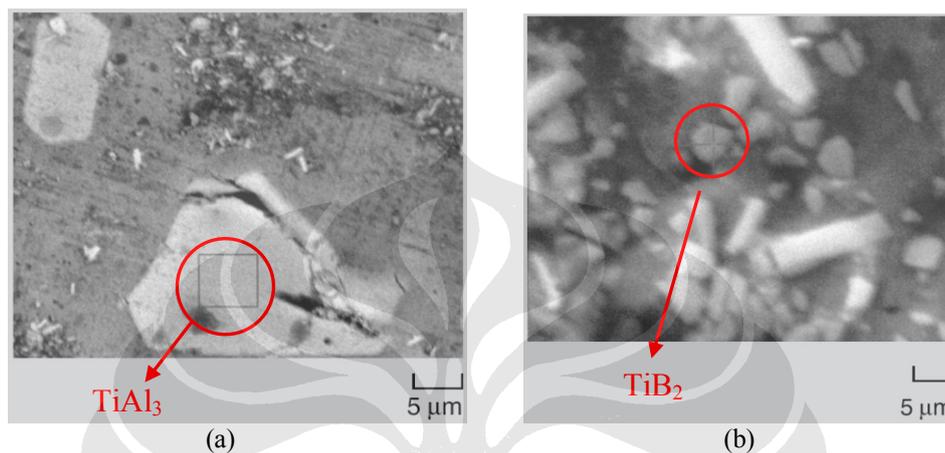
Tabel 2.3 Jenis-jenis penghalus butir pada aluminium^[29]

Tipe Paduan	Komposisi
Al-Ti	Al-10Ti, Al-6Ti
Al-Ti-B	Al-3Ti-1B, Al-5Ti-1B, Al-5Ti-0.6B, Al-3Ti-0.2B, Al-5Ti-1B, Al-5Ti-0.2B, Al-10Ti-0.4B, Al-1.6Ti-1.4B (TiBloy for hypoeutectic Al-Si alloys), Al-1.2Ti-0.5B (Hydloy), Al-3Ti-3B, Al-1Ti-3B
Al-B	Al-10B, Al-5B, Al-3B, Al-10Sr-2B, Strobloya (Al-10Sr-1.6Ti-1.4B)
Al-Ti-C	Al-6Ti-0.02C, Al-3Ti-0.15C
Al-Sc	Al-1Sc, Al-2Sc
Mg-Zr	AM cast (Mg-25Zr), Zirmax (Mg-33.3Zr)

Pada penambahan *master alloy* jenis Al-Ti, pada awal pembekuan akan terbentuk partikel $TiAl_3$ sebagai pembentuk inti. Hal tersebut terjadi karena jika pada paduan aluminium cair terdapat titanium dengan kadar lebih besar dari 0,15 %, maka pada saat pembekuan, pembentukan inti $TiAl_3$ akan terjadi lebih dahulu sebelum inti aluminium terbentuk. Kemudian aluminium akan membeku pada permukaan $TiAl_3$ sehingga *undercooling* berkurang dan ukuran butir menjadi halus^[5].

Hal yang berbeda terjadi pada penghalusan butir menggunakan *master alloy* jenis Al-Ti-B yang menggunakan TiB_2 sebagai partikel pembentuk inti. Penghalus butir jenis ini memiliki rasio Ti:B melebihi nilai stoikiometri TiB_2 atau sebesar minimal $\%Ti / \%B = 2.22$. Dengan komposisi tersebut, analisa struktur mikro dari penghalus butir jenis ini akan menunjukkan adanya partikel TiB_2 dan

TiAl₃ di dalamnya (Gambar 2.14). Pada saat peleburan, partikel TiAl₃ akan langsung terlepas ke dalam aluminium cair ketika penghalus butir kontak dengan *molten*, sedangkan partikel TiB₂ tidak larut ketika dimasukkan ke *molten* dan akan tetap berwujud partikel padat dengan ukuran 0.5 sampai 5 µm ketika berada dalam *molten*^{[5][30]}.



Gambar 2.14 Mikrostruktur Al-5Ti-1B yang menunjukkan (a) fasa TiAl₃, (b) fasa TiB₂^[30]

Gambar 2.14 memperlihatkan bagaimana struktur mikro dari *master alloy* Al-5Ti-1B yang dilakukan pengujian SEM. Hasil analisa *backscattered electron* dan EDS memperlihatkan bahwa fasa berwarna putih berbentuk balok agak melingkar pada gambar 2.14a adalah fasa TiAl₃ yang memiliki komposisi 62.37 % Al, 37.8 % Ti, dan 0.05 % Si, sedangkan fasa berwarna abu-abu gelap berbentuk melingkar pada gambar 2.14b adalah fasa TiB₂ yang memiliki komposisi 28.93 % Al, 7.46 % Ti dan 63.61 % B^[30].

Ada beberapa teori mengenai mekanisme pembentukan inti pada aluminium yang ditambahkan penghalus butir yang mengandung borida (TiB₂, AlB₂, (Ti,Al)B₂). Teori yang paling terakhir dan yang paling lengkap adalah teori paradigma unsur terlarut yang dikemukakan oleh Johnson (1993). Menurut teori paradigma unsur terlarut borida dan partikel-partikel lainnya termasuk TiAl₃ adalah pembentuk inti yang efektif. Teori ini sekaligus membantah teori-teori sebelumnya yang mengatakan bahwa borida bukan pembentuk inti yang baik. Lebih jauh menurut teori ini, keberadaan unsur-unsur terlarut pada aluminium cair

sangat mempengaruhi pembentukan inti dari borida dan partikel-partikel lainnya^[31].

Alasan mengapa unsur-unsur terlarut sangat penting dalam mekanisme penghalusan butir adalah bahwa unsur-unsur terlarut mampu membatasi laju pertumbuhan butir. Besarnya kemampuan untuk membatasi laju pertumbuhan butir atau disebut juga kemampuan segregasi dapat dihitung melalui *growth restriction factor* (GRF)^[30]. GRF dapat dihitung dengan menggunakan rumus^[30]:

$$GRF = m \cdot C_o \cdot (k-1) \quad (2.2)$$

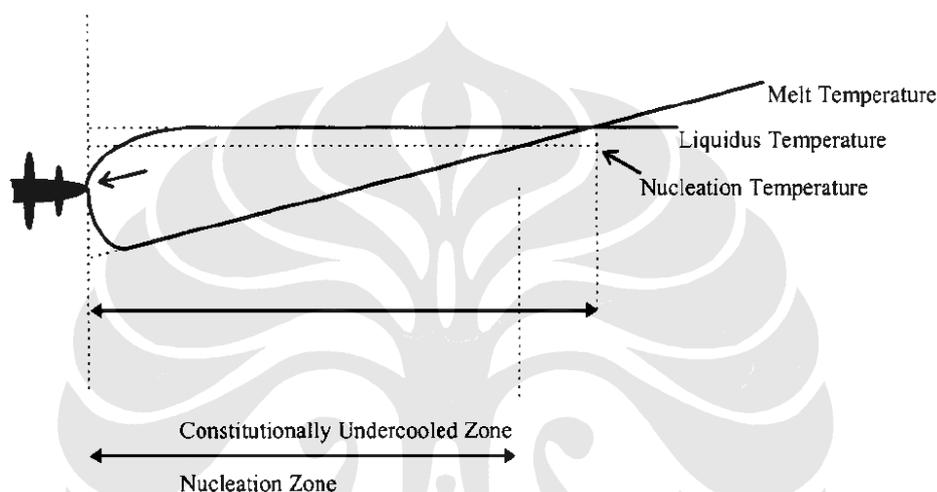
dimana m adalah kemiringan dari garis *liquidus*, C_o adalah konsentrasi unsur terlarut yang terbesar (Ti), dan k adalah koefisien partisi kesetimbangan antara molten dan padatan pada daerah antarmuka pertumbuhan butir. Pada tabel 2.4 diperlihatkan kemampuan segregasi beberapa unsur terlarut pada paduan aluminium. Titanium diketahui sebagai unsur yang memiliki daya segregasi terbesar sebab memiliki nilai k terbesar yaitu 9. Dengan nilai k yang besar, keberadaan Ti sebagai unsur terlarut pada aluminium cair mampu membatasi laju pertumbuhan butir pada daerah antarmuka pertumbuhannya^{[30][31]}.

Tabel 2.4 Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut pada aluminium^[31]

Unsur	k	m	(k - 1)m	Konsentrasi Maksimum (wt%)	Tipe Reaksi
Ti	~ 9	30.7	245.6	0.15	peritektik
Ta	2.5	70	105	0.1	peritektik
V	4	10	30	~ 0.1	peritektik
Hf	2.4	8	11.2	~ 0.5	peritektik
Mo	2.5	5	7.5	~ 0.1	peritektik
Zr	2.5	4.5	6.8	0.11	peritektik
Nb	1.5	13.3	6.6	~ 0.15	peritektik
Si	0.11	-6.6	5.9	~ 12.6	eutektik
Cr	2	3.5	3.5	~ 0.4	peritektik
Ni	0.01	-3.3	3.3	~ 6	eutektik
Mg	0.51	-6.2	3	~ 3.4	eutektik
Fe	0.02	-3	2.9	~ 1.8	eutektik
Cu	0.17	-3.4	2.8	33.2	eutektik
Mn	0.94	-1.6	0.1	1.9	eutektik

Kemampuan segregasi unsur-unsur terlarut terjadi karena unsur-unsur tersebut menciptakan zona *undercooled* mendasar di depan daerah antarmuka

pertumbuhan butir. Zona *undercooled* mendasar tersebut mengaktifkan partikel pembentuk inti lain di depan daerah antarmuka pertumbuhan butir, sehingga mengganggu pertumbuhan dari butir tersebut dan memberikan waktu kepada butir lain untuk tumbuh (Tondel, 1994). Pada Gambar 2.15 diperlihatkan adanya zona *undercooled* mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dimana pertumbuhan butir baru dapat terjadi dengan adanya unsur-unsur terlarut. Besarnya zona ini bergantung pada kemampuan dari pembentuk inti dan keadaan *molten*^[31].



Gambar 2.15 Zona *undercooled* mendasar di depan daerah antarmuka pertumbuhan dendrit^[30]

Jadi, teori paradigma unsur terlarut menambahkan sekaligus melengkapi dari teori-teori sebelumnya. TiB_2 dan $TiAl_3$ merupakan partikel pembentuk inti yang efektif. $TiAl_3$ tidak akan terbentuk jika tidak ada unsur-unsur terlarut seperti titanium dalam jumlah berlebih. TiB_2 juga tidak akan efektif sebagai penghalus butir jika tidak ada unsur-unsur terlarut yang mampu menghambat pertumbuhan butir. Teori ini juga sependapat teori pembentukan inti Duplex yang menyebutkan bahwa $TiAl_3$ sebagai partikel pembentuk inti yang tumbuh pada permukaan TiB_2 , namun sekali lagi keberadaan unsur-unsur terlarut memegang peranan yang sangat penting^[31].

2.4.3 Pengaruh Penambahan Penghalus Butir pada Paduan Aluminium AC4B

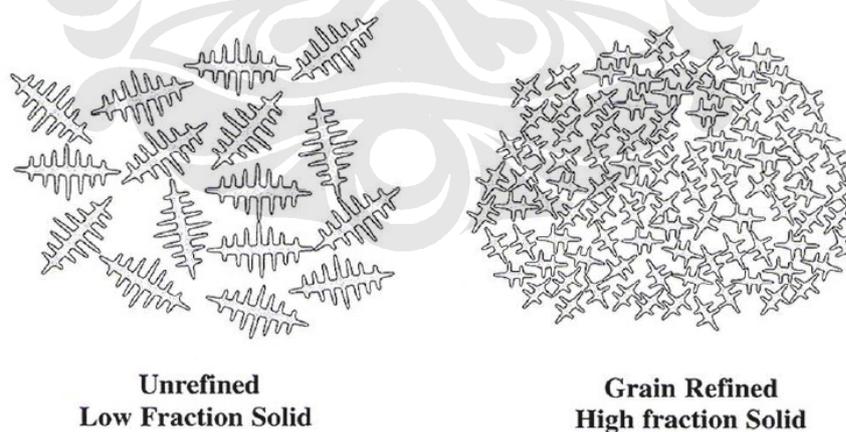
Pengaruh penambahan penghalus butir pada paduan aluminium tuang maupun aluminium tempa adalah sebagai berikut^[5]:

1. Meningkatkan sifat mekanik

Penambahan penghalus butir dapat meningkatkan sifat mekanik sebab dengan bertambah kecilnya ukuran butir maka dislokasi semakin tidak mudah bergerak seperti yang dijelaskan pada bagian II.3.

2. Meningkatkan kemampuan cor (*castibility*)

Penghalus butir pada aluminium tuang dapat meningkatkan kemampuan cor. Selama proses pengisian cetakan, pendinginan pada *molten* akan menghasilkan dendrit yang akan terbawa ke dalam cetakan. Dengan ukuran dendrit yang besar tentu saja akan menjadi masalah, khususnya pada pengisian bagian yang tipis. Dengan adanya penghalus butir, ukuran butir dendrit menjadi lebih kecil sehingga jumlah fraksi padat akan meningkat. Semakin besar jumlah fraksi padat maka tumbukan antar lengan-lengan dendrit semakin kecil dan tahanan pergerakan *molten* semakin berkurang. Hal tersebut diperlihatkan dalam Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Perbedaan ukuran dendrit yang mempengaruhi nilai fraksi padatan^[5]

3. Meningkatkan kemampuan *feeding*

Selama pembekuan, sangat penting untuk menyeimbangkan volume aluminium yang menyusut dengan memasok aluminium yang masih cair, atau

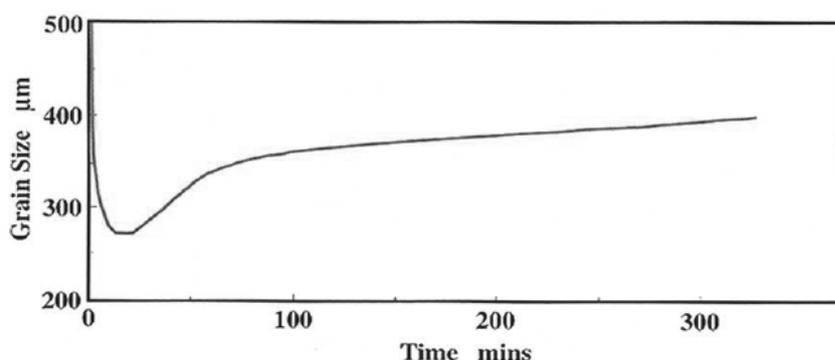
disebut juga *feeding*. Dengan ukuran dendrit yang besar pada aluminium, tahanan terhadap mekanisme *feeding* akan terjadi lebih awal. Jika mekanisme *feeding* terhalang maka hasilnya adalah penyusutan dan porositas yang besar pada produk cor. Dengan penghalus butir, ukuran dendrit akan lebih halus dan *feeding* dapat berlangsung lama.

4. Meminimalkan penyusutan, porositas dan retak panas

Karena dengan penambahan penghalus butir dihasilkan jaringan dendritik yang lebih halus, maka daerah yang terisolasi pada jaringan dendrit lebih kecil, sehingga dihasilkan penyusutan dan porositas yang halus dan tersebar merata pada produk cor. Dengan penyusutan yang kecil tentunya resiko retak panas menjadi berkurang seperti dijelaskan pada bagian II.2.4.3.

2.4.4 Mekanisme *Fading* Penghalus Butir

Yang dimaksud dengan *fading* adalah kejadian dimana penghalus butir kehilangan performanya terhadap paduan aluminium setelah beberapa waktu. *Fading* sering menjadi masalah pada pengecoran paduan aluminium yang menggunakan penghalus butir jenis TiB_2 , sedangkan pengecoran paduan aluminium yang pembentuk intinya $TiAl_3$, jarang ditemukan *fading* sebab titanium sebagai unsur pembentuk $TiAl_3$ tetap berada di dalam *molten* sampai pembekuan terjadi. Gambar 2.17 menunjukkan grafik bagaimana pengaruh waktu setelah penambahan Al-5Ti-B terhadap ukuran butir aluminium tuang yang dihasilkan. Pada grafik tersebut terlihat bahwa *fading* terjadi dalam waktu kurang dari satu jam, dimana hal tersebut ditunjukkan dengan mulai meningkatnya ukuran butir^[5].



Gambar 2.17 *Fading* penghalus butir jenis AlTiB pada paduan aluminium^[5]

Ada tiga alasan yang menjelaskan bagaimana peristiwa *fading* itu terjadi, yaitu karena pengendapan (*settling*), penggumpalan (*agglomeration*), dan pencemaran (*poisoning*). Pengendapan merupakan masalah umum yang terjadi pada *molten* yang tidak dilakukan pengadukan yang kontinyu. Hal ini terjadi karena berat jenis dari TiB_2 ($4.5g/cm^3$) yang lebih besar daripada aluminium cair ($2.3g/cm^3$). Sedangkan penggumpalan terjadi karena partikel-partikel borida berkumpul dan menggumpal sehingga terjadi pengendapan yang lebih cepat. Pencemaran pada penghalus butir merupakan masalah yang lebih serius lagi sebab dapat terjadi dengan sangat cepat dan tidak dapat dikembalikan. Pencemar kimia seperti zirkonium dipercaya dapat mensubstitusi titanium pada partikel $TiAl_3$ atau pun TiB_2 menjadi $(Zr,Ti)Al_3$ atau $(Zr,Ti)B_2$. Dengan terbentuknya partikel-partikel pengganti tersebut efek pembentukan inti menjadi berkurang^[5]. Selain itu, penambahan silikon melebihi nilai 3 % juga dapat menyebabkan efek pencemaran. Dalam penelitian tersebut menyebutkan bahwa silikon akan menimbulkan *fading* TiB_2 dengan laju yang konstan ketika kadar silikon diatas 3 %^[32].