

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 ALUMINIUM DAN PADUANNYA

Paduan aluminium tuang adalah material yang paling serbaguna dan secara umum mempunyai kemampuan untuk di cor yang paling baik. Paduan aluminium ini dapat digunakan pada metode pengecoran apapun seperti dengan *sand casting*, *shell mold*, *centrifugal*, *investment casting* dan lain-lain^[1]. Paduan aluminium tuang memiliki karakteristik yang mendukung untuk dilakukan proses pengecoran diantaranya mampu alir yang baik, titik lebur yang rendah, sifat mampu cor yang baik, berat jenis yang rendah, pertukaran panas yang cepat, stabilitas kimia yang cukup baik dan permukaan *as-cast* yang halus^[1]. Karakteristik dari aluminium dan paduannya secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik aluminium dan paduannya secara umum^[2]

Karakteristik	Nilai
Kekuatan tarik	70-505 MPa
Kekuatan luluh	20-455 MPa
Elongasi	1-30%
Kekeerasan	30-150 HB
Modulus elastisitas	65-80 GPa
Kekuatan geser	42-325 MPa
Berat jenis	2.57-2.95 gr/cm ³
Batas kekuatan fatik	55-145 MPa
Konduktifitas panas	85-175 W/m.K pada 25 ⁰ C
Koefisien ekspansi panas linear	17.6-24.7 x 10 ⁻⁶ /°C
Konduktivitas listrik	18-60% IACS

Beberapa karakteristik lain dari aluminium dan paduannya adalah sebagai berikut^[3] :

1. Memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi. Hal ini disebabkan karena aluminium dapat bereaksi dengan oksigen membentuk lapisan pasif di permukaan yang sifatnya stabil (Al_2O_3), tidak berwarna, dan transparan hingga lapisan ini dapat melindungi aluminium dan paduannya dari reaksi korosi.
2. Permukaan aluminium memiliki sifat pemantulan yang baik.
3. Memiliki sifat elektrik dan konduktifitas panas yang baik.
4. Tidak bersifat magnetik.
5. Dapat difabrikasi ke berbagai bentuk dan dapat diproses dengan semua jenis proses manufaktur seperti proses ekstrusi, *metal forming* serata pengecoran

2.2 SISTEM PENAMAAN PADUAN ALUMINIUM TUANG

Pengelompokan paduan aluminium tuang komersial didasarkan pada sistem penomoran empat digit dari *Aluminum Association* (AA) atau *American National Standart Institute* (ANSI H35. 1-1978) seperti pada tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2. Penamaan Paduan Aluminium Tuang ANSI H35. 1-1978^[2]

Alloy Designation	Detail
1XXX	99% pure aluminium
2XXX	Cu containing alloy*
3XXX	Mn containing alloy
4XXX	Si containing alloy**
5XXX	Mg containing alloy
6XXX	Mg and Si containing alloy*
7XXX	Zn containing alloy*
8XXX	Other alloys
Heat Treatment Designation	Detail
F	As-fabricated
O	Annealed
H	Strain hardened
T	Heat treated
T4	Solution treated
T6	Solution treated and aged

Digit pertama menunjukkan kelompok paduan. Digit kedua dan ketiga menunjukkan tingkat kemurnian minimum untuk Al tanpa paduan (1XX.X), dan

sebagai nomor identifikasi untuk kelompok paduan lainnya. Digit keempat menunjukkan bentuk produk misalnya seperti : (i) .0 untuk mengindikasikan keterbatasan kimia yang diberikan pada paduan coran, (ii) .1 untuk mengindikasikan keterbatasan kimia yang diberikan untuk ingot yang digunakan untuk membuat paduan coran, (iii) .2 untuk mengindikasikan ingot namun dengan perbedaan keterbatasan kimia (biasanya lebih rigid namun masih dalam batas untuk ingot)^[2]. Biasanya, ingot versi XXX.1 dapat digunakan sebagai *secondary product* (dilebur kembali dari scrap, dll), dan ingot versi XXX.2 dibuat dari *primary aluminium* (sel reduksi). Beberapa nama paduan menggunakan huruf. Setiap huruf yang diikuti oleh angka menjadi pembeda antara paduan dalam hal persentase pengotor (*impurities*) atau elemen paduan yang jumlahnya minor (sebagai contoh , 333.0, A333.0, B333.0 and F333.0)^[2].

2.3 PADUAN ALUMINIUM TUANG AC4B

Aluminium AC4B termasuk kedalam jenis paduan aluminium tuang (*aluminium casting alloy*). Menurut standar JIS H 5202 (*Japan International Standard*) paduan aluminium AC4B setara dengan 333 standar AA (*Aluminium Association*). Paduan aluminium AC4B memiliki unsur paduan utama (*major element*) Al-Si-Cu, selain itu AC4B memiliki unsur paduan lainnya (*minor element*) seperti Mg, Fe, Ni, Zn, Mn, Ti, Pb, Sn dan Cr. Unsur paduan minor ini berguna untuk meningkatkan sifat-sifat dari aluminium tuang AC4B. Tabel 2.3 merupakan komposisi paduan aluminium tuang AC4B menurut standar JIS dan 333 menurut standar AA. Paduan aluminium tuang AC4B ini cukup banyak digunakan untuk berbagai macam aplikasi contohnya seperti *engine cooling fans, clutch housing, crankcases, rocker arms, timing gears, gear blocks, dan piston*^[1]

Tabel 2.3 komposisi kimia paduan aluminium tuang AC4B dan komposisi paduan aluminium tuang 333, dalam wt. %^[2,5]

Unsur Paduan	Komposisi AC4B	Komposisi 333
Si	7-10	8-10
Cu	2-4	3-4
Mg	0.5 maks	0.05-0.5
Zn	1 maks	1
Fe	1 maks	1
Mn	0.5 maks	0.5
Ni	0.3 maks	0.5
Ti	0.2 maks	0.25
Al	balance	Balance

Dari unsur-unsur paduan yang dimiliki aluminium tuang AC4B maka didapatkan karakteristik dari material tersebut yang memiliki beberapa kelebihan diantaranya adalah memiliki sifat mampu cor yang baik (fluiditas tinggi, tahan terhadap *hot cracking*, tahan terhadap *shrinkage*), memiliki kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik, memiliki mampu las yang baik, memiliki ketahanan korosi yang baik, memiliki *machinability* yang baik, serta dapat di cor dengan berbagai metode pengecoran misalnya seperti *die casting*, *permanent mold casting*, *sand casting* dan lain-lain^[3]. Berikut karakteristik yang dimiliki paduan aluminium tuang AC4B dan 333

Tabel 2.4. Karakteristik paduan aluminium tuang AC4B dan 333^[2,5]

Karakteristik	AC4B	333
Kekuatan tarik	235 MPa	234 MPa
Kekuatan luruh	130 MPa	131 MPa
Elongasi	2.5 % min.	2 %
Kekerasan	80 HB	90 HB
Titik lebur	600 – 635 °C	520-585 °C
Berat jenis	2.79 g/cm ³	2.77 g/cm ³

2.4 PENGARUH UNSUR DALAM PADUAN ALUMINIUM TUANG

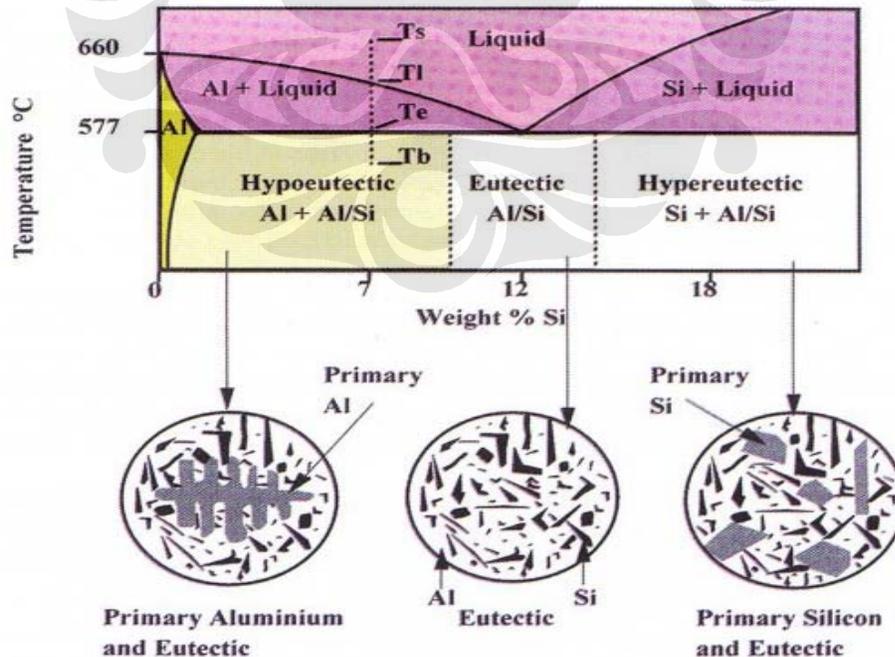
Unsur paduan ditambahkan untuk meningkatkan sifat mekanis seperti kekuatan, keuletan, mampu permesinan, dan lainnya sesuai kebutuhan. Berikut ini unsur-unsur pada paduan aluminium dan pengaruhnya terhadap sifat material:

2.4.1 Silikon (Si)

Silikon paling umum digunakan pada pengecoran aluminium dan mampu meningkatkan karakteristik pengecoran dengan pengaruh yang signifikan. Penambahan silikon pada aluminium murni berpengaruh terhadap^[7]:

1. Meningkatkan fluiditas atau mampu alir.
2. Meningkatkan ketahanan terhadap hot tearing.
3. Meningkatkan karakteristik mampu cornya.

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



Gambar 2.1. Diagram fasa Al-Si^[7]

Berdasarkan diagram fasa pada gambar 2.1 dapat dilihat bahwa daerah eutektik berada pada kadar Si 12 wt %. Kondisi Eutectic pada proses casting sangat diinginkan karena dua hal, yaitu:

1. Kondisi Eutektik menghindari fasa lumpur, sehingga pada saat solidifikasi tidak ada material yang membeku terlebih dahulu, sehingga kita dapat menghindari misrun dan memiliki fluidity yang baik.
2. Kondisi Eutektik memiliki titik lebur yang terendah, jika kita mengacu pada diagram fasa Al- Si, hal ini menguntungkan karena efisien dalam bahan bakar.

Pada daerah hipoeutektik, seperti terlihat pada Gambar 2.1 kandungan Si kurang dari 12 wt %. Dapat dipastikan Si terlarut semua. Keuntungan dari aluminium yang memiliki kondisi hipoeutektik adalah: *machinability* lebih baik dan ketangguhan lebih baik. Sedangkan kerugiannya adalah kekuatan dan kekerasan lebih rendah.

Pada daerah hipereutektik, Si terdapat sekitar 14 % - 18 %. Pada fasa ini terdapat silikon simer dan banyak silikon bebas yang tidak terlarut. Silikon bebas ini sangat berguna untuk menambah *wear resistance* dan ekspansi thermal rendah (cocok untuk aplikasi temperatur tinggi). Kondisi ini memiliki beberapa keuntungan yaitu Ketahanan aus lebih baik, *flowability* tinggi, kekuatan meningkat, kekerasan meningkat, ketahanan *hot tears* (retak panas) meningkat, ekspansi termal rendah. Sedangkan kelemahan-kelemahannya adalah karena terbentuk kristal primary Si maka kekerasan tidak homogen dan *machinability* kurang baik^[7].

2.4.2 Tembaga (Cu)

Tembaga ditambahkan untuk meningkatkan kekuatan mekanis dengan membentuk presipitat. Pengaruh tembaga pada paduan aluminium adalah :^[7]

1. Meningkatkan kekuatan dan kekerasan pada produk hasil cor dan pada kondisi perlakuan panas.
2. Mengurangi ketahanan terhadap korosi.
3. Mengurangi ketahanan retak panas dan menurunkan mampu cor .

2.4.3 Besi (Fe)

Pengaruh penambahan besi pada paduan aluminium adalah ^[7]:

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

Besi merupakan unsur pengotor yang sering ditemukan dalam paduan aluminium. Besi yang hadir dengan jumlah yang lebih besar dari 0.05% akan membentuk fasa intermetalik seperti FeAl_3 , FeMnAl_6 dan αAlFeSi , karena kelarutannya yang rendah pada fasa padat. Fasa tersebut tidak larut dan meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi, namun juga dapat menyebabkan penggetasan. Besi juga mengurangi kecenderungan terjadinya *soldering* pada *die casting* serta menurunkan nilai keuletan dari paduan aluminium ^[8].

Besi dengan penambahan mangan pada komposisi sekitar eutektik akan menghasilkan kekuatan dan keuletan pada temperatur ruang dan mempertahankan kekuatannya pada temperatur tinggi. Hal ini didasari pada kehalusan butir akibat fasa intermetalik yang terdispersi halus dan merata ^[8].

2.4.4 Magnesium (Mg)

Magnesium dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium silikon. Hal ini dikarenakan fasa Mg_2Si yang berfungsi sebagai penguat. Fasa ini memiliki batas kelarutan 0.7 wt % Mg, jika melebihi maka yang terjadi adalah pelunakan pada matriks aluminium. Komposisi aluminium silikon yang memiliki kekuatan tinggi memiliki kadar magnesium antara 0.4 - 0.7% ^[2].

2.4.5 Seng (Zn)

Seng tidak memiliki keuntungan teknis bila ditambahkan ke dalam paduan aluminium silikon, tetapi bila digunakan dengan tembaga dan/atau magnesium, menghasilkan komposisi *heat-treatable* dan *ageing* yang unik. Pada *secondary alloy* kandungan seng sampai 3 % memungkinkan digunakannya *scrap* aluminium kelas rendah, sehingga biaya produksi berkurang ^[2].

2.4.6 Mangan (Mn)

Mangan juga unsur pengotor yang sering hadir pada aluminium. Konsentrasi normal mangan biasanya antara 5-50 ppm. Kehadiran mangan akan mengurangi resistivitas aluminium, namun meningkatkan kekuatan melalui mekanisme *solid solution strengthening* atau fasa intermetalik ^[6]

2.4.7 Nikel (Ni)

Nikel biasa digunakan dengan tembaga untuk mempertahankan sifat-sifat paduan pada kenaikan temperatur. Nikel memiliki kelarutan padat yang tidak mencapai 0.04 %, selebihnya akan menghasilkan fasa intermetalik, yang umumnya berkombinasi dengan unsur besi. Nikel sampai jumlah 2 % akan meningkatkan kekuatan aluminium dan menurunkan keuletan. Umumnya nikel ditambahkan ke dalam paduan aluminium silikon untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada temperatur tinggi dan mengurangi koefisien ekspansi thermal ^[6]

2.4.8 Timah (Sn)

Pengaruh penambahan timah pada paduan aluminium adalah: ^[6]

1. Meningkatkan sifat anti gesek
2. Memperbaiki sifat mampu mesin (*machinability*)
3. Dapat mempengaruhi respon terhadap *precipitation hardening* pada beberapa sistem paduan

2.4.9 Titanium (Ti)

Titanium digunakan untuk memperhalus butir paduan aluminium hasil pengecoran. Bahkan sering dikombinasikan dengan sedikit unsur boron untuk tujuan yang sama. Apabila digunakan tanpa kandungan boron, pengaruhnya akan berkurang dengan meningkatnya waktu tahan aluminium cair, atau akibat proses peleburan kembali. Penambahan titanium umumnya lebih besar dari konsentrasi yang dibutuhkan supaya mengurangi kecenderungan terjadinya retak ^[6]

2.5 PENGARUH STRUKTUR MIKRO TERHADAP SIFAT MEKANIS PADUAN ALUMINIUM TUANG

Struktur mikro dari paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi, kecepatan pembekuan, serta perlakuan panas, komponen dari struktur mikro yang mempengaruhi sifat mekanis pada aluminium tuang adalah^[2]

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

2.5.1 Fasa Intermetalik

Fasa intermetalik umumnya ada didalam strukturmikro suatu paduan aluminium. Dalam fasa α -aluminium (matriks) terkandung larutan padat aluminium (sebagai pelarut) dan elemen lain. Fasa-fasa lain yang terdapat didalam paduan aluminium mengandung unsur paduan dalam jumlah berlebih dan mengandung elemen pengotor yang tidak ada di dalam larutan, serta terdiri dari unsur utama, unsure eutektik dan presipitat (endapan).

Fasa-fasa lain selain fasa α -aluminium biasanya disebut fasa intermetalik yang merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro yang terbentuk sebagai akibat dari komposisi kimia yang melebihi batas kelarutannya. Keberadaan ini dipengaruhi oleh komposisi dan mekanisme pembekuan yang terjadi. Biasanya fasa intermetalik dituliskan dalam rumus kimia tertentu misalnya CuAl_2 , Mg_2Si , $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$, Al_5FeSi , Al_8Mg_5 , MgZn .

Proses laju pembekuan mempengaruhi kahalusan, kekasaran dan distribusi fasa intermetalik dan akan mempengaruhi sifat mekanis dari paduan aluminium. Laju pembekuan yang rendah kan menghasilkan senyawa intermetalik yang kasar dan mengkonsentrasikan di batas butir, hal ini dapat menyebabkan mekanisme penguatan paduan aluminium menjadi menurun karena sifat fasa intermetalik yang getas.

Pada reaksi pembakuan paduan Al-Si terjadi beberapa mekanisme pengendapan fasa yaitu:

- Pembentukan jaringan dendritik α -aluminium

- Reaksi eutektik Al-Si
- Pengendapan fasa intermetalik

Fasa yang sering muncul pada paduan AlSi adalah Al_5FeSi dan $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ dan selanjutnya terjadi pengendapan fasa CuAl_2 , Mg_2Si . Unsur Fe dan Mn dibutuhkan untuk meningkatkan sifat mekanis pada paduan aluminium. Jika kandungannya berlebih akan menyebabkan getas, hal ini dapat terjadi karena unsur unsur tersebut kelarutannya rendah dalam paduan aluminium sehingga jika kandungannya berlebih unsur tersebut akan membentuk senyawa atau paduan yang keras dan getas. Fasa α -aluminium lebih mudah bertumbuh dibandingkan kristal silicon dan fasa intermetalik lainnya. Namun diantara fasa intermetalik, terdapat perbedaan kecepatan pertumbuhan, dimana fasa $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$ lebih mudah tumbuh *disbanding* fasa Al_5FeSi sehingga fasa ini lebih mendominasi pada saat pembekuan cepat. Berikut tahapan reaksi saat solidifikasi:

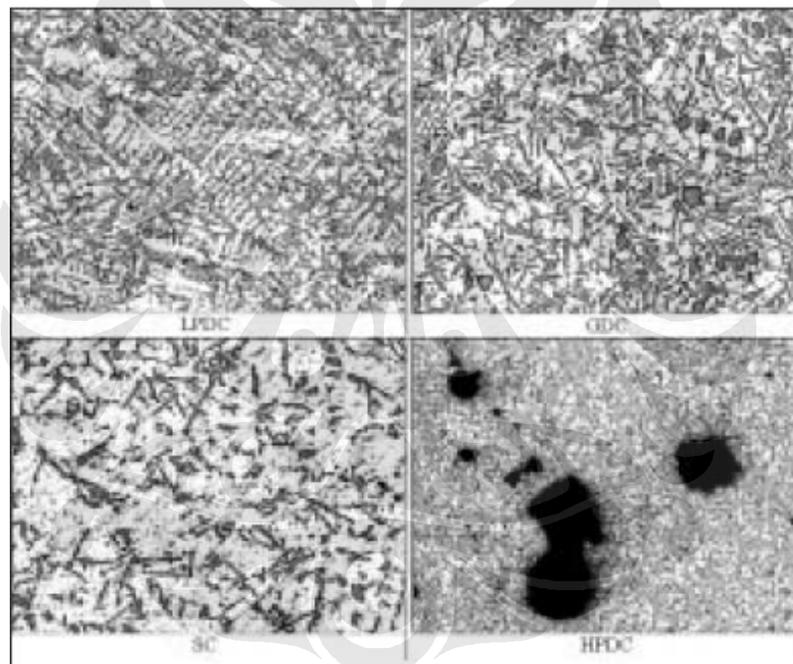
1. Awal terjadi pembekuan dan pembentukan α -aluminium
2. Pengendapan fasa yang mengandung Fe (titik koherensi *dendrite*)
Liquid \rightarrow Al + $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$
Atau Liquid \rightarrow Al + Al_5FeSi
3. awal reaksi utama eutektik
Liquid \rightarrow Al + Si + $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}_2$
Atau Liquid \rightarrow Al + Si + Al_5FeSi
4. Pengendapan fasa Al_2Cu
Liquid \rightarrow Al + Al_2Cu + Si + Al_5FeSi
5. Pengendapan fasa kompleks
Liquid \rightarrow Al + Al_2Cu + Si + $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$
6. Akhir dari proses pembekuan

2.5.2 *Dendrite arm spacing*

Dendrit merupakan suatu bentuk struktur mikro yang dimiliki oleh logam hasil dari proses pengecoran. Satu dendrit umumnya memiliki beberapa lengan, dan antara lengan yang satu dengan yang lain memiliki jarak, jarak antara lengan

ini yang disebut sebagai *dendrite arm spacing* (DAS). Jarak antar lengan dendrit ini juga mempresentasikan besarnya dendrit, semakin besar jarak antar lengan dendrit maka ukuran dendrite pun juga semakin besar. Besar kecilnya jarak antar lengan dendrit sangat mempengaruhi terhadap sifat mekanis suatu paduan logam. *Dendrite arm spacing* berukuran pendek dan halus sangat diharapkan dalam produk hasil cor karena dapat meningkatkan sifat mekanis.

Ukuran dari *dendrite arm spacing* ini dipengaruhi oleh kecepatan proses pembekuan pada saat proses pengecoran. Proses laju pembekuan untuk masing-masing proses pengecoran berbeda-beda, sehingga dengan kata lain bahwa proses pengecoran mempengaruhi ukuran dendrit dan juga sifat mekanis benda cor yang dihasilkan seperti pada Gambar 2.2 berikut ini.



Gambar 2.2 Hasil pembentukan dendrit pada proses pengecoran yang berbeda ^[13]

2.5.3 Ukuran dan Bentuk Butir

Dalam struktur mikro suatu logam terdapat banyak butir. Butir-butir ini memiliki bentuk dan ukuran yang berpengaruh terhadap sifat mekanis logam itu sendiri. Butir yang halus dan *equiaxed* sangat diinginkan dalam struktur mikro logam karena dapat menghasilkan kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan. Sedangkan adanya butir yang kasar dan berbentuk *columnar* tidak

diinginkan karena menurunkan sifat mekanis. Bentuk dan ukuran butir dapat dibentuk dengan menentukan komposisi paduan, kecepatan pembekuan, dan penambahan penghalus butir untuk membentuk inti butir yang heterogen^[9].

2.5.4 Modifikasi Kristal Silikon

Proses modifikasi didefinisikan sebagai proses penambahan unsur tertentu yang dapat merubah struktur mikro eutektik Si dari bentuk *acicular* menjadi bentuk *fibrous*. Elemen modifikasi yang berasal dari unsur-unsur golongan IA, IIA dan unsur tanah jarang seperti (Sr) dan Sodium (Na) untuk paduan Al-Si hipoeutektik, sedangkan phosphor (P) dan Antimony (Sb) untuk paduan Al-Si hipereutektik^[4]. Elemen modifikasi biasa ditambahkan pada konsentrasi yang sangat kecil yaitu berkisar antara 0.01% - 0.02%^[15]. Efektifitas dari perlakuan modifikasi dapat dilihat dari derajat dan lama waktu *undercooling* saat proses pembekuan. Secara umum tujuan dilakukannya modifikasi adalah untuk.

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

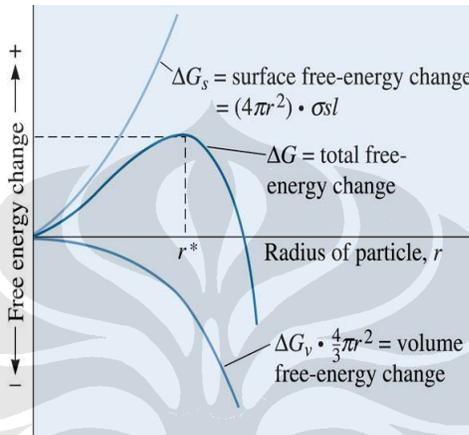
2.6 PEMBEKUAN

2.6.1 Teori Pembekuan

Suatu material logam dalam keadaan cair pada temperatur tinggi dapat membeku ketika temperaturnya diturunkan, hal ini terjadi karena saat temperatur diturunkan energi rata-rata juga turun sehingga molekul lebih banyak yang bersatu sehingga menyebabkan membekunya material tersebut^[11]. Terjadinya pembekuan dipengaruhi oleh faktor penjumlahan dua energi bebas yaitu energi bebas volum dan energi bebas permukaan.

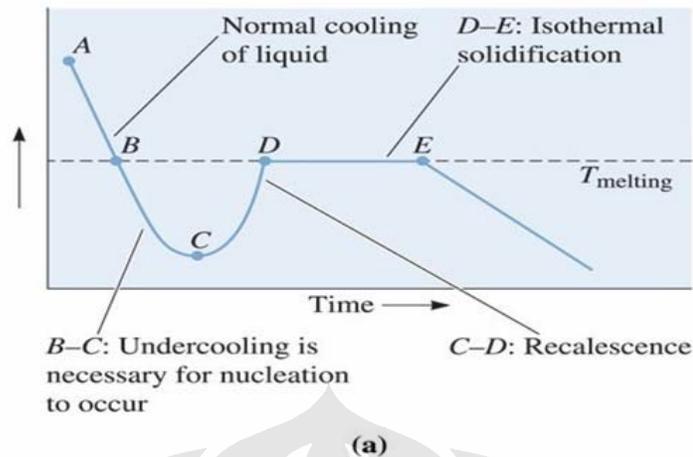
$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4 \pi r^2 \dots \dots \dots (2.1)$$

Beda energi antara fasa padat dengan fasa cair menghasilkan beda energi volum (ΔG_v) yang bernilai negatif, saat pembentukan fasa padat tersebut terbentuk suatu batas antar permukaan antara kedua fasa tersebut, permukaan ini memiliki energi bebas permukaan (σ) sebagai pertumbuhan fasa solid yang bernilai positif, lihat Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Hasil penjumlahan energi bebas volum dan energi bebas permukaan^[11]

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



Gambar 2.4 Kurva pembekuan pada logam murni^[11]

Berdasarkan Gambar 2.4 diatas, dari kurva pendinginan antara waktu dan temperatur ini dapat dilihat bahwa untuk terbentuknya nukleasi dibutuhkan *undercooling* (titik B-C), kemudian nukleasi terjadi pada titik C, antara titik C-D terjadi *recalescence* yaitu melepaskan fusi panas laten karena meningkatnya temperatur pada fasa cair. Kemudian pada Titik E pembekuan selesai.

Proses pembekuan ini sangat penting untuk dipelajari untuk mendapatkan produk yang tanpa cacat dan memiliki sifat mekanis benda cor yang baik. Untuk mendapatkan hal tersebut dapat dilakukan dengan mengontrol pembentukan inti diantaranya dengan^[11] :

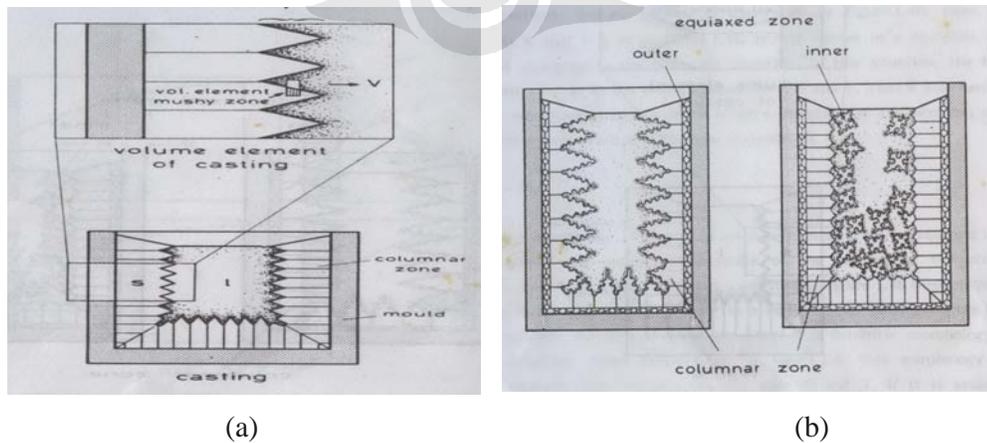
1. Penambahan penghalus butir, yaitu dengan menambahkan bibit agar jumlah inti meningkat dan butir lebih halus
2. *Dispersion strengthening* yaitu dengan menambahkan partikel yang menghalangi dislokasi agar kekuatan material logam meningkat, partikel yang menghalangi berukuran kecil, sangat keras dan inert. Dapat berupa metalik dan nonmetalik (oksida), partikel tersebar secara seragam pada matriks logam.
3. *Solid-state phase transformation* yaitu perubahan fasa yang terjadi pada fasa padat, prosesnya sebelum logam mencair
4. *Rapid solidification processing* yaitu memproduksi struktur yang khusus dari material dengan cara membuat kecepatan pendinginan yang tinggi saat solidifikasi.

2.6.2 Mekanisme Pembekuan

Untuk mendapatkan kombinasi yang terbaik antara kekuatan dan keuletan pada paduan aluminium tuang, struktur mikro yang dimilikinya harus halus dan *equiaxed*. Bentuk dan ukuran butir dapat dibentuk dengan menentukan komposisi paduan, kecepatan pembekuan, dan penambahan penghalus butir untuk membentuk inti butir yang heterogen^[9].

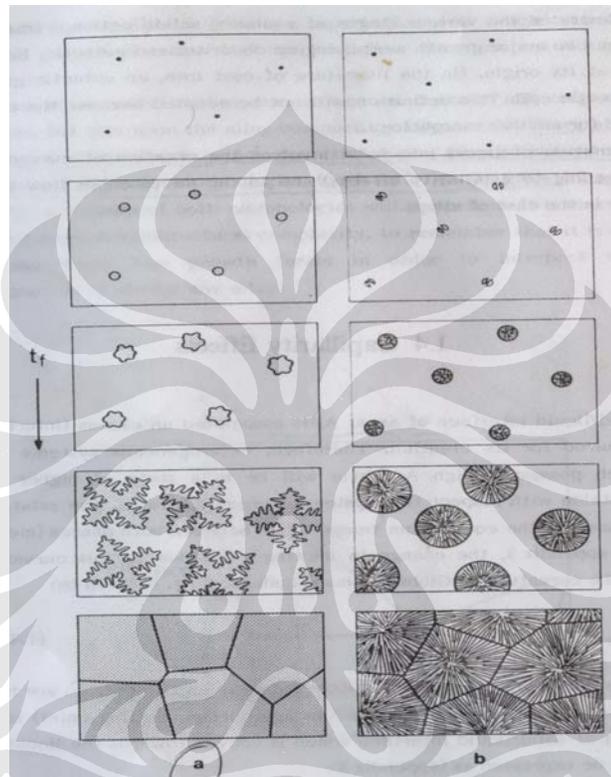
Pembentukan fasa padat dimulai dari dinding cetakan dan akan membentuk zona kolumnar. Selama terjadi pertumbuhan zona kolumnar dapat dibedakan menjadi tiga daerah bagian yaitu daerah fasa cair, daerah campuran fasa cair dengan fasa padat dan fasa padat, daerah ini disebut juga *mushy zone* (Gambar 2.5a), *mushy zone* ini yang dapat menentukan karakteristik dari struktur mikro seperti kerapatan, bentuk, ukuran, distribusi konsentrasi, presipitat dan pori.

Pada permukaan cetakan logam kecepatan pendinginan paling tinggi sehingga awal mula pembekuan terjadi pada daerah ini dan terbentuk zona *equiaxed*. Butir ini dengan cepat membentuk dendrit dan dan lengan-lengannya akan berkembang searah dengan arah kristal pada arah $\langle 001 \rangle$. Kemudian dendrit tumbuh secara paralel dan berlawanan arah dengan arah aliran panas dan akhirnya terbentuk zona *columnar*. Setelah terbentuk *dendrite columnar* kemudian terbentuk dendrit bebas yang berbentuk *equiaxed* (*inner equiaxed*) seperti pada Gambar 2.5b, hal ini terjadi karena panas laten yang diambil secara radiasi melewati *undercooled melt*. Transisi dari kolumnar menjadi *equiaxed* tergantung pada derajat konveksi yang terjadi fasa cair.



Gambar 2.5 (a) *mushy zone* (b) zona *equiaxed*^[2]

Selanjutnya dendrit *equiaxed* yang terbentuk akan tumbuh (Gambar 2.6) yang merupakan awal terbentuknya butir. Proses terbentuknya butir adalah sebagai berikut: Inti yang ada pada logam cair akan tumbuh membentuk dendrit, kemudian dendrit ini akan tumbuh dengan bebas pada logam cair. Dendrit akan terlihat setelah dietsa karena adanya mikrosegregasi.



Gambar 2.6 Pertumbuhan butir^[2]

2.7 PENGHALUSAN BUTIR

Pada dasarnya ukuran butir pada material hasil pengecoran berbanding terbalik dengan banyaknya inti-inti yang terdapat pada material pada saat dalam fasa cair. Semakin banyak inti-inti yang hadir maka besar butir yang terbentuk saat sudah membeku semakin kecil begitupun sebaliknya. Inti-inti ini dapat bereaksi saat terjadi proses pembekuan.

Paduan aluminium seperti logam paduan lainnya secara natural akan terbentuk butir yang kasar *equiaxed* dan *columnar* ketika terjadi pembekuan. Tingkat kekasaran atau besar butir tergantung pada temperatur tuang logam,

gradien temperatur, dan terbentuknya secara alami inti butir seperti intermetalik dan nonmetalik. Elemen paduan yang ditambahkan kedalam paduan aluminium cair akan mengurangi ukuran butir, semakin besar kelarutannya maka efek pengecilan butir akan semakin besar^[1].

Penghalusan butir dilakukan dengan penambahan partikel padat pada logam cair sebagai katalis inti untuk membentuk butir yang halus dan equiaxed. Penghalus butir banyak memberikan keuntungan pada saat proses pembekuan dan meningkatnya sifat-sifat karakteristik material

2.7.1 Efek Penghalusan Butir pada Paduan Aluminium Tuang

Penghalusan butir pada paduan aluminium tuang memberikan bermacam-macam efek pada kemampuan aluminium untuk dicor. Berikut efek yang dihasilkan oleh penghalusan butir^[1]:

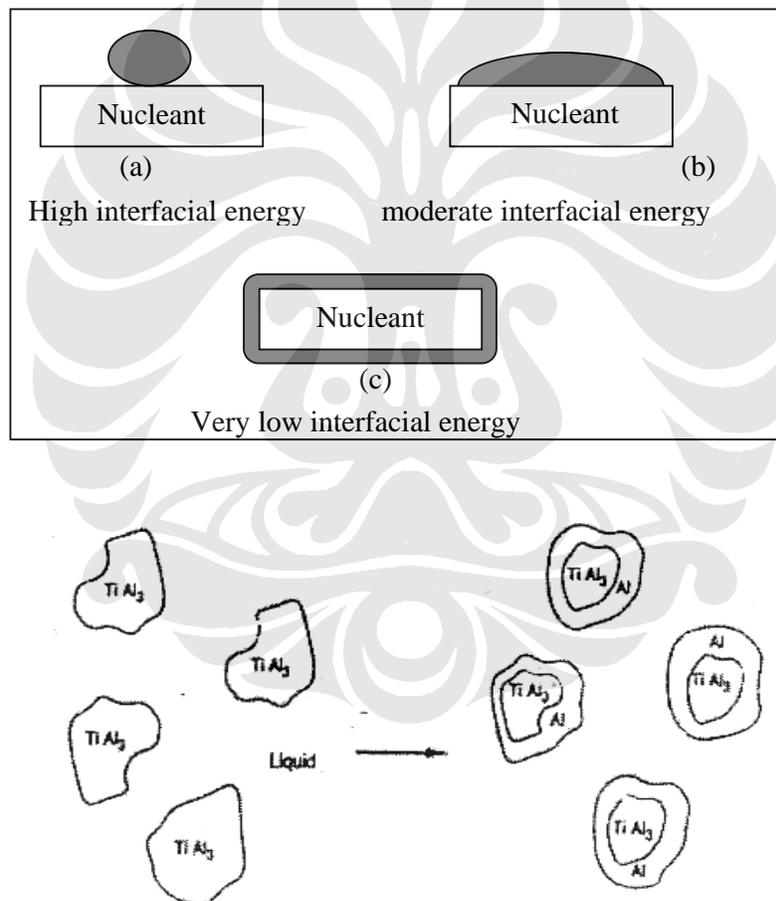
1. Mengurangi *hot tearing*, logam dengan butir yang kasar cenderung terjadi hot tearing ketika terjadi pembekuan karena butir yang berkembang akan lebih terlokalisasi area regangannya. Butir yang lebih halus cenderung untuk mencegah terjadinya *crack*.
2. Mengurangi *shrinkage porosity*
3. Meningkatkan sifat mekanis material.
4. Menurunkan fluiditas, nukleasi yang terjadi lebih awal yang disebabkan oleh penghalus butir menghasilkan aliran *slurry* yang lebih rendah dibandingkan fasa cair sehingga dengan penambahan penghalus butir maka fluiditas menurun.

2.7.2 Mekanisme Penghalusan Butir

Dalam suatu material paduan banyak terdapat inti yang berbeda yang dapat bernukleasi. Proses nukleasi ada yang berasal dari logam induknya dan yang berasal dari partikel asing, proses ini dikenal dengan nukleasi heterogen. Adanya partikel asing ini dapat menambah inti-inti yang terdapat pada logam paduan dan menghasilkan terbentuknya butir-butir yang halus saat pembekuan.

Tidak semua partikel asing yang ada pada logam cair dapat bernukleasi dengan efektif, menurut teori *heterogeneous nucleation* dikatakan bahwa energi

permukaan antara nuklean dan nukleus pada saat pembekuan sangat penting, bermacam-macam kemungkinan yang terjadi antara nukleus dan nuklean dapat dilihat pada Gambar 2.7 pada gambar tersebut terdapat dua bagian yaitu nukleus yang berada pada bagian luar dan nuklean yang berada pada bagian dalam. Nuklean yang efektif adalah nuklean yang diselimuti oleh nukleusnya karena reaksi energi permukaan antara nuklean dan nukleus rendah. Nuklean dapat diselimuti oleh nukleus karena adanya kesamaan struktur kristal antar kisi-kisinya, paling tidak terdapat satu bidang atom pada nukleus dan nuklean yang berpasangan sehingga energi permukaan antara nukleus dan nuklean rendah.



Gambar 2.7 Mekanisme terjadinya nukleasi pada sistem Al-Ti^[14]

Pada fasa cair paduan aluminium cair berisikan bermacam-macam partikel asing dan substrat yang berasal dari oksida-oksida dan spinel-spinel pada dinding

cetakan. Pada temperatur yang diberikan atau *undercooling* dibawah titik lebur aluminium paduan, tidak semua partikel asing dapat efektif sebagai nuklean. Partikel yang memiliki kesamaan struktur kristal dengan aluminium akan menjadi nuklean yang efektif pada temperatur yang sangat dekat dengan temperatur fasa cairnya. Struktur kristal yang berbeda dengan paduan aluminium akan membutuhkan *undercooling* yang lebih tinggi untuk menjadi inti yang efektif. Jika kemungkinan terjadi *undercooling* dengan derajat yang besar maka partikel yang berbeda bisa aktif menjadi nuklean dan besar butir hasil pengecoran akan kecil. Untuk mendapatkan hasil pengecoran dengan butir yang halus dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu :

1. *Chill*

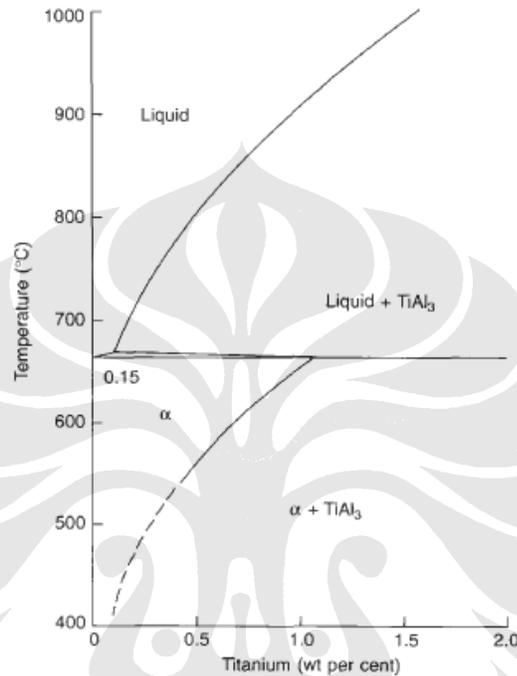
Fungsi *chill* adalah untuk meningkatkan kecepatan pembekuan sehingga dapat terbentuk ukuran butir yang halus. Logam cair yang didinginkan dengan cepat maka kecepatan panas yang diserap bisa melebihi kecepatan panas yang dihasilkan oleh proses pembekuan (panas laten pada saat pembekuan). Hasilnya temperatur *undercooling* akan turun dibawah temperatur liquidus. Jika *undercooling* mencukupi terbentuknya inti yang heterogen pada fasa cair bisa menjadi aktif nukleasi ini dapat menghasilkan ukuran butir yang halus.

2. Penghalus Butir Kimia

Cara ini adalah yang paling efektif untuk menghaluskan butir pada proses pengecoran, yaitu dengan penambahan inti yang efektif pada logam cair dengan bentuk *master alloy* atau *flux*. Ukuran butir yang halus dihasilkan dari penambahan inti-inti dan proses pembekuan pada *undercooling* yang rendah. Penghalus butir kimia dapat meningkatkan sifat-sifat mekanis dan khususnya mengurangi kecenderungan terjadinya *hot tearing* dan menghaluskan distribusi porositas.

Untuk paduan aluminium tuang biasanya digunakan 0.02 – 0.15% Titanium atau paduan 0.01-0.03% Titanium dan 0.01% boron. Fungsi boron adalah untuk membuat titanium menjadi lebih efektif. Fasa $TiAl_3$ yang terbentuk merupakan nuklean yang aktif untuk aluminium karena memiliki energi permukaan yang kecil antara $TiAl_3$ dan aluminium yang dinukleasikan. Dan juga

memiliki hubungan struktur kristal yang mirip, partikel TiAl_3 akan bereaksi dengan fasa cair pada pendinginan dibawah 665°C dengan reaksi.



Gambar 2.8 Diagram fasa Al-Ti

Dari diagram fasa Al-Ti (Gambar 2.8) dapat dilihat bahwa titanium dalam larutan logam cair pada konsentrasi di atas 0.15 wt% diharapkan menjadi presipitat sebagai TiAl_3 , di dalam reaksi yang peritektik TiAl_3 adalah inti yang aktif untuk aluminium karena TiAl_3 ditemukan di pusat-pusat dari butir-butir aluminium, dan di pusat butir-butir itu terdapat suatu hubungan orientasi antara kisi-kisi dari dua fasa

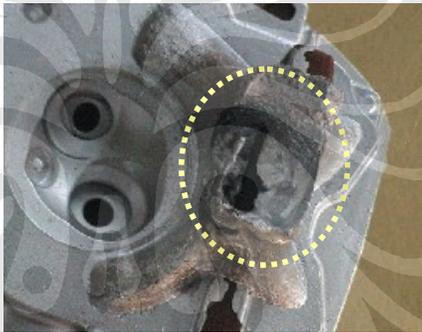
Kefektifan TiAl_3 tergantung pada struktur mikro dan morfologi dari fasa intermetalik TiAl_3 yang ada pada paduan yang terdapat pada master alloy atau flux yang ditambahkan pada aluminium cair. TiAl_3 yang kecil akan lebih efektif dibandingkan dengan TiAl_3 yang lebih besar. Penghalus butir yang memiliki bentuk Morfologi TiAl_3 seperti balok-balok memiliki kemampuan menghaluskan butir yang kurang baik, dengan bentuk seperti itu berarti boron tidak

mempengaruhi fasa intermetalik $TiAl_3$ pada saat pembuatan penghalus butir. Penghalus butir yang baik yaitu fasa intermetalik $TiAl_3$ yang berbentuk duplex yang terdiri dari partikel $TiAl_3$ yang permukaaanya ditutupi oleh partikel borid (TiB_2 atau $(Ti,Al)B_2$) yang kecil.

2.8 JENIS-JENIS CACAT

2.8.1 *Misrun gate*

Merupakan cacat yang terjadi karena tidak terisi penuhnya *gate* oleh aluminium cair. Hal ini disebabkan karena pada saat tekanan rendah untuk menginjeksi telah diberikan dan aluminium cair telah mengisi ruang pada cetakan, molten pada bagian *gate* turun kembali ke dalam *holding*. Misrun gate ini dapat dilihat pada Gambar 2.9

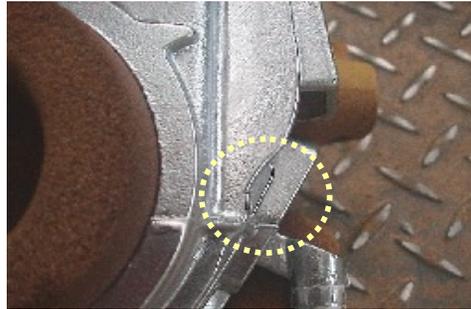


Gambar 2.9 Kondisi *misrun gate*

2.8.2 *Misrun*

Merupakan cacat yang terjadi karena aluminium cair gagal memenuhi seluruh bagian pada cetakan terutama pada bagian-bagian yang tipis dan mengakibatkan ada bagian pada komponen yang hilang atau tidak sempurna. Kondisi misrun ini dapat dilihat pada Gambar 2.10. Cara pencegahannya yaitu dengan^[6] :

- penuangan yang dilakukan pada temperatur tinggi
- kecepatan penuangan yang tinggi
- jumlah saluran harus ditambah dan logam harus diisinkan dari beberapatempat pada cetakan
- lubang angin pada inti harus cukup



Gambar 2.10 Kondisi *misrun*

2.8.3 Cold shut

Merupakan cacat yang terjadi akibat adanya pertemuan antara dua aliran molten atau lebih dengan masing-masing memiliki temperatur yang berbeda sehingga batas pertemuan antar kontak permukaan tersebut tidak dapat menyatu dengan baik (tidak terjadi fusi yang sempurna).

2.8.4 Pasir gugur

Merupakan cacat yang terjadi karena ada pasir dari *core* mengalami kerontokan maupun menempel pada komponen. Pasir gugur ini dapat terjadi karena kekuatan *core* yang dihasilkan kurang memadai akibat proses pepadatan pasir *core* yang tidak merata maupun penyimpanan yang kurang baik. Kondisi pasir gugur dapat dilihat pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Kondisi pasir gugur

2.8.5 Keropos

Merupakan cacat yang terjadi akibat adanya partikel gas yang terperangkap dalam struktur coran pada saat pembekuan, ketidakefektifan hasil

proses degassing, kecepatan pembekuan di seluruh bagian tidak merata sehingga terjadi penyusutan pada salah satu bagian komponen. Kondisi keropos dapat dilihat pada Gambar 2.12. Cara pencegahannya yaitu dengan^[6] :

- penggunaan riser
- hendaknya dilakukan pembekuan serentak, baik bagian yang lebih tebal atau tipis
- penggunaan cil yang dimaksudkan agar terjadi pembekuan mengarah dan pengaruh *riser* meningkat
- daerah pengisian yang efektif dari riser



Gambar 2.12 Kondisi keropos

2.9 LOW PRESSURE DIE CASTING (LPDC)

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

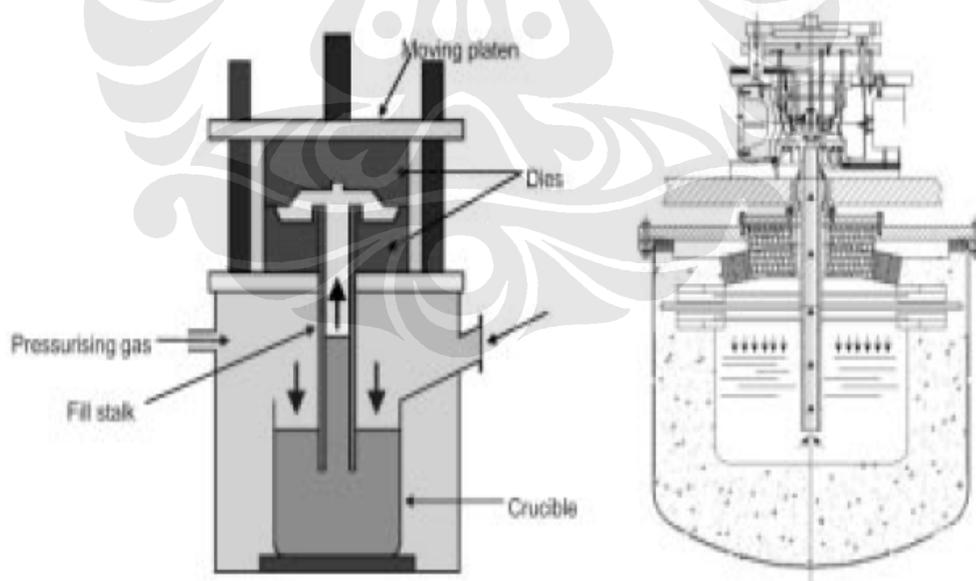
Proses *die casting* dilakukan dengan memberikan tekanan pada molten metal hingga melewati rongga atau celah dari cetakan yang disebut *dies*. Dies yang biasanya digunakan terdiri dari dua bagian yang dapat membuka dan menutup sepanjang batas vertikal. Pada mesin *die casting*, setengah *die* tersebut biasa disebut “cover die” dan yang setengahnya lagi disebut dengan “ejector die”. Dies biasa yang digunakan terbuat dari baja paduan dan harus memiliki syarat-syarat antara lain :

1. Memiliki dimensi yang stabil.
2. Memiliki ketahanan yang baik terhadap *heat cracking*.

3. Memiliki ketangguhan yang baik.
4. Memiliki ketahanan terhadap erosi yang baik.

Dalam prosesnya, pengecoran dengan metode *die casting* ini biasanya dijalankan secara semi-otomatis, artinya pada awal proses produksi operator akan melakukan proses pen-settingan mesin dimana parameter-parameter produksi diprogramkan kedalam mesin, seperti temperature, tekanan yang akan diberikan, dan sebagainya. Lalu selanjutnya, mesin akan bekerja mengikuti settingan yang diberikan oleh operator. Mesin die casting (Gambar 3.13) tersebut sebenarnya memiliki fungsi-fungsi utama, antara lain :

1. Menutup dua bagian *die* tersebut dengan menggerakkan *moving die (ejector die)* ke arah die yang tidak bergerak (*cover die*).
2. Mengamankan bagian batas antara dua bagian die tadi agar tertutup dengan rapat, sehingga saat molten metal mulai diberikan tekanan, dies tidak akan membuka.
3. Memberikan tekanan pada *molten metal* ke dalam die.
4. Membuka kembali die dengan menggerakkan *moving die* menjauh dari *fixed die* dan part hasil proses dapat dikeluarkan.



Gambar 2.13 Skema proses LPDC^[12]

Karena sangat sedikit material *die* yang dapat tahan dengan temperatur penuangan yang sangat tinggi, sehingga material besi dan baja jarang dilakukan proses casting dengan menggunakan metode ini. Dan biasanya, material yang dicor dengan menggunakan metode ini adalah material-material *non-ferrous*.

Adapun keuntungan menggunakan metode pengecoran *die casting* adalah sebagai berikut :

1. Memungkinkan produksi yang bersifat massal. Dengan menggunakan mesin *hot chamber*, dapat dihasilkan 300 – 350 part casting per jam. Dan jika menggunakan mesin *cold chamber*, dapat dihasilkan 75 – 150 part casting per jam. Dan waktu tiap siklus berbeda-beda, mulai 3 detik hingga 12 detik pada mesin *die casting* modern.
2. Kontrol dimensi dapat dijaga sehingga sangat akurat. Pada seng, toleransi part dengan ukuran diatas 25 mm dapat mencapai $\pm 0,075$ mm. Dan setiap penambahan ukuran 25 mm, toleransinya adalah $\pm 0,025$ mm.
3. Dapat mengecor part-part yang tipis. Pada kondisi yang baik, ketebalan minimal untuk seng adalah 0,5 mm dan 0,8 mm untuk aluminium.
4. Dapat mengecor profil-profil dengan detail yang sulit dengan tingkat akurasi yang tinggi.
5. *Surface finish* dapat minimalisir.
6. Die pada mesin *die casting* dapat mempertahankan keakuratannya hingga jutaan siklus casting. Sehingga walaupun harga dies mahal, jika diimbangi dengan sifat produksi massal maka akan menjadi lebih ekonomis.

Namun, metode *die casting* juga memiliki beberapa kekurangan, antara lain :

1. Secara ekonomis, baru logam-logam non-ferrous saja yang dapat dicor.
2. Ukuran dari part yang diposes sangat terbatas. Untuk seng biasanya maksimum massa yang dapat dicor adalah 90 kg, dan untuk aluminium adalah 20 kg .
3. Karena harga dies yang sangat mahal, maka dibutuhkan produksi massal untuk memproduksi part yang diinginkan. Biasanya, minimum part yang harus dihasilkan untuk menutupi biaya yang disebabkan oleh pembelian dies saja adalah sekitar 20.000 part .

4. Proses *die casting* biasanya dapat menyebabkan terperangkapnya gas sehingga menimbulkan porositas.

Seiring dengan perkembangan zaman, telah dikembangkan suatu metode pengecoran yang merupakan pengembangan dari proses die casting. Proses tersebut adalah proses *Low Pressure Casting*. *Low pressure casting* ini sedang marak dikembangkan karena proses casting yang dilakukan memiliki keuntungan sebagai berikut :

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

Adapaun kerugiannya yaitu sebagai berikut :

- Kecepatan produksi relative rendah
- Modal investasi tinggi (cetakan logam)

Tekanan yang diberikan untuk mendorong molten metal sebesar 1,5 bar. Tekanan yang rendah ini dapat meminimalisir terjadinya turbulensi dan terperangkapnya gas pada molten metal saat mengisi rongga cetakan. Proses *low pressure casting* ini biasanya dilakukan pada proses manufaktur di industri otomotif dan komponen pesawat terbang. seperti pada Gambar 2.14 berikut ini.



Gambar 2.14 Contoh komponen otomotif hasil proses LPDC^[12]