

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. CYLINDER HEAD

Cylinder head merupakan produk *casting* yang umumnya terbuat dari besi tuang atau aluminium. Pada sepeda motor, berfungsi sebagai tempat memasang kompres piston, busi, dan saluran oli^[4]. Pada umumnya, *cylinder head* memiliki banyak lubang seperti terlihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Cylinder Head* pada Sepeda Motor^[5]

Musuh utama pada *cylinder head* adalah perlakuan *overheating*, yaitu pemanasan yang berlebih. *Overheating* dapat menyebabkan penyusutan, pembengkokan *cylinder head*, dan kerusakan pada *head gasketnya*^[4]. Oleh karena itu, pada *cylinder head* dibutuhkan kekuatan, ketahanan panas, dan kekerasan yang cukup tinggi.

2.2. PADUAN ALUMINIUM

2.2.1. Sifat Paduan Aluminium

Aluminium adalah logam yang sering dipakai pada industri pengecoran logam karena persediaannya yang banyak terkandung didalam bumi. Pada industri tersebut pemakaian aluminium sebagai bahan baku selalu digunakan tambahan unsur lain sebagai paduan karena paduan dapat menambah dan memperbaiki sifat logam aluminium.

Aluminium dan paduannya merupakan logam ringan dengan *density* yang rendah ($2,7 \text{ g/cm}^3$) dibandingkan dengan baja ($7,9 \text{ g/cm}^3$). Memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi lingkungan pada aluminium karena memiliki kemampuan membentuk lapisan oksida Al_2O_3 yang pasif, keras, dan tahan lingkungan *ambient* (normal). Selain itu, aluminium memiliki konduktivitas listrik dan panas yang tinggi. Dengan struktur kristal FCC yang dimiliki, aluminium dan paduannya cenderung memiliki sifat keuletan yang tinggi^[6].

Kekuatan mekanis aluminium dapat ditingkatkan dengan pemberian paduan, *cold work*, dan *perlakuan panas*. Logam yang sering dipakai sebagai paduan pada aluminium adalah tembaga, magnesium, silicon, mangan, dan seng. Sedangkan proses *perlakuan panas* yang sering dilakukan pada paduan aluminium adalah pengerasan presipitasi. Adapun hasil dari aplikasi aluminium adalah *aircraft parts*, minuman kaleng, *engine block*, dan otomotif *part*^[6].

Pengaruh paduan dalam aluminium adalah untuk memperbaiki kelemahan-kelemahan pada sifat aluminium murni seperti kekuatan yang kurang, kelarutan hidrogen, dan *castability* (kemampuan cor) yang kurang baik. Berikut adalah beberapa unsur paduan aluminium yang sering ditemui pada industri otomotif^[7] :

a. Tembaga (Cu)

Dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan fatik tanpa mempengaruhi secara signifikan mampu alir dari aluminium.

b. Magnesium (Mg)

Dapat meningkatkan kekuatan, kekerasan, dan mampu perlakuan panas yang baik.

c. Silikon (Si)

Silikon adalah unsur yang paling sering ditemui pada paduan aluminium karena dapat memperbaiki sifat mampu alir dan dapat menurunkan pembentukan *shrinkage* sehingga memperlancar produksi. Silikon ini juga memiliki berat jenis yang lebih rendah daripada aluminium sehingga tidak memberikan kontribusi penambahan berat produk. Sifat silikon yang keras digunakan sebagai peningkat kekerasan dan menahan keausan pada aluminium, tetapi kadar paduan yang berlebih dapat menurunkan keuletan.

d. Mangan (Mn)

Dapat meningkatkan kekuatan dengan membentuk fasa intermetalik antara Al – Fe – Mn – Si dengan jumlah Mn yang sedikit.

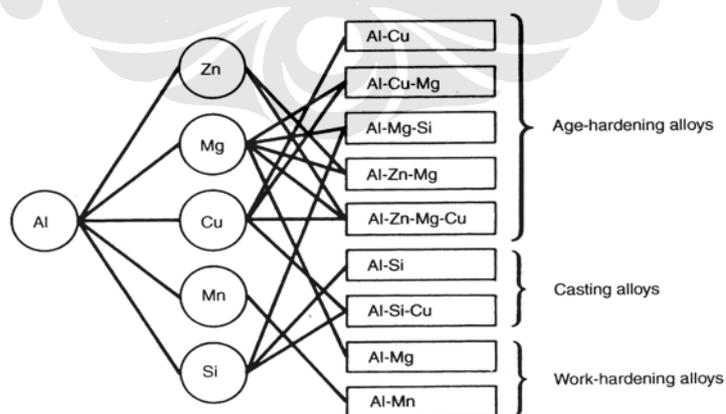
e. Stronsium (Sr)

Digunakan sebagai *modifier* pada proses pengecoran aluminium dengan paduan silikon. Stronsium memodifikasi kristal silikon primer agar menjadi lebih halus.

f. Titanium (Ti)

Dengan tambahan aluminium dan boron membentuk senyawa Al-Ti-B sebagai penghalus butir.

Berdasarkan penambahan paduannya, jenis aluminium dapat diklasifikasikan terhadap penggunaan yang cocok seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Tipe paduan aluminium berdasarkan jenis paduan yang ditambahkan dan penggunaannya^[10]

Adapun selain berfungsi sebagai paduan, unsur logam lain dapat menjadi pengotor pada aluminium seperti Fe, Mn, Cr, dan Si. Adanya Fe, Mn, dan Cr dapat memicu terbentuknya $Al_6(Mn,Fe)$ yang buruk bagi proses pengecoran. Sedangkan Si yang sedikit dapat memicu terbentuknya Al_3Fe . Unsur-unsur tersebut dikatakan sebagai pengotor jika memiliki kandungan tidak lebih dari 0,15 %^[7].

2.2.2. Pengecoran Aluminium

Salah satu jenis aluminium yang banyak digunakan adalah paduan aluminium hasil pengecoran. Paduan ini memiliki mampu cor yang terbaik dibandingkan paduan cor lainnya. Aluminium memiliki titik lebur yang lebih rendah dibandingkan logam lain (660 °C) sehingga sering digunakan sebagai bahan baku industri pengecoran karena energi pembakaran yang diperlukan lebih hemat. Sebagai material pengecoran, paduan aluminium memiliki karakteristik^[7]:

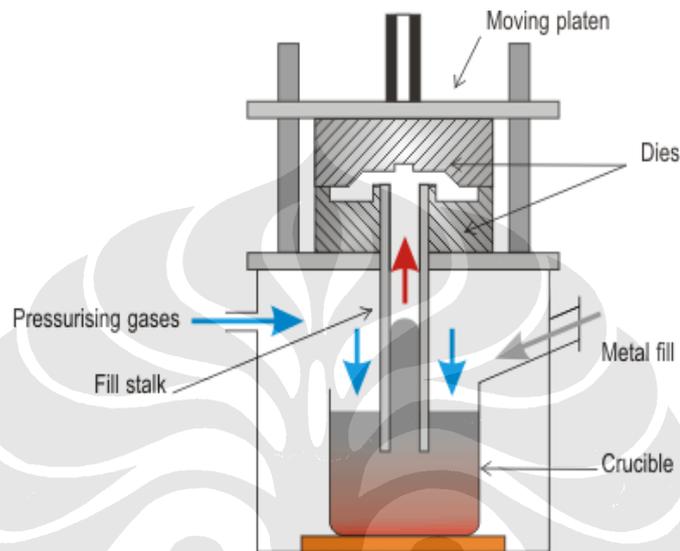
- Fluiditas yang baik untuk mengisi bagian yang tipis
- Temperatur lebur yang cukup rendah dibandingkan logam lainnya
- Transfer panas antara lelehan aluminium ke cetakan yang cepat sehingga memperpendek siklus pengecoran.
- Umumnya paduan aluminium bebas dari retak *hot short* dan kecenderungan robek (*tearing*)
- Stabilitas kimia yang baik
- Hasil permukaan hasil coran yang baik

Adapun aluminium paduan pada proses pengecoran memiliki kekurangan sebagai berikut^[7]:

- Mudah mengalami oksidasi pada proses pengecoran, mengakibatkan *dross* (Al_2O_3) mudah terbentuk
- Sangat mudah mengikat gas hidrogen dalam kondisi cair
 $3H_2O + 2Al \rightarrow 6H + Al_2O_3$
- Mengalami penyusutan yang cukup tinggi 3,5 – 8,5 %

2.2.3. LPDC

Low Pressure Die Casting yang terlihat pada Gambar 2.3 merupakan salah satu tipe *die casting* dimana memiliki kesamaan dengan proses *gravity casting* dalam hal penuangannya. Hal yang membedakan adalah penggunaan tekanan pada krusibel yang biasanya hingga 0,7 bar^[8].



Gambar 2.3 Skema dari *Low Pressure Die Casting*^[9]

Proses ini memiliki tingkat kepresisian yang cukup tinggi, yaitu sekitar 0,1 % dari dimensi seluruhnya. Cara kerja LDPC dapat dilihat dari beberapa arah panah yang terlihat pada Gambar 2.3. Tekanan yang menekan gas sehingga menekan logam cair kemudian terdorong ke cetakan yang berada diatas krusibel. Proses LPDC ini Biasanya digunakan untuk produksi komponen yang simetris^[9].

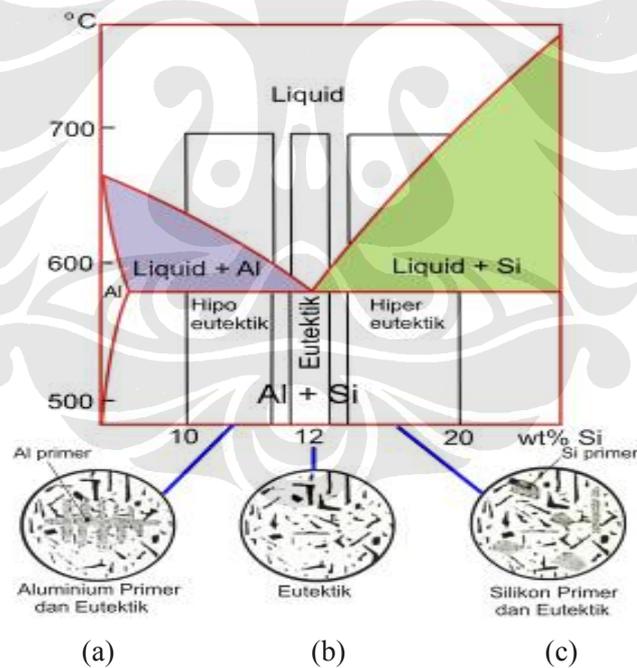
2.2.3 Al-Si-Cu

Aluminium *Silicon Copper* (Al-Si-Cu) merupakan jenis dari paduan Al-Si. Silicon pada Al-Si-Cu in berpengaruh untuk meningkatkan *castability* terutama pada 5 – 13 wt. %, meningkatkan kekuatan dan kekerasan, serta menurunkan berat jenis dan kecendrungan *hot shortness*. Jika kadar silikon lebih besar dari 12 wt. %, dapat menyebabkan silikon primer yang keras. Sedangkan, paduan Cu pada aluminium ini ditambahkan dengan maksud untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan^[8].

Tabel 2.1 Seri Aluminium tuang berdasarkan standar AISI^[8]

Series	Unsur Paduan Utama
1xx.x	Al Murni (99%)
2xx.x	Tembaga (Cu)
3xx.x	Si-Cu / Si-Mg
4xx.x	Silikon (Si)
5xx.x	Magnesium (Mg)
7xx.x	Seng (Zn)
8xx.x	Sn
9xx.x	Lainnya

Berdasarkan tatanama AA (*Aluminum Association*) pada tabel 2.1, Al-Si-Cu merupakan aluminium seri 3xx.x. Paduan ini sering digunakan untuk keperluan industri aluminium karena sifat fisiknya yang baik, yaitu *castability*, ketahanan korosi, *weldability*, kekerasan, dan keuletan. Dengan kadar silikon pada Al-Si antara 2 – 20%, Al-Si terbagi menjadi 3 jenis yaitu, Al-Si hipoeutektik, eutektik, dan hipereutektik^[8]. Hal ini diperlihatkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram fasa Al-Si^[10]; (a) Si < 12 wt. % merupakan hipoeutektik
 (b) Si ± 12 wt. % merupakan eutektik
 (c) Si > 12 wt. % merupakan hipereutektik

2.2.4. Al-9Si-2Cu

Al-9Si-2Cu dapat dimasukkan kedalam standar Jepang yaitu AC4B. AC4B merupakan salah satu paduan aluminium berdasarkan standar JIS dari Jepang dengan komposisi terbanyak yaitu seperti silikon sebanyak 7 – 10 % dan Cu sebanyak 2 – 4 %^[11]. Paduan ini memiliki karakteristik yang berbeda pada kemampuan perlakuan panasnya dan kekerasannya.

Tabel 2.2 Komposisi kimia Aluminium Tuang menurut standar JIS^[11]

Tipe	Komposisi kimia (wt. %)											
	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
AC1B	0,2 – 5	> 0,3	0,15 – 0,35	> 0,1	> 0,35	> 0,1	> 0,05	0,05 – 0,35	> 0,05	> 0,05	> 0,05	Sisa
AC2A	3 – 4,5	4 – 6	> 0,25	> 0,55	> 0,8	> 0,55	> 0,3	> 0,2	> 0,15	> 0,05	> 0,15	Sisa
AC2B	2 – 4	5 – 7	> 0,5	> 1	> 1	> 0,5	> 0,35	> 0,2	> 0,2	> 0,1	> 0,2	Sisa
AC3A	> 0,25	10 – 13	> 0,15	> 0,3	> 0,8	> 0,35	> 0,1	> 0,2	> 0,1	> 0,1	> 0,15	Sisa
AC4A	> 0,25	8 – 10	0,3 – 0,6	> 0,25	> 0,55	0,3 – 0,6	> 0,1	> 0,2	> 0,1	> 0,05	> 0,15	Sisa
AC4B	2 – 4	7 – 10	> 0,5	> 1	> 1	> 0,5	> 0,35	> 0,2	> 0,2	> 0,1	> 0,2	Sisa
AC4C	> 0,2	6,5 – 7	0,2 – 0,4	> 0,3	> 0,5	> 0,6	> 0,05	> 0,2	> 0,05	> 0,05	-	Sisa
AC9B	0,5 – 1,5	18 – 20	0,5 – 1,5	> 0,2	> 0,8	> 0,5	0,5 – 1,5	> 0,2	> 0,1	> 0,1	> 0,1	Sisa

Berdasarkan tabel 2.2 AC4B dapat disetarakan dengan seri 3xx.x yang merupakan jenis paduan Al-Si-Cu/Mg yaitu seri AA308 dan A333.3. Hal ini dilihat dari referensi balik standar internasional dan kesamaan komposisi, sesuai dengan tabel 2.3 dan 2.4. Tabel 2.4 merupakan perbandingan komposisi antara AC4B, AA308, dan A333.3, yang menunjukkan adanya kesetaraan antara tiap standar internasional untuk spesifikasi aluminium Al-9Si-2Cu.

Tabel 2.3 Referensi jenis paduan aluminium berdasarkan standar internasional^[12]

INTERNATIONAL CROSS REFERENCES – ALUMINUM & ALUMINUM CAST ALLOYS						
USA AA	UK BS	GERMANY DIN	FRANCE NF	INTERNATIONAL ISO	JAPAN JIS	RUSSIA GOST
320	---	---	A-S7U3G	---	---	---
380	LM24	AlSi9Cu3	A-S9U3	AlSi8Cu3Fe	AC4B	AK8M3
---	---	---	A-S9U3Z	---	---	---
383	LM2	---	---	---	---	---

Tabel 2.4 Komposisi kimia paduan 333.3 yang setara dengan AC4B^[13]

Elemen Paduan	A333.3 (wt. %)	AC4B (wt. %)	AA380 (wt. %)
Cu	3 – 4	2 – 4	3 – 4
Si	8 – 10	7 – 10	7,5 – 9,5
Mg	0,05 – 0,5	0,5 max	0,1 max
Zn	1 max	1 max	3 max
Fe	1 max	1 max	1,3 max
Mn	0.5 max	0.5 max	0,5 max
Ni	0.5 max	0.35 max	0,5 max
Ti	0.25 max	0.2 max	0,2 max
Pb	-	0.2 max	-
Sn	-	0.1 max	0,35 max
Cr	-	0.2 max	-
Al	Sisa	sisia	Sisa

2.3. PENGHALUSAN BUTIR

2.3.1. Definisi Penghalusan butir

Penghalusan butir adalah proses penghalusan ukuran butir primer aluminium selama pembekuan^[14]. Pemberian penghalus butir pada aluminium bertujuan untuk memperkecil ukuran butir sehingga meningkatkan sifat mekanis dan mampu cornya. Selain itu, penghalus butir dapat meningkatkan *fluiditas* dari logam cair.

Proses penambahan penghalus butir biasanya dilakukan setelah proses *fluxing* seperti terlihat Gambar 2.5, hal ini ditujukan agar penghalus butir tidak terbuang pada saat *fluxing*. Selain itu, penghalus butir tidak akan bercampur dengan pengotor. Oleh karena itu, penambahan penghalus butir akan efektif.

Hal yang mempengaruhi fungsi dari Penghalus butir adalah efek fading, yaitu keefektifan Penghalus butir yang tergantung dari waktu kontak dengan logam cair. Jika kontak terlalu cepat, butir yang paling halus sulit tercapai. Namun, jika kontak terlalu lama, efektivitas akan rendah.



Gambar 2.5 Penempatan Penghalus butir pada proses pengecoran Aluminium^[3]:

- (a) Proses Penghalus butir tanpa Modifikasi
- (b) Proses Penghalus butir dengan Modifikasi Natrium
- (c) Proses Penghalus butir dengan Modifikasi Stronsium

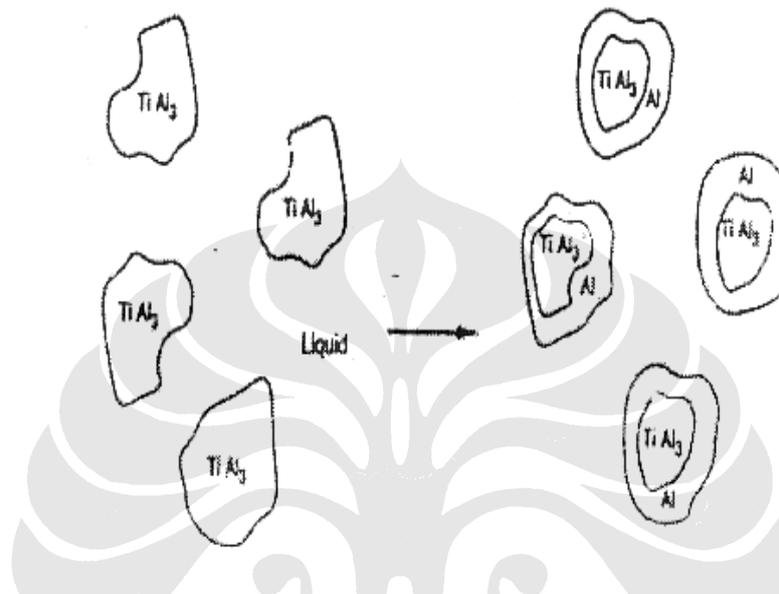
Adapun jenis Penghalus butir yang umum dipakai adalah^[3]:

- Titanium (Ti)
- Boron (B)
- Zirkonium (Zr)
- Gabungan unsur, seperti Al-Ti dan Al-Ti-B

2.3.2. Mekanisme Penghalusan butir

Ukuran butir yang kecil dipengaruhi dari pembekuan yang cepat pada saat setelah pengecoran pada aluminium. Awal pembekuan terjadi dari bagian yang lebih solid seperti dinding cetakan ataupun adanya partikel lain. Penghalus butir sebagai partikel lain ini memicu laju reaksi terbentuknya inti dan menghambat laju pertumbuhan kristal sehingga menghasilkan butir yang kecil.

Gambar 2.6 memperlihatkan partikel $TiAl_3$ yang berlaku sebagai inti. $TiAl_3$ diselimuti aluminium paduan yang membeku dari logam yang masih cair secara kontinyu sampai semua Aluminium paduan membeku. Terjadinya tegangan permukaan yang kecil menyebabkan viskositas menjadi rendah, mudah bergerak, kemudian fluiditas meningkat^[3].



Gambar 2.6 Mekanisme Efek Penghalusan butir^[3]

2.3.3. Penghalus Butir Ti

Pada Al-Si, penghalusan fasa α -Al merupakan hasil dari penambahan penghalus butir seperti titanium atau boron. Hal ini sering dilakukan pada industri-industri pengecoran aluminium dan otomotif. Pada proses ini, perbandingan berat yang dibutuhkan untuk membentuk nukleasi partikel $TiAl_3$ sebanding $3/1$ ^[14].

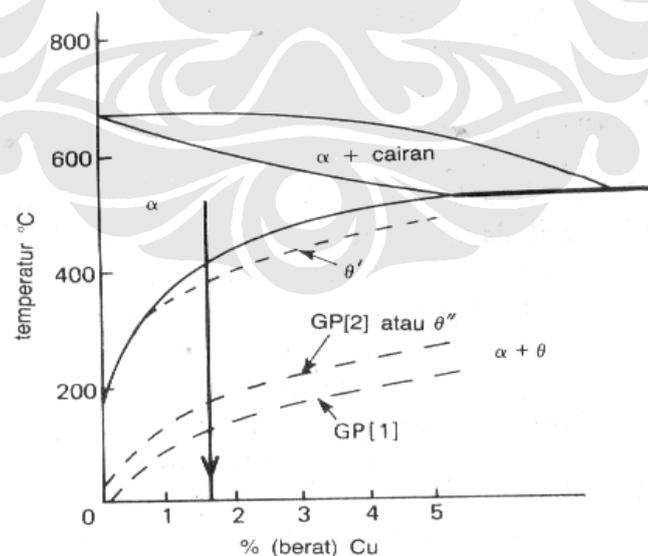
Ti merupakan penghalus butir yang efisien dengan aluminium pada kadar Si yang rendah. Jika kandungan Si pada Aluminium lebih besar atau sama dengan 7 wt.%, rasio paduan penghalus butir yang dipakai lebih rendah^[14]. Hal ini disebabkan Si dan Ti memiliki sifat yang meningkatkan kekerasan dan kegetasan.

2.4. PERLAKUAN PANAS Pengerasan Presipitasi

Pengerasan presipitasi adalah proses peningkatan kekuatan dengan memanfaatkan perbedaan kelarutan dari suatu unsur paduan pada perbedaan temperatur. Pada batas kelarutan terjadi penyusutan pada keadaan larutan padat dan meicu terbentuknya presipitasi. Pada paduan aluminium, pengerasan terjadi dalam matriks aluminium dengan kelarutan paduan yang lebih rendah dari pada unsur aluminiumnya. Proses pengerasan ini terdiri dari tiga tahap, yaitu: (1) *solution treatment*, (2) *quenching*, dan (3) penuaan.

2.4.1. Proses *solution treatment*

Solution treatment adalah pemanasan dengan tujuan melarutkan satu unsur paduan atau lebih dalam matriks aluminium dan mementuk satu fasa tanpa adanya peleburan. Proses ini menyebabkan pemisahan endapan paduan yang ada sebelumnya sehingga melarut dan menghasilkan paduan yang homogen. Berdasarkan Gambar 2.7, paduan berupa larutan homogen, misal α pada temperatur tinggi bila didinginkan akan berubah fasa menjadi fasa kedua, misal θ , kemudian fasa θ tersebut juga akan mengendap dan terjadi pengerasan kisi.



Gambar 2.7 Mekanisme proses *solution treatment* dilanjutkan dengan *quenching*^[16]

Pada *solution treatment*, paduan logam dipanaskan pada temperatur yang cukup tinggi dibawah temperatur leburnya tergantung jenis material dan paduannya kemudian dilakukan pencelupan cepat. Setelah pencelupan, material akan mengalami penuaan alami jika didiamkan pada temperatur ruang, dan penuaan buatan jika dipicu dengan proses perlakuan panas tambahan. Pada proses ini fasa kedua berpresipitasi^[15].

Pada penelitian ini, *solution treatment* dilakukan pada temperatur diantara temperatur kelarutan dan pembekuan. Kemudian paduan dipertahankan pada temperatur tersebut dalam waktu tertentu sehingga membentuk *solid solution* yang merata dan homogen.

2.4.2. Quenching

Quenching atau pencelupan cepat dilakukan untuk mencegah terjadinya pemisahan fasa kedua yang terjadi akibat dari proses *solution treatment*. Kecepatan pendinginan harus cukup cepat agar dapat mempertahankan atom yang larut dalam *solid solution* dan juga mempertahankan adanya *vacancies* (kekosongan atom) sebagai tempat difusi atom-atom membentuk kluster atom pada saat penuaan. Bila *quenching* tidak dilakukan dengan cepat, maka akan terbentuk fasa lain intermetalik dan *vacancies* akan dapat terisi dengan atom lain sehingga proses difusi akan menjadi sulit.

Setelah proses *quenching*, paduan akan bersifat *super saturated solid solution* (SSSS) dimana terdapat atom-atom yang tidak stabil sehingga dapat dimanfaatkan untuk proses penuaan. Pada umumnya, setelah proses *quenching*, kekerasan akan meningkat drastis, karena pergerakan atom-atom tersebut secara atomik.

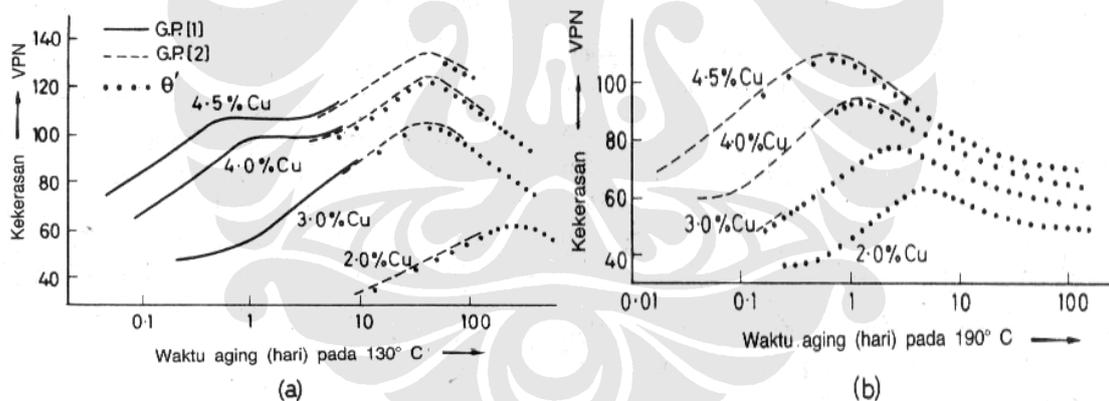
2.4.3. Penuaan

Penuaan adalah proses pembentukan endapan hasil dari pergerakan atom-atom pada SSSS akibat *solution treatment* dan *quenching*. Untuk memicu pergerakan atom-atom, dilakukan pemanasan pada paduan.

Pada penuaan ini, presipitat akan mengalami dua hal, yaitu pengintian (*nukleasi*) dan pertumbuhan presipitat. Presipitat ini terjadi melalui proses nukleasi dari

kluster atom dalam kisi yang berubah menjadi inti presipitat. Laju atom bernukleasi sebanding dengan laju migrasi atom yang semakin meningkat jika temperatur penuaan meningkat. Jika temperatur penuaan meningkat maka laju pengintian akan menurun dan pertumbuhan presipitat akan meningkat. Namun, jika temperatur penuaan menurun, maka laju pengintian akan meningkat dan pertumbuhan presipitat menurun. Pada waktu penuaan, perubahan sifat pada material yang telah dicelup lebih jelas, khususnya sifat mekanik mengalami perubahan yang cukup berarti pada sifat yang peka struktur seperti kekerasan, keuletan, dan tegangan luluh^[15].

Pada penuaan, jika temperatur yang digunakan makin tinggi dari batas optimal, maka kekerasan akan makin menurun. Sebagai contoh, hal ini dapat dilihat dari perbandingan grafik gambar 2.8, dimana penuaan dengan temperatur 130 °C menghasilkan rata-rata kekerasan tiap komposisi yang lebih tinggi dari penuaan dengan temperatur 190 °C.



Gambar 2.8 Pengaruh temperatur penuaan dengan kekerasan, temperatur penuaan lebih rendah (a) menghasilkan kekerasan lebih tinggi dari temperatur penuaan lebih tinggi (b)^[15]

Jika temperatur penuaan tinggi, maka difusi atom akan meningkat, sehingga waktu untuk berpindah atom menjadi cepat. Energi bebas yang rendah dan energi aktifasi yang besar menyebabkan nukleasi sedikit hanya pada batas butir saja. Ketika dilanjutkan, panas yang tinggi akan memberikan kesempatan pada endapan

untuk membentuk sebuah fasa yang butirnya besar sehingga energi permukaan dan regangan rendah, kekerasan rendah. Pada penuaan dengan temperatur rendah, nukleasi terbentuk dalam kristal atau butir, namun difusi yang lambat membutuhkan waktu yang lama untuk selesai sehingga lebih merata endapannya.

2.4.4. Mekanisme penguatan

Pada penuaan, endapan yang terbentuk, melalui beberapa tahapan hingga menuju kesetimbangan fasa. Tahapan tersebut, yaitu, GP zone I, GP zone II, θ' -CuAl₂, dan θ -CuAl₂. GP zone I merupakan kluster yang bersifat koheren akibat difusi atom, biasanya terjadi pada masa *underaged* sebuah paduan. Kluster koheren tersebut merupakan kumpulan atom yang membuat distorsi pada struktur Kristal, tapi masih tetap terhubung dengan struktur kristalnya.

Pada GP zone I atom akan bergerak membentuk GP zone II, kemudian akan tumbuh menjadi θ' -CuAl₂ yang semikoheren, lalu θ -CuAl₂ yang bersifat inkoheren. Pembentukan θ CuAl₂ biasanya menunjukkan telah terjadinya *overaged*.

Presipitasi akibat koherensi tersebut akan membuat pergerakan dislokasi menjadi terhalang sehingga terjadi efek pengerasan. Adanya regangan dalam menyebabkan terjadinya dislokasi yang memotong endapan atau bergerak membuat suatu loop.

Sedangkan presipitasi inkoheren adalah endapan dimana sudah terjadi suatu fasa stabil yang berbeda struktur kristalnya, sehingga akan melemahkan kekuatan dari matriks tersebut. Mekanisme penguatan tergantung dari adanya dislokasi yang terhambat, dengan adanya banyak endapan mengakibatkan sulit Bergeraknya dislokasi. Kekuatan pada paduan dengan pengerasan penuaan ditentukan oleh adanya interaksi dislokasi yang bergerak dengan presipitat. Pergerakan dislokasi terhambat karena adanya zona disekitar presipitasi dan presipitasi itu sendiri sehingga memberikan regangan pada daerah tersebut.

2.5. PENGARUH STRUKTUR MIKRO TERHADAP SIFAT PADUAN ALUMINIUM

Adapun hal-hal yang berkaitan dengan mikrostruktur paduan aluminium yang berpengaruh terhadap sifat mekanis paduan aluminium adalah, sebagai berikut^[16]:

- Bentuk, ukuran, dan distribusi dari fasa intermetalik
- Jarak lengan dendrite
- Bentuk dan batas butir
- Modifikasi eutektik

2.5.1. Fasa intermetalik

Fasa intermetalik pada paduan aluminium merupakan fasa kedua yang tidak terlarut pada matriks paduan aluminium. Hal ini dapat terjadi jika komposisi paduan melebihi batas kelarutan pada aluminium. Pada paduan Al-Si, fasa yang sering mengendap mengandung Mn dan Fe. Fasa intermetalik yang sering muncul adalah Al_5FeSi , $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$, Mg_2Si dan Al_2Cu . Adapun tahapan pembentukan fasa intermetalik pada saat solidifikasi diperlihatkan pada tabel 2.5^[16].

Tabel 2.5 tahapan pengendapan fasa intermetalik pada hipoeutektik^[16]

Kondisi	Fasa yang mengendap
Aluminium cair	-
650 °C	$Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ primer
600 °C	Alumunium dendrit, dan $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ atau Al_5FeSi
550 °C	Eutektik Al-Si, Al_5FeSi , dan Mg_2Si
500 °C	Al_2Cu dan fasa kompleks
Aluminium padat	-

Bentuk, ukuran, dan distribusi fasa intermetalik akan mempengaruhi sifat mekanis pada paduan aluminium tergantung dari endapan fasa intermetalik yang terbentuk. Bentuk, ukuran fasa yang makin besar dan distribusi fasa intermetalik yang makin

banyak akan memperbesar pengaruh sifat mekanis yang diberikan oleh fasa intermetalik kepada aluminium paduan. Sedangkan, jika bentuk, ukuran lebih kecil, dan distribusi lebih sedikit akan memperkecil pengaruh fasa intermetalik^[16].

2.5.2. Jarak Lengan *Dendrit*

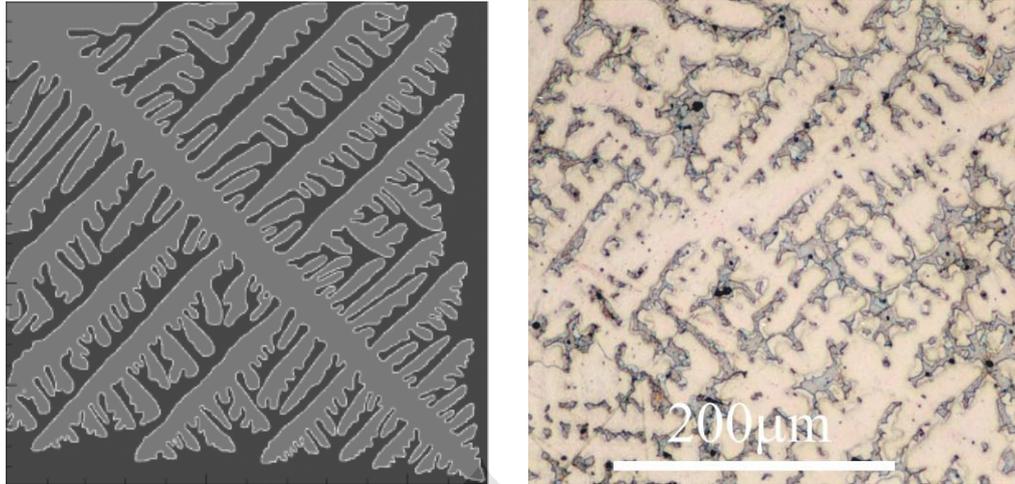
Jarak lengan *dendrit* menunjukkan besarnya jarak antara dua lengan dari *dendrit* sekunder. Jarak antar lengan *dendrit* dapat dilihat dari gambar 2.10. Semakin besar jarak lengan *dendrit*, maka semakin kasar mikrostrukturnya, dan semakin mempengaruhi sifat mekanisnya. Jarak lengan *dendrit* yang halus diinginkan untuk meningkatkan sifat mekanis dari matriks paduan aluminium.

Jarak lengan *dendrit* sangat dipengaruhi oleh proses pembekuan pada saat pengecoran, dimana semakin tinggi laju pembekuan, maka akan semakin kecil jaraknya, sesuai tabel 2.6. Selain itu, tabel 2.6 menunjukkan bahwa proses pembekuan tersebut dipengaruhi dari jenis cetakan yang dipakai^[16].

Tabel 2.6. hubungan laju pembekuan dengan jarak lengan *dendrit*^[16]

Proses pengecoran	Laju pembekuan		Jarak lengan <i>dendrit</i>	
	°F/s	°C/s	Mils	µm
<i>Plaster, investment casting</i>	1,80	1	3,94 – 39,4	100 – 1000
Cetakan pasir dan <i>shell moulding</i>	18,0	10	1,97 – 19,7	50 – 500
Cetakan permanen	180	100	1,18 – 2,76	30 – 70
<i>Dies</i>	1800	1000	0,2 – 0,59	5 - 15

Pada lengan *dendrit* biasanya sering terdapat jarak lengan *dendrit* sekunder (*secondary dendrite arm spacing/SDAS*) yaitu jarak antara lengan *dendrit* sekunder seperti terlihat pada gambar 2.10 a. Biasanya, semakin kecil nilai jarak lengan sekunder ini, kualitas pengecoran semakin bagus.



(a)

(b)

Gambar 2.10. (a) penampang lengan jarak antar *dendrit*;
 (b) lengan jarak antar *dendrit* pada mikrostruktur;

2.5.3. Ukuran, Bentuk, dan Batas Butir

Ukuran butir yang halus dan searah merupakan hal yang diharapkan untuk mencapai kombinasi terbaik dalam kekuatan dan keuletan pada paduan aluminium. Untuk mendapat butir yang halus, dapat dengan cara memaksimalkan luas permukaan batas butir^[16].

Jenis dan ukuran dari butir berkaitan dengan komposisi, laju solidifikasi, dan banyaknya nukleasi. Meningkatnya laju solidifikasi, akan mengurangi ukuran butir. Namun, untuk struktur cetakan yang lebih rumit, laju solidifikasi mencapai nilai yang lebih rendah dibandingkan nukleasi heterogen melalui penambahan penghalus butir.