

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 PISTON

Piston adalah komponen dari mesin pembakaran dalam yang berfungsi sebagai penekan udara masuk dan penerima hentakan pembakaran pada ruang bakar silinder liner. Piston akan mentransfer gas dalam *cylinder head* menuju ke *crankshaft* melalui *piston rod* atau *connecting rod*. Komponen mesin ini dipegang oleh *piston rod* yang mendapatkan gerakan turun-naik dari gerakan berputar *crankshaft*[1]. Gambar dibawah ini merupakan contoh piston yang terdapat pada komponen sepeda motor.



Gambar 2.1 Piston pada Sepeda Motor[2]

Piston sangat mungkin bergesekan dengan dinding *cylinder head* karena gerakannya yang naik turun. Untuk itu piston membutuhkan material yang memiliki ketahanan aus yang baik untuk mempertahankan dimensinya sehingga piston dapat bekerja secara optimal.

2.2 ALUMINIUM DAN PADUANNYA

2.2.1 Sifat Paduan Aluminium

Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1809 sebagai unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H.C. Oersted tahun 1825. Secara industrial tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C.M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah mengolah logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa dari garamnya yang terfusi. Sampai sekarang proses Heroult Hall masih dipakai untuk memproduksi aluminium. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya berada pada urutan kedua setelah besi dan baja, yang tertinggi di antara logam non ferrous.

Aluminium banyak digunakan pada industri manufaktur karena aluminium ringan, dapat dengan mudah dikombinasikan dengan unsur lain (*alloying*) untuk mengatur karakteristik seperti sifat mekanis, sifat mampu cor (*castability*), sifat mampu mesin (*machineability*), *surface finish*, ketahanan korosi, konduktivitas panas dan listrik, sifat mampu las (*weldability*), dan ketahanan terhadap hot tear (*hot tear resistance*). Kualitas dari produk hasil pengecoran tersebut juga masih dapat ditingkatkan dengan metode modifikasi, penghalusan butir serta perlakuan panas (*heat treatment*).

Beberapa karakteristik aluminium tersebut ialah:

- Aluminium memiliki titik lebur yang rendah (± 660 °C). Hal tersebut dapat menghemat penggunaan energi dalam proses peleburannya. Serta sifat kelarutan gas yang kecil (kecuali hidrogen, penyebab porositas dalam Al).
- Massa jenis aluminium sekitar 1/3 dari massa jenis baja (ρ Al alloy = 2.6-2.9 g/cm³ sedangkan ρ baja karbon = 7.85 g/cm³).
- Aluminium AA 356 memiliki kekuatan luluh lebih kecil dari pada baja sehingga lebih mudah dibentuk (σ .yield paduan Al = 163 MPa dalam keadaan setelah T6; σ .yield baja 4340 dalam keadaan normalisasi = 862 MPa.) Selain itu aluminium memiliki sifat ulet (% elongasi = 3,5-6%).
- Aluminium memiliki sifat konduktivitas thermal yang baik, sehingga Al memiliki transfer panas yang cukup cepat dibandingkan baja (c Al = 247 W/m-K; c baja karbon = 50-65.3 W/m-K).

2.2.2 Pengaruh Unsur Mayor pada Aluminium

Unsur paduan utama yang terdapat pada aluminium memiliki pengaruh terhadap karakteristik dan sifat mekanis aluminium. Unsur paduan utama yang terdapat pada paduan aluminium diantaranya adalah Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Zn, dan Si.

1. 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[3].

2. Copper (Cu)

Paduan Aluminium-copper mengandung 2-10% Cu, biasanya dengan paduan lain menghasilkan keluarga paduan lainnya. Baik *casting* dan *wrought aluminium-copper alloy* respons dengan *heat treatment* dan proses *ageing* dengan kenaikan kekuatan dan kekerasan dan penurunan elongasi. Penguatan maksimum terjadi pada penambahan Cu sebesar 4-6%, tergantung dari keberadaan paduan lain dan dengan Al membentuk fasa CuAl_2 [3].

3. Magnesium (Mg)

Magnesium adalah elemen paduan utama pada paduan seri 5xxx. Maksimum kelarutan padat pada Al ialah 17,4%, tapi kandungan pada paduan tempa sekarang tidak melebihi 5,5%. Penambahan Mg meningkatkan kekuatan secara mencolok Aluminium tanpa terlalu menurunkan sifat keuletan. Mempunyai Ketahanan korosi dan *weldability* yang bagus, selain itu dengan Si membentuk fasa Mg_2Si [3].

4. Chromium (Cr)

Paduan ini memberikan efek besar pada *electrical resistivity*. Chromium biasanya ditambahkan pada banyak paduan aluminium seperti aluminium-magnesium, aluminium-magnesium-silikon, dan aluminium-magnesium-zinc, penambahannya biasanya tidak melebihi 0,35%. Jika penambahannya berlebihan

dari batas tersebut maka akan menghasilkan konstituen yang kasar dengan *impurities* lain atau penambahan elemen lain seperti mangan, besi dan titanium. Chromium memiliki laju difusi yang rendah dan membuat fasa halus yang terdispersi pada produk tempa. Fasa terdispersi ini mencegah nukleasi dan pertumbuhan butir. Chromium digunakan untuk mengontrol struktur butir, untuk menjaga pertumbuhan butir pada paduan aluminium-magnesium-zinc selama proses *hot working* atau *heat treatment*[3].

5. Iron (Fe)

Iron ialah *impurity* (kotoran) paling umum yang terdapat pada Aluminium. Ini mempunyai kelarutan yang tinggi pada Al cair dan oleh karena itu iron mudah larut pada semua tahap lelehan produksi. Kelarutan Besi pada saat *solid* sangat rendah (~0,04%) dan oleh karena itu, kebanyakan besi yang hadir pada Aluminium melebihi dari jumlah ini, muncul sebagai fasa kedua *intermetallic* pada kombinasi dengan Al dan juga dengan elemen lain[3].

6. Manganese (Mn)

Manganese atau mangan ialah *impurity* yang umum pada Aluminium primer, konsentrasinya biasanya dari 5 sampai 50 ppm. Mangan menurunkan *resistivity* (daya hambat). Mn meningkatkan kekuatan baik pada *solid solution* atau sebagai endapan yang bagus pada fasa *intermetallic*. Ini tidak mempunyai efek merugikan pada ketahanan korosi. Mn mempunyai keterbatasan kelarutan solid pada Al dengan kehadiran dari normal *impurities* tapi sisanya pada larutan ketika *chill cast* sehingga kebanyakan penambahan Mn pada pokoknya pitahan pada larutan, meski pada ingot yang besar[3].

7. Nickel (Ni)

Kelarutan solid dari Ni pada Al tidak melebihi 0.04%. Jika lebih dari jumlah ini, maka Ni hadir sebagai intermetalik ($Al_{15}(MnFe)_3Si_2$) yang tidak larut, biasanya dikombinasikan dengan besi. Ni (naik hingga 2%) meningkatkan kekuatan dari *high-purity* Aluminium tapi mengurangi keuletan. Paduan biner Al-Ni tidak lagi digunakan, namun Ni ditambahkan pada paduan Al-Cu dan Al-Si untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan pada peningkatan temperatur dan mengurangi koefisien ekspansi[3].

8. Zinc (Zn)

Paduan Aluminium-Zinc telah dikenal selama bertahun-tahun, tapi *hot cracking* dari paduan *casting* dan kerentanan akan retak tegangan-korosi dari paduan tempa mengurangi penggunaannya. Paduan Al-Zn mengandung elemen lain memberi kombinasi sangat tinggi dari *tensile properties* pada paduan Al tempa[3].

2.2.3 Pengaruh Unsur Minor pada Aluminium

Selain unsur paduan utama, terdapat unsur paduan lain dalam aluminium diantaranya arsenik, beryllium, boron, cadmium, calcium, carbon, cerium, cobalt dan titanium yang memiliki pengaruh pada paduan.

1. Arsenic

Paduan AsAl adalah semikonduktor. Arsenic sangat beracun (dalam bentuk AsO_3) dan harus dikontrol untuk batas yang sangat rendah untuk aluminium yang digunakan untuk pembungkus pengemasan makanan[3].

2. Beryllium

Beryllium digunakan dalam paduan aluminium yang mengandung magnesium untuk mengurangi oksidasi pada temperatur tinggi. Be Hingga kandungan 0,1% digunakan untuk *aluminizing bath* untuk baja yang digunakan untuk meningkatkan adhesi dari film aluminium dan mencegah pembentukan *iron-aluminium complex* yang sangat berbahaya[3].

3. Bismuth

Logam dengan titik lebur yang rendah seperti bismuth, timbal, timah dan cadmium ditambahkan ke aluminium untuk membuat paduan dengan kemampuan *machining*. Paduan-paduan ini memiliki kelarutan yang terbatas dalam aluminium solid dan membentuk fasa yang *soft*, dan fasa dengan titik lebur yang rendah yang dapat memicu *chip breaking* dan membantu untuk melumasi alat potong. Keunggulan bismuth adalah nilai ekspansi pada proses solidifikasi menghambat *shrinkage*. Rasio 1 : 1 antara timbal dan bismuth digunakan untuk paduan aluminium-tembaga, 2011 dan pada paduan aluminium-magnesium-silikon, 6262. Sedikit penambahan bismuth (20 – 200 ppm) dapat ditambahkan untuk paduan

aluminium-magnesium untuk mencegah efek berbahaya dari sodium pada *hot cracking*[3].

4. Boron

Boron digunakan pada aluminium dan paduannya sebagai *grain refiner* dan untuk meningkatkan konduktifitas dengan pengendapan vanadium, titanium, chromium dan molybdenum. Boron dapat digunakan sendiri (pada level 0,005% - 0,1%) sebagai *grain refiner* selama proses solidifikasi, namun menjadi lebih efektif saat digunakan dengan titanium berlebih. *Grain refiner* komersial biasanya mengandung titanium dan boron dengan rasio 5 : 1[3].

5. Cadmium

Cadmium adalah elemen dengan titik lebur yang relatif rendah yang ditemukan terbatas pada penggunaan aluminium. Penambahan hingga 0,3% Cd pada paduan aluminium-tembaga menghasilkan percepatan akselerasi laju *age hardening*, peningkatan kekuatan, dan peningkatan ketahanan korosi. Pada level 0,005% - 0,5%, Cd digunakan untuk mengurangi waktu *ageing* dari paduan aluminium-zink-magnesium[3].

6. Calcium

Kalsium memiliki kelarutan yang sangat rendah dalam aluminium dan membentuk senyawa intermetallic CaAl_4 . Grup aluminium paduan yang memiliki sifat superplastik mengandung 5% Ca dan 5% Zn. Kalsium berkombinasi dengan silikon membentuk CaSi_2 , dimana senyawa ini tidak terlarut dalam aluminium. Akibatnya akan meningkatkan konduktifitas dari paduan tersebut. Pada paduan aluminium-magnesium-silikon, kalsium akan menurunkan *age hardening*. Efeknya pada paduan aluminium-silikon adalah untuk meningkatkan kekuatan dan menurunkan elongasi, namun tidak membuat paduan ini *heat treatable*[3].

7. Carbon

Karbon biasanya terdapat dalam aluminium sebagai impurities dalam bentuk *axycarbide* dan karbida yang bentuknya adalah Al_4C_3 . Namun pembentukan karbida dengan dengan impurities lain dapat saja terjadi, misalnya dengan titanium. Al_4C_3 membusuk dengan keberadaan air dan uap air, hal ini akan memicu *pitting* pada permukaan[3].

8. Cerium

Cerium biasanya dalam bentuk *mischmetal* (senyawa langka dengan kandungan 50% - 60% Ce), ditambahkan pada paduan untuk meningkatkan fluiditas dan mengurangi *die sticking*[3].

9. Cobalt

Cobalt bukan elemen paduan yang biasa ditambahkan pada paduan aluminium. Co ditambahkan untuk beberapa paduan aluminium-silikon yang mengandung besi, dimana cobalt dapat mengubah acicular β (aluminum-iron-silicon) menjadi fasa aluminum-cobalt-iron yang lebih bulat yang nantinya akan meningkatkan kekuatan dan elongasi. Paduan aluminum-zinc-magnesium-tembaga mengandung 0,2-1,9% Co dihasilkan dengan *powder metallurgy*[3].

10. Titanium

Titanium yang merupakan unsur minor pada aluminium biasa digunakan sebagai elemen penghalus butir (*grain refiner*) jika dipadu dengan boron seperti AlB_2 atau $(Al,Ti)B_2$ [4].

2.2.4 Penandaan Paduan Aluminium

Aluminium dan paduannya ditandakan berdasarkan apakah mereka *wrought product* atau *cast product*. Sistem penandaan tersebut dapat dilihat pada tabel 2.1 untuk *wrought product* dan tabel 2.2 untuk *cast product*.

Tabel 2.1. Penandaan Paduan Wrought Aluminium[5]

Designation	Major Alloying element
1XXX	None, 99.00 % min. aluminium.
2XXX	Copper (Cu)
3XXX	Manganese (Mn)
4XXX	Silicon (Si)
5XXX	Magnesium (Mg)
6XXX	Magnesium and Silicon
7XXX	Zinc (Zn)
8XXX	Other than the above elements
9XXX	Unused

Tabel 2.2. Penandaan Paduan Cast Aluminium[5]

Designation	Major Alloying element
1XX.Y	None, 99.00 % min. aluminium.
2XX.Y	Copper (Cu)
3XX.Y	Si-Mg, Si-Cu, Si-Cu-Mg
4XX.Y	Silicon (Si)
5XX.Y	Magnesium (Mg)
7XX.Y	Zinc (Zn)
8XX.Y	Tin (Sn)
9XX.Y	Other elements from those above
6XX.Y	Unused

Keterangan :

- Angka pertama : kelompok paduan.
- Angka kedua & ketiga : kemurnian minimum aluminium.
- Angka desimal : bentuk produk (0 untuk produk casting 1 dan 2 untuk imgot produk hasil peleburan ulang)

Material piston termasuk dalam Aluminium casting seri 3 yaitu termasuk dalam paduan Aluminium Si-Cu-Mg. Material paduan aluminium seri 3 yang biasa dipakai untuk casting piston adalah AA 336.0 atau dalam standar JIS adalah material AC8A karena memiliki komposisi kimia yang hampir sama.

2.2.5 Paduan Al-Si-Mg-Cu

Paduan ini mengandung silikon dengan Copper dan/atau Magnesium. Paduan ini memiliki mampu cor yang baik dan dalam waktu yang sama paduan ini dapat di keraskan dan memiliki kekuatan yang baik dengan heat treatment tetapi bagaimanapun seiring dengan meningkatnya kekuatan akan mengorbankan ductility dan ketahanan korosinya. Oleh karena itu paduan ini banyak digunakan untuk pengecoran Aluminium[5].

2.2.6 Material AC8A

Material AC8A banyak digunakan untuk pembuatan piston motor pada banyak industri manufaktur. Hal ini dikarenakan material AC8A memiliki kekuatan yang baik, memiliki ketahanan aus yang baik, koefisien ekspansi linear panas yang rendah, dan densitas yang relatif ringan sehingga sangat cocok sebagai material pembuat piston. Selain itu AC8A memiliki kemampuan cor yang baik, sehingga sangat baik untuk proses pengecoran piston yang memiliki bentuk rumit. Tabel 2.3 merupakan tabel komposisi kimia paduan aluminium sesuai standar JIS H5202. Dari tabel tersebut terlihat bahwa AC8A mengandung komposisi utama Al, Si, Cu, dan Mg.

Tabel 2.3. Komposisi kimia paduan aluminium AC8A sesuai standar JIS H5202[6]

Kelas	Simbol	Komposisi Kimia %								
		Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Al
Kelas 1A	AC 1A	4.0-5.0	1.2 max	0.3 max	0.3 max	0.5 max	0.3 max	-	0.25 max	sisa
Kelas 2A	AC 2A	3.5-4.5	4.0-5.0	0.2 max	0.5 max	0.8 max	0.5 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 2B	AC 2B	2.0-4.0	5.0-7.0	0.5 max	1.0 max	1.0 max	0.5 max	0.3 max	0.2 max	sisa
Kelas 3A	AC 3A	0.2 max	10.0-13.0	0.1 max	0.3 max	0.8 max	0.3 max	-	-	sisa
Kelas 4A	AC 4A	0.2 max	8.0-10.0	0.4-0.8	0.2 max	0.5 max	0.3-0.8	-	0.2 max	sisa
Kelas 4B	AC 4B	2.0-4.0	7.0-10.0	0.5 max	1.0 max	1.0 max	0.5 max	0.3 max	0.2 max	sisa
Kelas 4C	AC 4C	0.2 max	6.5-7.5	0.2-0.4	0.3 max	0.5 max	0.5 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 4D	AC 4D	1.0-1.5	4.5-5.5	0.4-0.6	0.3 max		0.5 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 5A	AC 5A	3.5-4.5	0.6 max	1.2-1.8	0.1 max	0.8 max	0.5 max	1.2-2.3	0.2 max	sisa
Kelas 7A	AC 7A	0.1 max	0.3 max	3.5-5.5	0.1 max	0.4 max	0.6 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 7B	AC 7B	0.1 max	0.3 max	9.5-11.0	0.1 max	0.4 max	0.1 max	-	0.2 max	sisa
Kelas 8A	AC 8A	0.8-1.3	11.0-13.0	0.7-1.3	0.1 max	0.8 max	0.1 max	1.0-2.5	0.2 max	sisa
Kelas 8B	AC 8B	2.0-4.0	8.5-10.5	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	0.5-1.5	0.2 max	sisa
Kelas 8C	AC 8C	2.0-4.0	8.5-10.5	0.5-1.5	0.5 max	1.0 max	0.5 max	-	0.2 max	sisa

Tabel 2.4. Spesifikasi paduan aluminium AA 336[7]

AA Number	Former Designation	P= Permanent Mold	Federal (QQ-A-596) (QQ-A-601E)	Former ASTM (B26) (B108)	Former SAE (J453c)	Military Mil-A-21180
336.0	A 332.0	P	A 132	SN122A	321	-

Tabel 2.5. Komposisi kimia paduan aluminium AA 336[7]

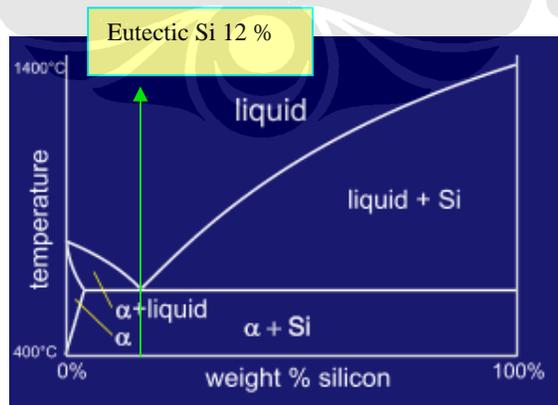
AA number	Cu	Si	Mg	Zn	Other
336.0	0.5 – 1.5	11.0 – 13.0	0.7 – 1.3	0.35	Ni 2.0-3.0, Fe 1.2

Tabel 2.6. Karakteristik paduan aluminium AA 336[7]

AA Number	Fluidity	Resistance to hot crack	Pressure Tightness	Strength at Elevated Temp.	Corrosion Resistance	Machinability Appearance	Anodizing Appearance	Polishing	Weldability
336.0	1	2	2	1	3	4	4	4	3

*1, 2, 3, 4, adalah rating, 1 merupakan nilai tertinggi atau terbaik.

Dilihat dari komposisi kimianya material AC8A ataupun AA 336.0 memiliki komposisi kimia yang hampir sama. Dapat kita lihat melalui tabel diatas (2.4, 2.5, 2.6) bahwa material AC8A merupakan paduan Al-Si pada kondisi eutektik yaitu 12% Si ataupun sedikit hypereutektik[8]. Gambar 2.2 dibawah ini merupakan diagram fasa dari Al-Si.



Gambar 2.2. Diagram Fasa Al-Si[9]

Kondisi Eutectic pada proses casting sangat diinginkan karena 2 hal, yaitu:

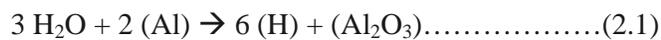
1. Kondisi Eutectic menghindari fasa lumpur, sehingga pada saat solidifikasi tidak ada material yang membeku terlebih dahulu, sehingga kita dapat menghindari misrun dan memiliki fluidity yang baik.
2. Kondisi Eutectic memiliki titik lebur yang terendah, jika kita mengacu pada diagram fasa Al- Si, hal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

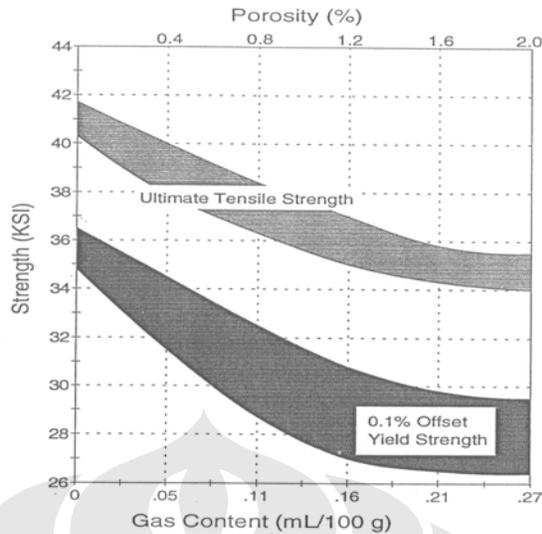
Pada daerah hypoeutectic, kandungan Si kurang dari 12 %. Dapat dipastikan Si terlarut semua. Keuntungan dari aluminium yang memiliki kondisi hypoeutektik adalah: machinability lebih baik dan ketangguhan lebih baik. Sedangkan kerugiannya adalah kekuatan dan kekerasan lebih rendah. Sehingga bila diaplikasikan dalam industri manufaktur piston, produk akhir akan memiliki kekerasan yang tidak optimal (cenderung tidak keras).

Pada daerah hipereutektik, Si terdapat sekitar 14 %-18 %. Pada fasa ini terdapat Silikon Primer 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/piston). 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 Si primer maka kekerasan tidak homogen dan machinability kurang baik.

2.3 KELARUTAN HIDROGEN PADA ALUMINIUM

Hidrogen merupakan gas yang mudah sekali larut dalam Aluminium cair, hal ini disebabkan karena afinitas kelarutan hidrogen sangat tinggi pada temperatur aluminium yang tinggi yang menghasilkan Al₂O₃[10], dijelaskan oleh reaksi berikut:

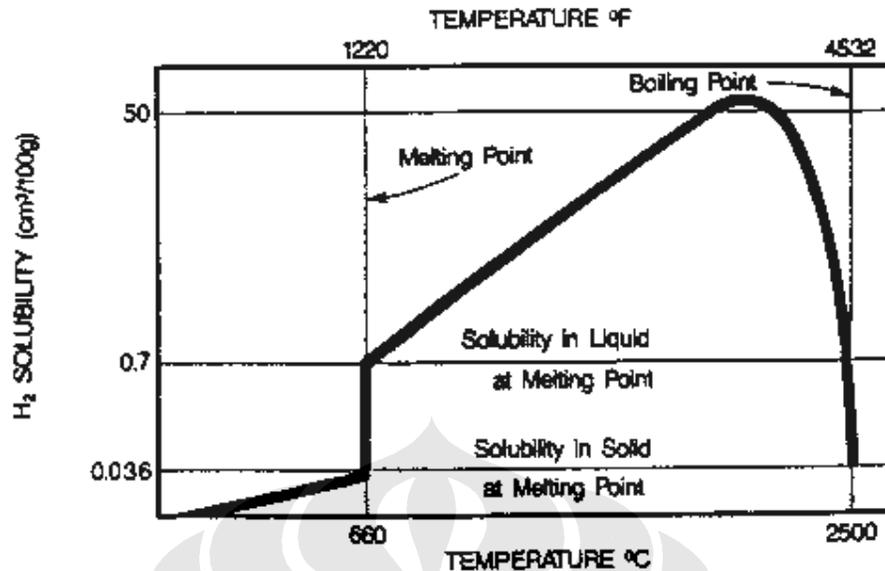




Gambar 2.3. Kelarutan hidrogen vs kekuatan pada aluminium[10]

Kelarutan hidrogen akan mempengaruhi kekuatan aluminium seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. Larutnya gas hidrogen dalam aluminium cair disebabkan oleh lingkungan yang lembab, material bahan yang kurang baik, proses penggunaan *flux* yang tidak optimal (tidak menutupi seluruh permukaan aluminium cair), proses *degassing* yang tidak sempurna sehingga gas hidrogen yang terlarut tidak terbawa keluar, dan juga kondisi cetakan pasir memiliki permeabilitas besar akibat kurangnya kadar air sehingga gas hidrogen dari luar dapat masuk ke dalam cetakan[10]. Selama pendinginan dan pembekuan dari aluminium cair, hidrogen berlebih yang terlarut akan mengendap dalam bentuk molekul, sehingga dapat mengakibatkan pembentukan porositas baik primer maupun sekunder[11]. Pengaruh temperatur cairan aluminium terhadap kelarutan hidrogen diperlihatkan pada gambar 2.4.

Beberapa unsur paduan juga dapat memberikan pengaruh terhadap kelarutan gas hidrogen dalam aluminium. Unsur paduan seperti silikon dan tembaga akan menurunkan kelarutan gas hidrogen karena dapat menghambat reaksi penguraian uap air oleh aluminium cair sehingga cacat yang dihasilkan dapat berkurang, sebaliknya unsur paduan magnesium justru akan semakin meningkatkan kelarutan hidrogen dalam aluminium cair, karena magnesium bertindak sebagai katalisator reaksi penguraian uap air oleh aluminium cair[11].



Gambar 2.4. Kelarutan hidrogen vs temperatur aluminium cair[12]

2.4 GRAVITY CASTING

Gravity casting adalah teknik pengecoran menggunakan cetakan logam dimana logam cair masuk kecetakan dengan gaya gravitasi. Umumnya dikenal dengan istilah Permanent Mold Casting. Pengecoran dalam cetakan logam dilaksanakan dengan menuangkan logam ke dalam cetakan logam seperti pada pengecoran dengan menggunakan cetakan pasir. Cara ini agak sedikit berbeda dengan die casting, tidak dipergunakan tekanan kecuali tekanan yang berasal dari gaya gravitasi pada saat penuangan[13].

Keuntungan-keuntungan dalam pengecoran dengan menggunakan gravity casting adalah[13]:

- 1). Ketelitian ukuran sangat baik kalau dibandingkan dengan pengecoran pasir sehingga tambahan ukuran untuk penyelesaian dapat dikurangi. Oleh karena itu mungkin membuat coran yang lebih ringan. Selanjutnya permukaan coran sangat halus.
- 2). Struktur yang rapat dapat dihasilkan dengan cara ini, oleh karena itu sifat-sifat mekanis dan sifat tahan tekanan sangat baik bila dibandingkan dengan coran yang dibuat pada cetakan pasir.

3). Mekanisme dari proses adalah mudah dan produktivitas tinggi apabila dibandingkan dengan cetakan pasir. Cara ini sangat cocok untuk produksi massal.

4). Luas lantai untuk pengecoran sedikit dan suasana kerja baik.

Kerugian – kerugian dalam pengecoran dengan menggunakan gravity casting adalah[13]:

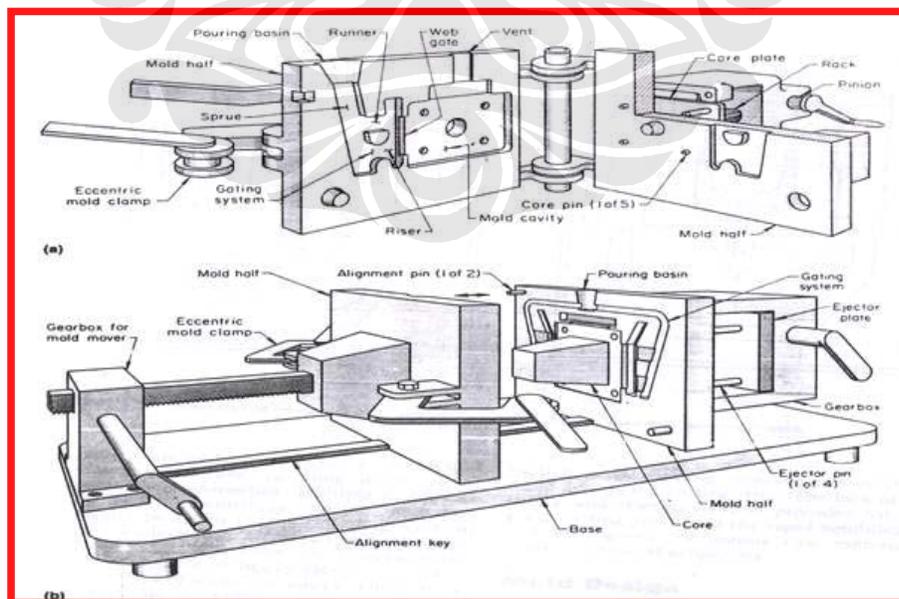
1). Cara ini tidak sesuai untuk jumlah produksi yang kecil disebabkan tingginya biaya cetakan logam.

2). Sukar untuk membuat coran yang berbentuk rumit.

3). Pembetulan cetakan logam sukar dan mahal, oleh karena itu perubahan rencana pengecoran adalah sukar.

2.4.1 Cetakan

- Dibuat dari logam dengan titik lebur di atas logam yang hendak dicor.
- Besi tuang jenis close-grained haematite adalah yang paling sering digunakan.
- Cetakan perunggu → untuk timah hitam, timah, dan seng, dan besi tempa digunakan untuk perunggu.
- Cetakan ini terdiri atas dua bagian atau lebih untuk pengeluaran hasil cor.



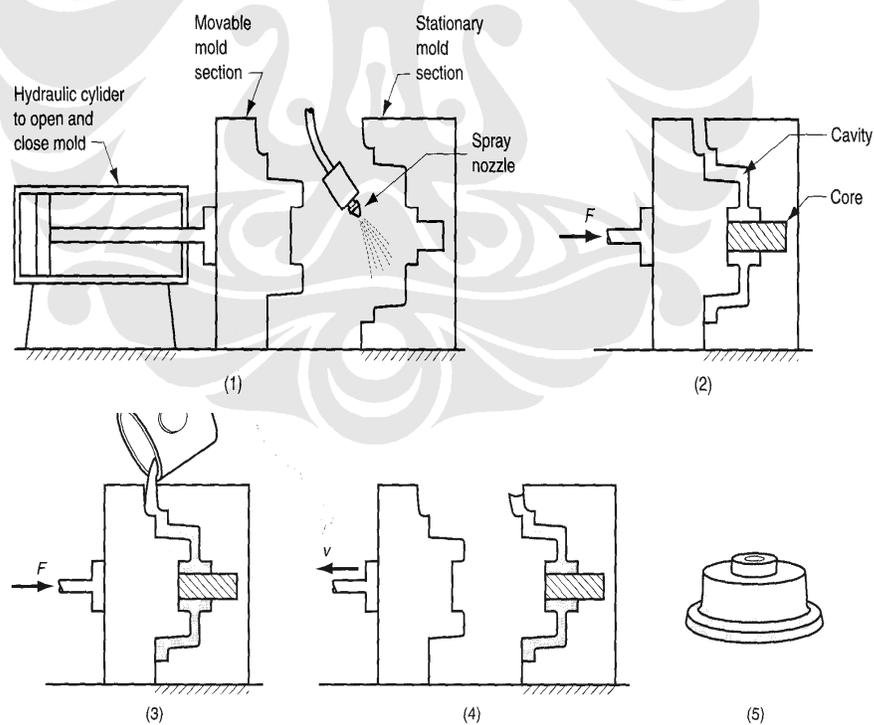
Gambar 2.5. Contoh desain cetakan[13]

dibawah ini adalah hal-hal yang dapat mempengaruhi Desain Cetakan :

1. Undercuts
2. Isolated heavy section
3. Casting Ejection
4. Number Casting per Mold
5. Progressive Solidification
6. Vents

Berikut ini adalah tahapan pengecoran logam menggunakan gravity casting, seperti terlihat pula pada gambar 2.6:

1. Preheat mold and spray-coating
2. Insert core and close mold
3. Pour molten metal
4. Finished part, mold eject
5. Finish part



Gambar 2.6. Tahapan Pengecoran[13]

Dalam cara pengecoran tersebut diatas, logam yang dituangkan didinginkan secara cepat oleh cetakan logam. Oleh karena itu beberapa persoalan teknik timbul yaitu tentang bagaimana mengatur proses pembekuan. Dapat dikatakan bahwa coran yang mempunyai kualitas dan ketelitian yang tinggi, bisa dibuat dengan jalan pengaturan komponen dan temperatur logam cair, bahan, ketebalan dinding, bahan pelapis dan temperatur dari cetakan. Selain itu dapat ditentukan siklus operasi dan efisiensi hasil yang tinggi[13].

Berbagai macam sifat dari cetakan logam diperlukan Yaitu:

- a. Ketahanan terhadap aus yang baik
- b. *Machineability* yang baik
- c. Pemuaian termis rendah
- d. Ketahanan *fatigue* pada temperatur tinggi yang baik

Coating juga diperlukan pada permukaan cetakan agar memudahkan proses pembebasan cetakan dan mengurangi keausan cetakan serta menurunkan kecepatan pendinginan logam cair sehingga terhindar dari casting defects[13].

Bahan anorganik yang bersifat tahan api, seperti tanah lempung atau grafit dipergunakan untuk melapisi cetakan, tetapi jika dipakai untuk paduan yang mempunyai titik cair tinggi seperti besi cor, maka lapisan permukaan dan lapisan penyelesain yang melindungi cetakan logam dan yang berfungsi memudahkan pembukaan haruslah dibuat secara hati-hati sekali. Paduan alumunium yang mempunyai titik cair rendah adalah bahan coran yang paling banyak dipakai untuk membuat coran seperti piston, sudu-sudu, rumah-rumah mesin dan sebagainya[13].

2.5 PROSES HEAT TREATMENT PADA PADUAN ALUMINIUM

Paduan aluminium baik *wrought product* maupun *cast product* dapat ditingkatkan sifat mekanisnya dengan cara heat treatment (paduan yang dapat di heat treatment), sedangkan untuk paduan yang tidak dapat di heat treatment hanya mengandalkan efek pengerjaan dingin untuk pencapaian sifat mekanis yang dibutuhkan[13].

Tujuan utama proses heat treatment pada paduan aluminium adalah[14]:

1. Melunakkan paduan untuk meningkatkan proses pengerjaan (tidak relevan untuk *casting*).
2. Untuk meningkatkan kekuatan dan menghasilkan properti mekanis yang diinginkan
3. Untuk menstabilkan properti fisik ataupun mekanis atau ketahanan korosi, dan untuk menghindari perubahan yang akan muncul karena waktu pada temperatur ruang atau temperatur yang dinaikkan.
4. Untuk memastikan kestabilan dimensi selama pemakaian
5. Untuk menghilangkan tegangan sisa yang disebabkan oleh pendinginan yang tak merata.

2.5.1 Penandaan untuk Kondisi Heat-Treatment

W dan T merupakan penandaan yang diberikan pada aluminium wrought dan cast yang dapat di heat-treatment (artinya logam-logam yang dapat dikuatkan dengan pemberian panas atau proses thermal). Penandaan W menyatakan kondisi tidak stabil dan tidak umum digunakan. Penandaan T yang diikuti angka 1 sampai 10 menyatakan proses yang diberikan pada logam *cast* dan alloy tersebut. Penandaan *temper* dan penjelasan singkat mengenai prosesnya dijelaskan sebagai berikut[5]:

- T1, didinginkan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu dan natural ageing sampai kondisi stabil. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pekerjaan dingin setelah proses pembentukan dengan kenaikan suhu seperti proses pencetakan dan proses ekstrusi dan untuk properti mekanis setelah distabilisasi dengan ageing pada suhu ruang. Penandaan ini juga diberikan untuk produk yang diratakan dan diluruskan setelah proses pendinginan dari proses pembentukan.
- T2, didinginkan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu, pekerjaan dingin, natural aging sampai kondisi stabil. Penandaan ini diberikan untuk produk yang mengalami pekerjaan dingin untuk meningkatkan kekuatan setelah pendinginan dari proses pekerjaan panas

seperti rolling atau ekstrusi dan untuk properti mekanis yang telah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang.

- T3, *Solution heat-treated, cold work, and naturally aged* sampai kondisi substansi stabil. T3 diberikan untuk produk yang mengalami pengerjaan dingin untuk meningkatkan kekuatan setelah *solution heat-treatment* dan untuk sifat mekanis yang telah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang.
- T4, *Solution heat-treated and naturally aged* sampai kondisi substansi stabil. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pekerjaan dingin setelah *solution heat-treatment* dan untuk properti mekanis yang telah distabilisasi dengan *ageing* pada suhu ruang.
- T5, didinginkan dari proses pembentukan kenaikan temperatur dan *artificially aged*. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pengerjaan dingin setelah didinginkan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu, seperti pencetakan dan ekstrusi, dan untuk sifat mekanis yang telah dikembangkan dengan *artificial ageing*.
- T6, *Solution Heat-Treated dan artificially aged*. Penandaan ini diberikan pada produk yang tidak mengalami pendinginan setelah *solution heat-treatment* dan untuk properti mekanis, atau kestabilan dimensi, atau keduanya, yang substansinya dikembangkan dengan *artificial ageing*.
- T7, *Solution Heat-Treated and overaged or stabilized*. Penandaan ini diberikan pada produk *wrought* yang telah mengalami *artificial ageing* setelah *solution heat-treatment* di luar puncak kekuatan agar dihasilkan karakter special, seperti mempertinggi ketahanan terhadap korosi retak tegang atau pengelupasan. Penandaan ini juga diberikan pada produk *cast* yang telah mengalami *artificial ageing* setelah *solution heat treatment* untuk mendapatkan stabilitas kekuatan dan dimensional.
- T8, *Solution Heat-Treated, cold work, and artificially aged*. Penandaan ini diberikan pada produk yang mengalami pengerjaan dingin, setelah *solution heat-treatment*, yang secara spesifik untuk meningkatkan

kekuatan dan untuk sifat mekanis, atau kestabilan dimensional, atau keduanya, yang substannya dikembangkan dengan *artificial ageing*.

- T9, Solution Heat-Treated, *artificial ageing*, dan pekerjaan dingin. Penandaan ini diberikan pada produk yang mengalami pekerjaan dingin setelah *artificial ageing* yang secara spesifik untuk meningkatkan kekuatan.
- T10, didinginkan dari proses pembentukan kenaikan suhu, pekerjaan dingin, dan *artificial ageing*. Penandaan ini diberikan untuk produk yang mengalami pengerjaan dingin yang secara spesifik untuk meningkatkan kekuatan setelah proses pendinginan dari proses pembentukan dengan kenaikan suhu, seperti rolling atau ekstrusi, dan untuk properti mekanis yang telah dikembangkan oleh *artificial ageing*.

2.5.2 Pengerasan Presipitasi

Pengerasan presipitasi adalah bentuk perlakuan panas yang paling umum pada paduan aluminium. Pengerasan presipitasi ini berprinsip pada pembentukan presipitat fasa kedua yang dapat mendistorsi kisi dari kristal aluminium. Distorsi kisi/*lattice distortion* (LD) inilah yang digunakan sebagai penghambat laju dislokasi. LD ini terjadi karena terjadinya SSSS (*Super Saturated Solid Solution*) akibat dari pendinginan cepat/*quenching*. Kondisi ini bersifat tidak stabil dan mendorong terbentuknya endapan. Endapan yang terbentuk diasumsikan memiliki struktur transisi metastabil yang koheren dengan kisi[5], jadi kondisi tidak stabil tersebutlah yang membuat partikel-partikel fasa kedua berusaha untuk kembali mencapai keadaan setimbangnya/*equilibrium* dimana fasa kedua tersebut tidaklah larut dalam matriks aluminium.

Beberapa jenis paduan yang dapat dilakukan proses pengerasan presipitasi adalah sebagai berikut[15]:

- Al-Cu : Pembentukan endapan CuAl_2
- Al-Cu-Mg : Mg berfungsi untuk memperbanyak endapan
- Al-Mg-Si : Pembentukan endapan Mg_2Si
- Al-Zn-Mg : Pembentukan endapan MgZn_2

Untuk mendapatkan tingkat kekerasan yang diinginkan maka harus dilakukan kombinasi pemanasan, pendinginan, waktu, jenis, fraksi volume, ukuran, dan distribusi dari partikel presipitat yang dihasilkan. Ada beberapa syarat agar pengerasan presipitasi ini dapat terjadi:

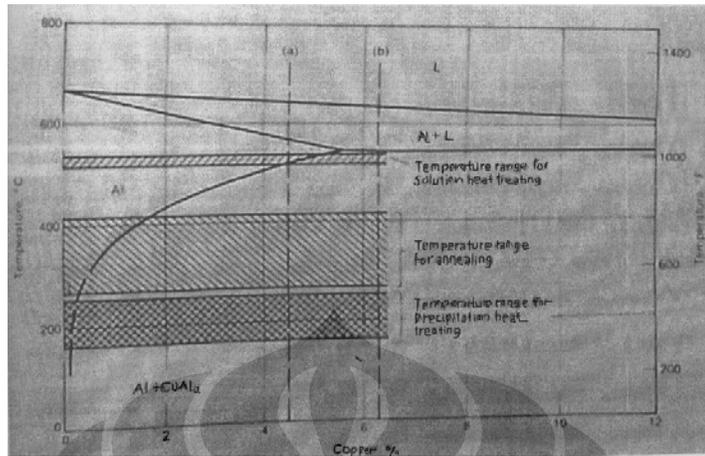
- ▶ Adanya unsur yang dapat membentuk fasa kedua baik dengan aluminium ataupun dengan silikon
- ▶ Kelarutan yang cukup besar dari unsur tersebut di dalam aluminium
- ▶ Penurunan kelarutan yang signifikan seiring penurunan temperatur

2.5.3 *Solution Treatment*

Agar dapat membuat penguatan presipitasi terjadi, maka hal pertama yang harus dilakukan adalah membuat *solid solution* terlebih dahulu dan prosesnya dinamakan *solution treatment*. Proses ini bertujuan membawa unsur pembentuk presipitat ke batas kelarutan maksimumnya di dalam aluminium sesuai dengan diagram fasa yang ada sehingga tercapai fasa tunggal. Untuk mencapai batas kelarutan tersebut diperlukan temperatur yang tinggi dan waktu yang cukup agar terjadi homogenisasi[16]. Temperatur dan waktu *solution treatment* ini pada umumnya bervariasi tergantung dari banyak hal seperti banyak dan jenisnya unsur paduan, biaya, dan waktu yang tersedia. Tetapi dilihat dari diagram fasa, temperatur *solution treatment* ini berada tepat sebelum garis *solidus* mulai dan sebelum garis *solvus* berakhir atau mudahnya berada di bawah garis eutektik seperti pada Gambar 2.7. Proses *solution treatment* ini juga memberikan kontribusi kepada struktur yang tidak larut menjadi lebih *spheroid*[16].

Hal-hal yang mungkin terjadi di dalam proses *solution treatment* ini adalah *overheating* dan juga *underheating*. *Overheating* terjadi apabila temperatur sudah melewati garis eutektik sehingga terdapat fasa *liquid*. Fasa *liquid* yang terjadi ini pada umumnya berawal dari batas butir karena memiliki tingkat energi yang tinggi akibat dari segregasi *impurities* yang menurunkan temperatur lebur. Akibat dari *overheating* ini adalah kerusakan struktur mikro akibat adanya porositas yang dapat menurunkan sifat mekanik. *Underheating* adalah temperatur *solution treatment* yang terlalu rendah sehingga tidak semua unsur penguat larut sempurna.

Hal ini menyebabkan sedikitnya kuantitas dari partikel penguat yang akan terjadi sehingga kekuatan yang didapat tidak akan sesuai dengan yang diinginkan[16].



Gambar 2.7. Potongan diagram fasa Al-Cu yang menandakan daerah *solution treatment* dan *artificial ageing*[16]

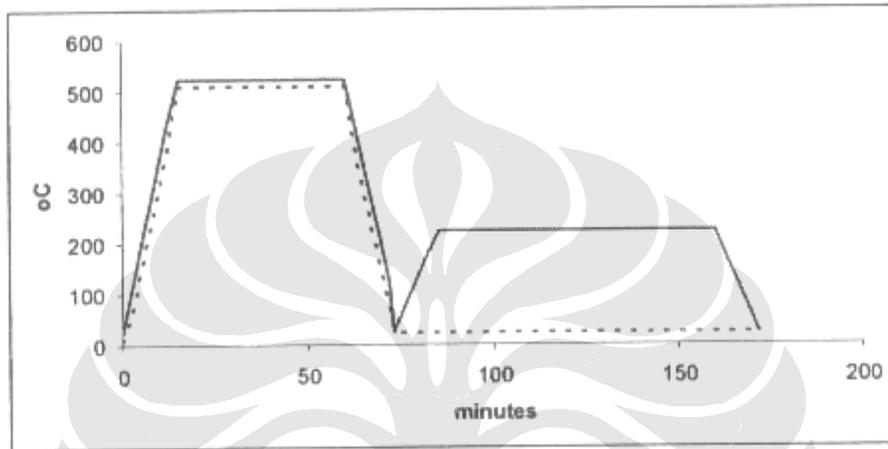
2.5.4 *Quenching*

Merupakan proses pendinginan cepat ke temperatur ruang agar *solid solution* yang terjadi pada proses *solution treatment* berubah menjadi SSSS. Proses ini bukan hanya mempertahankan atom-atom terlarut agar tetap berada dalam larutan tetapi juga memastikan bahwa ada suatu jumlah minimum dari kisi yang kosong agar dapat terjadi proses difusi pada temperatur rendah. Jika tidak ada proses *quenching*, maka atom-atom terlarut tersebut akan bermigrasi ke daerah yang tidak teratur sehingga tidak didapatkan kekuatan yang diinginkan. Parameter yang ada pada proses *quenching* ini adalah jeda waktu antara transportasi sampel menuju media *quenching* dan jenis dari media *quenching* tersebut[16]. Tetapi pada umumnya jeda waktu yang digunakan adalah secepat mungkin dan media *quenchnya* adalah air yang memiliki suhu temperatur ruang.

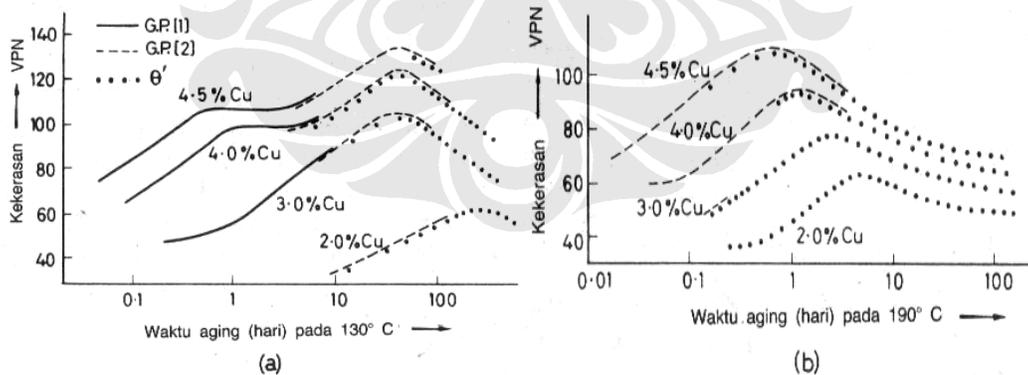
2.5.5 *Ageing*

Ada beberapa proses *ageing* pada paduan aluminium. Tetapi yang umum digunakan adalah *natural ageing* (T4) dan *artificial ageing* (T6), contoh siklus dari proses *ageing* ini dapat dilihat dari Gambar 2.8. Tujuan utama dari *ageing* ini adalah meningkatkan sifat mekanik. Pada T4, proses *ageing* ini dilakukan tanpa

alat apapun, jadi material aluminium dibiarkan begitu saja setelah proses *quenching* hingga puncak. Sedangkan pada T6, dilakukan peningkatan temperatur agar bisa mencapai puncak lebih cepat. Pada umumnya, semakin tinggi temperatur yang diberikan, maka puncak akan terjadi lebih cepat tetapi nilai kekerasannya tidak setinggi jika menggunakan temperatur yang lebih rendah seperti pada Gambar 2.9[17].



Gambar 2.8 Contoh siklus *ageing*, garis lurus adalah T6 dan garis putus-putus adalah T4[16]

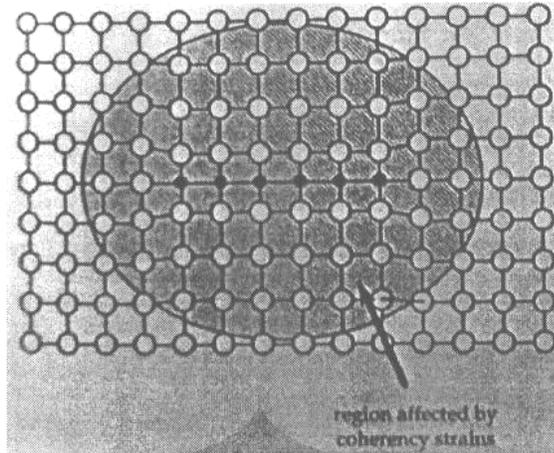


Gambar 2.9 Pengaruh temperatur penuaan dengan kekerasan, temperatur penuaan lebih rendah (a) menghasilkan kekerasan lebih tinggi dari temperatur penuaan lebih tinggi (b) [17].

2.6 MEKANISME Pengerasan Presipitasi pada Paduan Al-Cu

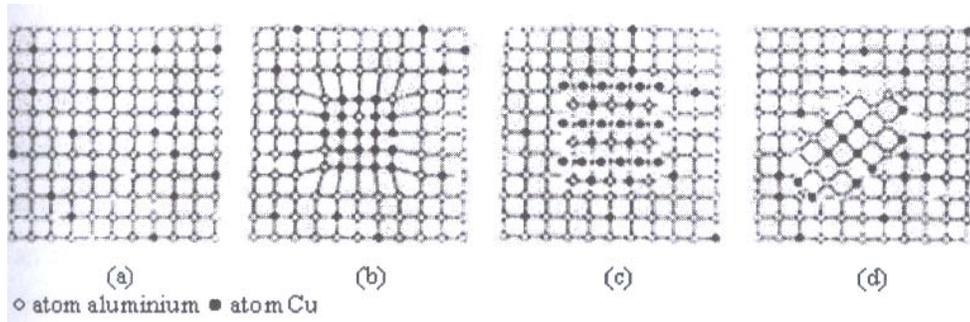
Persyaratan utama dalam pengerasan presipitasi dari SSSS adalah pembentukan dari presipitat yang terdispersi secara merata selama proses *ageing*. Proses *ageing* tersebut tidak hanya harus dilakukan di bawah kesetimbangan dari temperatur *solvus*, tetapi juga harus berada di bawah garis *solvus miscibility gap* metastabil dari *Guinier-Preston (GP) zones*. *Vacancy* yang super jenuh mengijinkan terjadinya difusi, maka dari itu pembentukan zone ini menjadi lebih cepat dibandingkan dengan kesetimbangan koefisien difusi. Selama proses presipitasi, SSSS akan membentuk area yang larut yang akan menjadi awal dari pembentukan *non-equilibrium precipitates*[16].

Mekanisme penguatan dari presipitat melibatkan pembentukan *cluster* yang koheren dari atom-atom terlarut tetapi masih memiliki struktur kristal yang sama dengan matriks. Mekanisme ini menyebabkan terjadinya regangan karena perbedaan dari ukuran atom pelarut dengan atom terlarut. Area regangan dari matriks yang mengelilingi presipitat koheren inilah yang menghambat laju dari dislokasi sehingga kekuatan dan kekerasan material bertambah. Karakteristik yang menentukan derajat kekoherenan suatu presipitat adalah kemiripan antara jarak atom pada matriks dengan presipitat. Perubahan sifat ini terjadi sebagai akibat dari pembentukan daerah mikrostruktur yang kaya akan atom terlarut atau *GP zones*[16] seperti yang diperlihatkan Gambar 2.10.

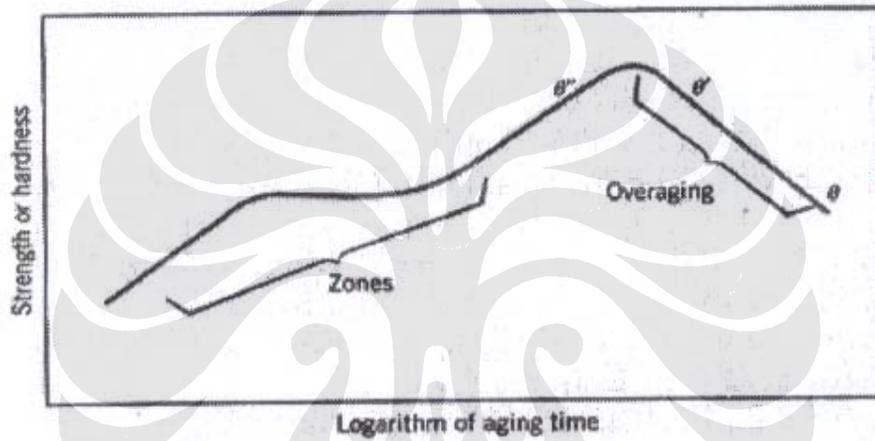


Gambar 2.10. Ilustrasi dari GP Zone[17]

Ukuran, bentuk, dan distribusi dari *GP zones* ini tergantung dari unsur paduannya, perlakuan panas dan mekanik sebelumnya. *GP zones* memiliki diameter ukuran hanya ratusan *angstrom* dan hanya dapat dilihat dengan menggunakan TEM. Dikarenakan sifatnya yang metastabil, maka proses *heat treatment* yang dilakukan haruslah optimum. Zona proses penguatan presipitasi ini meliputi berbagai perubahan fasa, ukuran, bentuk, dan struktur. Transisi fasa yang terjadi merupakan akibat dari semakin tingginya difusi yang terjadi sehingga terjadi pembesaran ukuran zona yang memiliki struktur kristal sendiri. Perubahan fasa GP menuju θ'' membuat struktur kristal berubah menjadi tetragonal dan memiliki ukuran *cluster* lebih besar. Perubahan ini tidak mengubah derajat koherensi dari susunan atom sehingga kekerasan akan terus meningkat. Seiring dalam proses difusi menuju keadaan setimbang, terbentuklah fasa θ' yang berasal dari θ'' . Fasa ini termasuk fasa semi koheren karena susunan dari atomnya sudah mulai berubah seperti pada Gambar 2.11. Fasa θ' masih belum stabil sehingga akan berubah kembali menjadi fasa θ yang stabil. Fasa θ ini adalah CuAl_2 yang memiliki struktur kristal BCT (*Body Centered Tetragonal*). Fasa ini sudah kehilangan koherensinya sehingga atom-atom terlarut kembali tersusun acak. Hilangnya koherensi berarti hilangnya distorsi kisi yang membuat *strain* pada kisi menghilang, akibatnya dislokasi kini dapat melaju dengan bebas kembali. Ilustrasi perubahan zona dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.11. Derajat koherensi pada presipitat Al-Cu. (a) acak, (b) koheren, (c) semi koheren, (d) inkoheren [18]



Gambar 2.12. Perubahan zona yang terjadi selama proses *ageing*[19]