

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium

Aluminium merupakan logam yang termasuk ke dalam golongan *non ferro* yang memiliki warna putih dan cukup lunak. Aluminium memiliki unsur kimia golongan III A dalam sistem periodik unsur, dengan nomor atom 13 dan berat atom 26,98 gram per mol (sma). Struktur kristal aluminium adalah struktur kristal FCC, sehingga aluminium tetap ulet meskipun pada temperatur yang sangat rendah. Keuletan yang tinggi dari aluminium menyebabkan logam tersebut mudah dibentuk atau mempunyai sifat mampu bentuk yang baik. Aluminium adalah unsur paling melimpah ketiga di kerak bumi yang mana di alam ditemukan tidak dalam bentuk unsur melainkan tergabung dalam senyawa kimia [6].

Aluminium pertama kali ditemukan oleh Sir Humvrey Davey pada tahun 1825 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H. C. Oersted. tahun 1825. Secara industri tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C. M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah mengekstraksi logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa dari garamnya yang terfusi. Sampai sekarang proses Hall Heroult masih dipakai untuk memproduksi aluminium. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya selama 50 tahun terakhir berada pada urutan yang kedua setelah besi dan baja dan menempati urutan pertama di antara logam *non ferro*. Produksi aluminium tahunan di dunia mencapai 15 juta ton per tahun pada tahun 1981 [1].

Aluminium merupakan logam ringan mempunyai ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat baik lainnya sebagai sifat logam. Unsur pepadu yang ditambahkan pada paduan aluminium untuk meningkatkan kekuatan diantaranya tembaga, magnesium, silikon, mangan, seng, dan nikel. Unsur tersebut dapat ditambahkan secara satu persatu atau bersama-sama, yang memberikan juga sifat-sifat yang baik lainnya seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian yang rendah dan sebagainya [2]. Material ini sangat banyak dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, komponen otomotif, kapal laut, konstruksi, peralatan rumah tangga dan sebagainya. Aluminium memiliki sifat mekanik dan sifat fisik yang cukup bagus jika dibandingkan logam-logam *non ferro* lainnya. Sifat fisik dan sifat mekanik aluminium dipengaruhi oleh berbagai faktor yaitu seperti komposisi bahan dan perlakuan yang dilakukan pada aluminium tersebut. Karakteristik dari sifat fisik dan sifat mekanik aluminium dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Sifat-Sifat Fisik Aluminium [2]

Sifat Aluminium	Keterangan
Wujud	Padat
Massa Jenis	2,70 gram /cm ³
Titik Lebur	660,32 °C
Titik Didih	2792 K, 2519 °C, 4566 °F
Konduktivitas Panas (20 °C - 400 °C)	238 W/m.K
Tahanan Listrik	$2,69 \cdot 10^{-8} \text{ K}\Omega \text{ m}$
Modulus Young	70 Gpa
Modulus Geser	26 Gpa
Kekerasan Skala <i>Vickers</i>	167 Mpa
Kekerasan Skala <i>Brinell</i>	245 Mpa

Tabel 2.2 Aluminium dan Paduannya JIS H4000 ~ H4180 [7]

Jenis	Sifat Mekanis				Aplikasi
	Perlakuan	Kuat Tarik (MPa)	Kuat Luluh (MPa)	Elongasi (%)	
1050	O	75	30	39	Tangki, wadah, bahan arsitektur
	H18	160	145	7	
1100	O	90	35	35	Tangki, bahan arsitektur, pendingin
	H18	165	150	5	
2024	O	185	75	20	Pesawat terbang, sepeda motor.
	T4	470	325	20	
3003	O	110	40	30	Peralatan sehari-hari, bahan arsitektur, wadah
	H18	200	185	4	
5052	O	195	90	27	Kapal laut, gerbong kereta, bahan arsitektur
	H38	290	255	7	
6063	O	90	50	32	Bingkai jendela, bahan arsitektur
	T6	240	215	12	
7075	O	230	105	17	Pesawat terbang, peralatan olahraga
	T6	570	505	11	
7N01	T6	430	355	15	Gerbong kereta, material konstruksi las

2.2 Paduan Aluminium

Memadukan aluminium dengan unsur lainnya merupakan salah satu cara untuk memperbaiki sifat mekanik maupun sifat fisik dari aluminium. Paduan logam merupakan kombinasi dua atau lebih jenis logam, kombinasi ini dapat merupakan campuran dari dua struktur kristalin. Paduan juga dikenal sebagai larutan padat dalam logam. Larutan padat dapat tercipta apabila pelarut dan atom yang larut memiliki ukuran yang sama dan struktur elektron yang serupa. Larutan dalam larutan logam utama memiliki suatu batas yang disebut kelarutan maksimum. Paduan yang masih dalam batas kelarutan disebut dengan paduan logam fasa tunggal. Sedangkan paduan yang melebihi batas kelarutan disebut dengan fasa ganda. Peningkatan kekuatan dan kekerasan logam paduan disebabkan oleh adanya

atom-atom yang larut yang menghambat pergerakan dislokasi dalam kristal saat terjadi deformasi plastik [2]. Secara garis besar paduan aluminium dibedakan menjadi dua jenis yaitu paduan aluminium tempa dan aluminium cor [5]. Untuk lebih jelasnya pengelompokan paduan aluminium ditunjukkan pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Klasifikasi Paduan Aluminium [5]

Unsur Paduan Utama	Seri Paduan Aluminium Tempa	Seri Paduan Aluminium Cor
Al \geq 99	1xxx	1xx.x
Cu	2xxx	2xx.x
Mn	3xxx	Tidak digunakan
Si + Cu + Mg	Tidak digunakan	3xx.x
Si	4xxx	4xx.x
Mg	5xxx	5xx.x
Mg + Si	6xxx	Tidak digunakan
Zn	7xxx	7xx.x
Sn	Tidak digunakan	8xx.x
<i>Other</i>	8xxx	Tidak digunakan

Menurut *Aluminium Association* (AA) sistem di Amerika, penamaan paduan aluminium tempa dan aluminium cor yaitu untuk Paduan cor (*casting alloys*) menggunakan sistem penamaan empat angka. Angka pertama menunjukkan kandungan utama paduannya. Dua angka selanjutnya menunjukkan penandaan dari paduannya. Angka terakhir yang di pisahkan dengan tanda desimal merupakan bentuk dari hasil pengecoran, misalnya *casting* (0) atau ingot (1,2). Untuk paduan tempa (*wrought alloys*) menggunakan sistem penamaan empat angka juga tetapi

penamaannya berbeda dengan penamaan pada paduan jenis cor. Angka pertama menyatakan kelompok paduan atau kandungan elemen [5].

Dari dua kelompok paduan aluminium tempa dan aluminium cor dikelompokkan lagi menjadi dua kelompok yaitu : tidak dapat diperlakukan dan dapat diperlakukan. Untuk paduan aluminium jenis cor yang dapat diperlakukan meliputi seri 2xx.x, 3xx.x, 7xx.x, dan 8xxx, yang tidak dapat diperlakukan meliputi seri 1xx.x, 4xx.x, dan 5xx.x. Sedangkan aluminium jenis tempa yang tidak dapat diperlakukan meliputi seri 1xxx, 3xxx, 4xxx, dan 5xxx, yang dapat diperlakukan adalah seri 2xxx, 6xxx, 7xxx, dan 8xxx [5]. Sifat aluminium tempa dari seri 1xxx sampai seri bxxx memiliki sifat yang berbeda-beda berikut sifat-sifat dari seri tersebut :

a. Paduan Al Murni (seri 1xxx)

Jenis paduan ini mempunyai kandungan minimal aluminium 99,0% dengan besi dan silikon menjadi kotoran utama (elemen paduan). Aluminium dalam seri ini memiliki kekuatan yang rendah tapi memiliki sifat tahan korosi, konduksi panas dan konduksi listrik yang baik juga memiliki sifat mampu las dan sifat mampu bentuk yang bagus. Aluminium seri ini banyak digunakan pada industri listrik dan industri kimia [5].

b. Paduan Al-Cu (seri 2xxx)

Elemen paduan utama pada seri ini adalah tembaga, tetapi magnesium dan sejumlah kecil elemen lain juga ditambahkan ke sebagian besar paduan jenis ini. Jenis paduan Al-Cu adalah jenis yang dapat diperlakukan. Dengan melalui pengerasan presipitat atau penyepuhan, sifat mekanik paduan

ini dapat menyamai sifat dari baja lunak, tetapi daya tahan korosinya rendah bila dibandingkan dengan jenis paduan yang lainnya. Sifat mampu lasnya juga kurang baik, karena itu paduan jenis ini dalam seri 2xxx sangat cocok untuk suku cadang dan struktur yang membutuhkan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan biasanya digunakan untuk membuat roda truk, suku cadang suspensi truk, badan pesawat dan kulit sayap, suku cadang struktural, dan suku cadang yang membutuhkan kekuatan yang baik pada suhu hingga 150 °C (300 °F) [5].

c. Paduan Al-Mn (seri 3xxx)

Manganese merupakan elemen paduan utama seri ini. Paduan ini adalah jenis yang tidak dapat diperlakukanaskan, sehingga kenaikan kekuatannya hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin pada proses pembuatannya. Bila dibandingkan dengan jenis aluminium murni, paduan ini mempunyai sifat yang sama dalam hal ketahanan terhadap korosi, mampu potong dan sifat mampu lasnya, sedangkan dalam hal kekuatannya, jenis paduan ini jauh lebih unggul. Paduan ini banyak digunakan sebagai material yang membutuhkan tingkat kekuatan yang *moderate* namun membutuhkan kemampuan mampu bentuk yang baik [5].

d. Paduan Al-Si (seri 4xxx)

Paduan Al-Si termasuk jenis yang tidak dapat diperlakukanaskan. Jenis ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik dan dalam proses pembekuannya hampir tidak terjadi retak. Karena sifat-sifatnya, maka paduan jenis Al-Si banyak digunakan sebagai bahan atau logam las dalam

pengelasan paduan aluminium baik paduan cor atau tempa serta bagus digunakan sebagai material piston [5].

e. Paduan Al-Mg (seri 5xxx)

Paduan ini adalah jenis yang tidak dapat diperlakukan. Magnesium merupakan paduan utama dengan komposisi sekitar 5%. Jenis ini mempunyai sifat yang baik dalam daya tahan korosi, terutama korosi oleh air laut dan sifat mampu lasnya. Paduan ini kurang cocok digunakan di suhu tinggi karena dapat mengakibatkan *stress corrosion cracking*. Paduan ini digunakan untuk komponen bus, truk, *sheet metal work* dan untuk aplikasi kelautan [5].

f. Paduan Al-Mg-Si (seri 6xxx)

Elemen paduan seri 6xxx adalah magnesium dan silikon. Paduan ini termasuk dalam jenis yang dapat diperlakukan. Paduan ini memiliki kekuatan yang lebih rendah dari seri 2xxx dan seri 7xxx namun mempunyai sifat mampu bentuk yang baik dan daya tahan korosi yang cukup. Sifat yang kurang baik dari paduan ini adalah terjadinya pelunakan pada daerah las sebagai akibat dari panas pengelasan. Paduan jenis ini banyak digunakan untuk tujuan struktur rangka, dan arsitektur [5].

g. Paduan Al-Zn (seri 7xxx)

Paduan dicampur dengan seng dari 1% hingga 7%. Paduan ini termasuk jenis yang dapat diperlakukan. Paduan ini memiliki kekuatan yang sangat tinggi sehingga paduan ini dinamakan juga ultra duralumin yang sering digunakan untuk struktur rangka pesawat. Berlawanan dengan kekuatan

tariknya, sifat mampu las dan daya tahannya terhadap korosi kurang baik. Biasanya paduan ini dicampur dengan skandium dan digunakan pada struktur badan pesawat, badan kendaraan, dan komponen-komponen yang memerlukan kekuatan yang tinggi [5].

2.3 Mekanisme Penguatan Logam

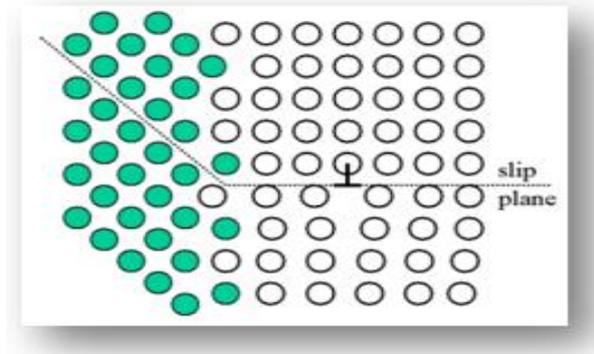
Mekanisme penguatan pada material logam terjadi akibat pergerakan dislokasi dan sifat mekanik dari logam. Kemampuan suatu material logam untuk di ubah secara plastis tergantung pada kemampuan dislokasi untuk dapat bergerak. Dengan mengurangi pergerakan dislokasi, kekuatan mekanik dapat ditingkatkan, hal ini disebabkan oleh energi mekanik yang dibutuhkan untuk membuat deformasi plastis akan semakin besar. Sebaliknya apabila pergerakan dislokasi tidak ada yang menahan, logam akan lebih mudah untuk terdeformasi. Secara umum mekanisme penguatan yang digunakan pada material logam adalah terdapat 4 cara yaitu melalui pengerasan regang, penguatan larutan padat, penguatan presipitasi, dan penghalusan batas butir.

2.3.1 Penghalusan Butir (*Grain size reduction*)

Penghalusan butir adalah salah satu cara yang efektif untuk penguatan logam. Penghalusan butir memiliki mekanisme dengan cara menghalangi pergerakan dislokasi di sekitar batas butir. Dengan mengecilnya ukuran dari butir akan meningkatkan batas butir per unit volume dan mengurangi pergerakan dislokasi yang berkelanjutan. Pergerakan dislokasi membutuhkan tegangan yang lebih tinggi untuk menghasilkan suatu dislokasi baru pada

butir berikutnya jika material memiliki butir yang lebih banyak [8].

Pergerakan slip dislokasi dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Dislokasi butir [8]

Untuk hubungan pengaruh ukuran butir terhadap *yield strength* dapat mengacu pada persamaan *Hall-Petch*.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

Keterangan :

σ_0 = tegangan geser yang berlawanan arah dengan pergerakan dislokasi pada butir.

d = diameter butir

k = suatu konstanta yang merepresentasikan tingkat kesulitan untuk menghasilkan suatu dislokasi baru pada butir berikutnya

Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin kecil ukuran butir pada material maka nilai kuat luluhnya akan semakin besar.

Walaupun demikian, pengaruh ukuran butir terhadap sifat mekanis memiliki batasan dimana butir yang terlalu halus (<10nm) akan menurunkan sifat

mekanis akibat *grain boundary sliding*. Diameter ukuran butir d dapat di kontrol melalui

- a) Laju pembekuan (*solidification*),
- b) Deformasi plastis,
- c) Perlakuan panas (*heat treatment*) yang sesuai.

Struktur butir dengan kehalusan tinggi pada material baja dapat diperoleh dengan kombinasi dari proses pengerjaan panas dan pendinginan terkendali serta pengaruh penambahan paduan. Dalam hal ini ukuran butir dikendalikan melalui pengaturan temperatur dan besar deformasi dalam suatu konsep perlakuan termomekanik atau TMCP [8].

2.3.2 Pengerasan Presipitasi (*Precipitation Hardening*)

Pengerasan presipitasi (*precipitation hardening*) merupakan proses pengerasan paduan logam yang menyebabkan penyebaran partikel-partikel halus secara merata. Adapun syarat dari proses pengerasan presipitasi yaitu logam yang digunakan adalah logam paduan, daerah fase tunggal dan daerah dua fase, serta batas kelarutan padat harus berkurang seiring dengan turunnya temperatur. Proses pengerasan presipitasi biasanya digunakan untuk paduan aluminium dan logam *non ferro* lainnya untuk penggunaan komersial. Melalui proses ini sifat mekanik paduan Aluminium dapat ditingkatkan dengan pembentukan partikel-partikel kecil yang tersebar secara seragam. Sifat mekanik yang diinginkan dapat dicapai dengan perlakuan panas yang sesuai. Proses *precipitation hardening* harus melalui beberapa tahapan mulai dari *solution heat treatment*, *quenching*, dan *precipitation heat treatment* [9].

A. *Solution Heat Treatment*

Pengerasan presipitasi dilakukan dengan dua proses perlakuan panas yang berbeda. Proses pertama adalah perlakuan panas larutan yang melarutkan semua atom terlarut untuk membentuk larutan padat fase tunggal. Pada langkah ini paduan logam dipanaskan hingga temperatur tertentu T_0 atau sampai membentuk fase tunggal (fase α) dan ditahan selama periode tertentu hingga dapat untuk melarutkan fase beta. Proses perlakuan panas ini bertujuan untuk menghomogenkan struktur paduan logam [9].

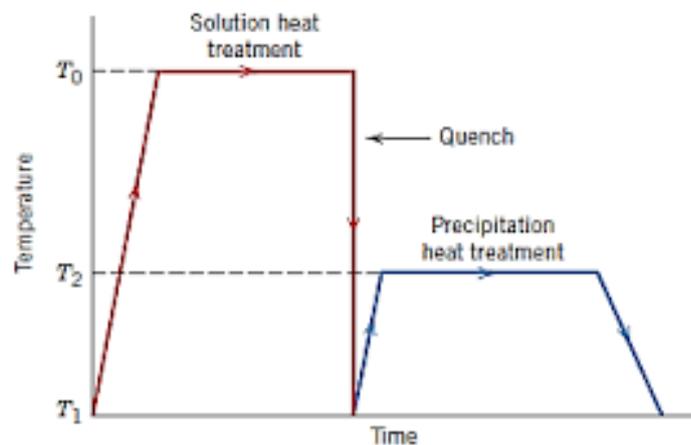
B. *Quenching*

Proses *quenching* atau pendinginan secara cepat dilakukan pada paduan logam yang telah dihomogenkan strukturnya, sehingga atom-atom di dalamnya tidak mengalami difusi. Pendinginan pada temperatur kamar ini akan membentuk struktur yang disebut larutan padat lemah jenuh [9].

C. *Precipitation Heat Treatment*

Precipitation heat treatment adalah proses pemanasan kembali paduan sampai temperatur menengah T_2 setelah proses *quenching*. Pada perlakuan panas kedua ini atom-atom mulai terdifusi secara halus dan merata membentuk endapan fase kedua. Proses ini disebut juga penuaan (*aging*), yang akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan. Peningkatan tersebut bergantung pada temperatur pengendapan T_2 dan waktu penuaan. Penuaan itu sendiri terdapat dua

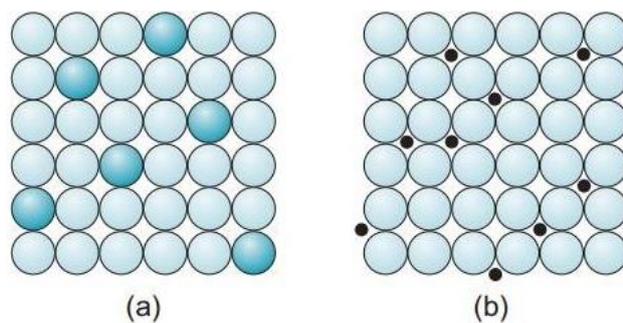
jenis yaitu *natural aging* dan *artificial aging*. *Natural aging* (penuaan alami) adalah proses penguatan paduan yang tidak melalui pemanasan. Penguatan yang dihasilkan tidak terlalu besar karena dilakukan dalam temperatur kamar sehingga memerlukan waktu yang cukup lama. *Artificial aging* (penuaan buatan) adalah proses penguatan paduan melalui pemanasan. Penguatan yang dihasilkan dapat dengan optimal apabila dilakukan pada temperatur sekitar 160 °C – 190 °C dan jangka waktu tertentu. Pada proses ini, endapan tersebar secara merata dan membentuk kelompok partikel [9]. Gambar 2.2 memperlihatkan diagram proses *precipitation hardening* yang melalui beberapa tahapan dimulai dari *solution heat treatment*, *quenching* dan *precipitation heat treatment*.



Gambar 2.2 Diagram *Precipitation Hardening* [9]

2.3.3 Pengerasan larutan padat (*Solid solution Hardening*)

Pengerasan larutan padat terjadi ketika atom dari unsur paduan masuk ke dalam larutan yang mengakibatkan tegangan antar kisi di sekeliling atom induknya. Mekanisme pengerasan larutan padat terjadi ketika Atom dari unsur paduan berinteraksi dengan bidang dislokasi yang menyebabkan regangan pada struktur kristal sehingga menghambat pergerakan dislokasi dan membuat logam menjadi lebih kuat. mekanisme pengerasan larutan padat memiliki dua jenis mekanisme tergantung dari ukuran atom yang larut pada larutan padat yaitu substitusi dan interstisi. Substitusi terjadi ketika atom memiliki ukuran yang sama sedangkan interstisi terjadi ketika atom memiliki ukuran yang lebih kecil atau lebih besar [8].



Gambar 2.3 (a) Substitusi (b) Interstisi [8]

2.3.4 Pengerasan Regangan (*Strain Hardening*)

Pengerasan regangan adalah fenomena dimana logam ulet menjadi lebih keras dan lebih kuat yang disebabkan oleh deformasi plastis. Pengerasan regangan biasa disebut juga sebagai *cold working* yang dikarenakan proses yang terjadi dikerjakan pada suhu yang relatif dingin terhadap suhu leleh mutlak logam. Pada proses *cold working* sebagian besar dilakukan pada suhu

kamar. Fenomena pengerasan regangan memiliki mekanisme yang terjadi karena perubahan dislokasi pada medan yang terjadi regangan. Densitas dislokasi dalam logam meningkat dengan terjadinya deformasi plastis selama pengerjaan dingin. Hal ini menyebabkan pembentukan dan penggandaan dislokasi baru pada struktur kristal. Pengerjaan dingin juga menyebabkan bentuk butir logam yang memipih dan dislokasi menjadi berdekatan antara satu sama lain. Akibat peningkatan jumlah dan kerapatan dislokasi menyebabkan energi yang dibutuhkan untuk terjadinya deformasi plastis lebih besar yang berarti kekerasan dan kekuatan logam mengalami peningkatan. Semakin tinggi pengerjaan dingin yang dilakukan maka densitas dislokasi akan semakin tinggi sehingga kekuatan dan kekerasan logam akan semakin tinggi namun hal ini dibayar dengan pengurangan elongasi pada logam [8].

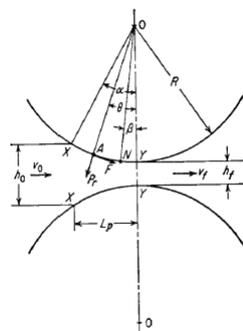
2.4 Pengerolan Logam

Pengerolan adalah metode yang dilakukan untuk mendeformasi plastis logam dengan gaya kompresi antara 2 rol yang berputar konstan. Gaya ini akan mereduksi ketebalan logam dan mempengaruhi struktur butirnya. Reduksi ketebalan ini dapat diukur dengan melihat perbedaan ketebalan sebelum dan sesudah reduksi. Selama operasi pengerolan logam, bentuk geometri benda kerja berubah tapi volumenya tetap sama [10].

Berdasarkan temperatur kerjanya, proses pengerolan logam dibagi menjadi *hot rolling* dan *cold rolling*. *Hot rolling* merupakan proses pengerolan logam

dimana benda kerja sebelum dirol dipanaskan sampai di atas temperatur rekristalisasinya. Pemanasan di atas temperatur rekristalisasinya ini akan memberikan reduksi ketebalan yang besar dan tidak terjadi fenomena *strain hardening* namun akan membuat logam menjadi lebih tangguh dan ulet. Selain itu, *hot rolling* dapat menimbulkan toleransi dimensi yang besar dan permukaan benda kerja menjadi kasar [10].

Cold rolling merupakan proses pengerolan logam pada temperatur di bawah temperatur rekristalisasinya. Proses *cold rolling* ini akan memberikan produk hasil pengerolan memiliki toleransi dimensi yang sempit dan permukaan benda kerja menjadi halus. Namun *cold rolling* ini dapat menimbulkan fenomena *strain hardening* yang mana membuat kekuatan dan kekerasan logam meningkat namun elongasinya menurun. *Cold rolling* membutuhkan gaya yang lebih tinggi dibandingkan dengan *hot rolling*. Pada proses pengerolan logam terdapat dua gaya yang bekerja, yaitu gaya radial (P_r) dan gaya tangensial (F). Arah gaya radial keluar bidang lingkaran pada rol sedangkan arah gaya tangensial tegak lurus terhadap gaya radial [10]. Gaya-gaya yang terjadi pada proses pengerolan dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Gaya-gaya selama pengerolan [10]

Keterangan :

h_o = tebal awal spesimen

h_f = tebal akhir spesimen

P_r = gaya radial

F = gaya gesek tangensial

L_p = panjang kontak spesimen dan rol

V_o = kecepatan awal spesimen

N = titik netral

v_f = kecepatan akhir spesimen

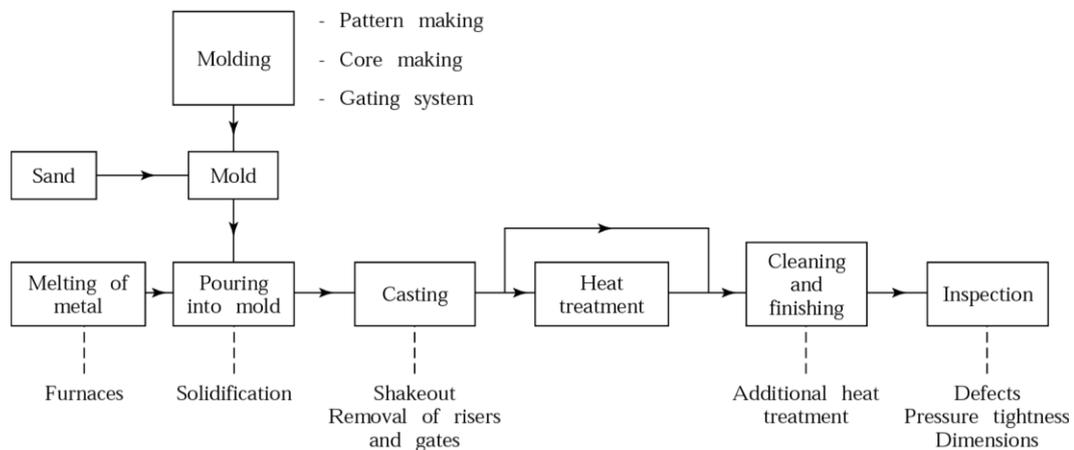
R = jari-jari rol

α = sudut kontak

Titik netral merupakan titik dimana kecepatan rol sama dengan kecepatan pelat. Antara bidang masuk dan titik netral, kecepatan benda lebih rendah daripada kecepatan rol sehingga gaya gesek tangensial searah pengerolan. Sedangkan antara titik netral dan bidang keluar, kecepatan benda lebih besar daripada kecepatan rol sehingga gaya gesek tangensial berlawanan arah pengerolan. Secara garis besar, cacat pada proses pengerolan antara lain *roll flattening* dan *roll bending*. *Roll flattening* merupakan cacat berupa rol lebih datar akibat kekerasan benda kerja lebih besar dari rol. Sedangkan *roll bending* merupakan fenomena cacat benda kerja yang menjadi bengkok karena gaya tarik di tepi benda kerja lebih besar daripada bagian tengah [10].

2.5 Pengecoran Logam

Pengecoran logam merupakan salah satu proses manufaktur untuk membuat suatu produk atau benda kerja dengan cara meleburkan logam pada suatu tungku peleburan kemudian menuangkannya ke dalam rongga cetakan dan membiarkannya hingga terjadi solidifikasi. Proses pengecoran logam merupakan proses yang praktis dan cukup mudah jika dibandingkan dengan proses manufaktur lainnya [11]. Secara garis besar, proses pengecoran logam terdiri dari beberapa tahap yang seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.5 Alur proses pengecoran logam [11]

Dari Gambar 2.5 proses pengecoran logam terdiri dari beberapa tahapan yang perlu dilakukan yaitu :

A. *Molding*

Proses *molding* adalah proses yang dilakukan sebelum proses pengecoran logam. Proses *molding* terdiri dari perencanaan seperti pembuatan pola, pembuatan inti, dan sistem saluran masuk. Perencanaan ini terdiri atas pembuatan desain dan rancangan dari pola, inti, dan sistem saluran masuk

yang mengacu pada desain benda kerja yang telah dibuat sebelumnya untuk membuat cetakan. Setelah itu dapat menentukan bahan dari cetakan tersebut (*expandable mold* atau *permanent mold*) [11].

B. *Mold*

Hasil akhir proses *molding* berupa cetakan (*mold*) yang akan dipakai untuk proses pengecoran. Cetakan dibuat dari bahan-bahan tertentu, tergantung dari jenis pengecoran dipilih. Jenis cetakan ada dua yaitu *expandable mold* dan *permanent mold*. *Expandable mold* merupakan cetakan pengecoran logam yang hanya dapat digunakan satu kali untuk proses pengecoran sehingga perlu dilakukan proses daur ulang. Berbeda dengan *expandable mold*, *permanent mold* merupakan cetakan yang dapat dipakai berulang-ulang. Cetakan untuk jenis pengecoran ini biasanya menggunakan material seperti besi cor, baja, kuningan, grafit, dan logam-logam paduan yang memiliki suhu leleh yang lebih tinggi dari bahan yang digunakan [11].

C. *Pouring*

Setelah memiliki kedua bahan utama yaitu logam cair dan cetakan, selanjutnya logam cair dituang ke dalam cetakan yang telah dibuat dengan temperatur penuangan tertentu, sesuai dengan jenis material yang digunakan. Kecepatan penuangan juga perlu diperhatikan karena dapat mempengaruhi fluiditas dari logam cair itu sendiri dan menyebabkan pendinginan prematur (*cold shuts*) [11].

D. *Casting*

Logam cair yang dituangkan kemudian dibiarkan selama beberapa saat hingga terjadi solidifikasi. Selanjutnya, dilakukan pemisahan hasil coran (*casting*) dari cetakannya [11].

E. *Heat Treatment*

Proses perlakuan panas (*heat treatment*) di sini merupakan proses opsional, yang artinya hanya dilakukan jika diperlukan. Tujuan dari proses *heat treatment* ini adalah untuk mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan, yang belum didapatkan dari proses pengecoran [11].

F. *Cleaning & Finishing*

Produk hasil coran selanjutnya dibersihkan dan dilakukan *finishing* untuk memperbaiki kualitas dan menyempurnakan produk agar sesuai dengan rancangan atau desain awal. Dapat juga dilakukan proses perlakuan panas tambahan apabila diperlukan [11].

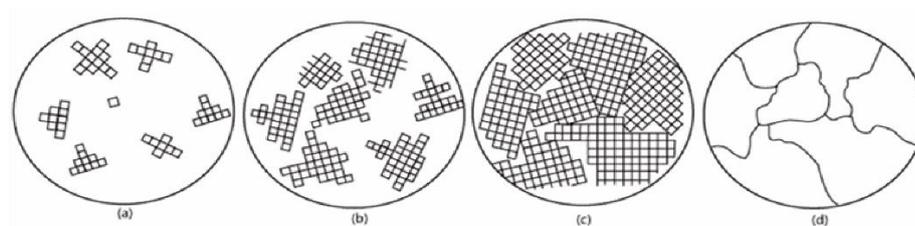
G. *Inspection*

Tahap terakhir merupakan tahap inspeksi (*inspection*) yang terdiri atas pengecekan cacat coran, pengukuran dimensi, dan sebagainya. Tujuan dari proses ini adalah untuk mengetahui kualitas dari produk hasil coran, untuk menentukan apakah produk tersebut layak untuk digunakan atau tidak [11].

2.6 Mekanisme Solidifikasi Pada Pengecoran Logam

Mekanisme pembekuan logam cair pada proses pengecoran logam diawali dengan tumbuhnya inti-inti kristal (nukleasi). Setelah inti-inti kristal tersebut

muncul lalu kristal-kristal akan tumbuh dari inti tersebut diikuti dengan inti baru yang muncul pada saat yang sama. Ketika logam cair menjadi beku sepenuhnya maka kristal-kristal yang telah tumbuh akan membentuk susunan kelompok-kelompok kristal yang dibatasi oleh batas butir. Ukuran butir kristal tergantung pada laju pengintian dan pertumbuhan inti. Apabila laju pertumbuhan lebih besar dari laju pengintian, maka akan didapatkan kelompok butir-butir kristal yang besar dan apabila laju pengintian lebih besar dari laju pertumbuhan maka akan didapatkan kelompok butir-butir kristal halus. Adapun proses-prosesnya dapat dilihat pada Gambar 2.6 menjelaskan tentang skema pembentukan logam, (a) inti mulai terbentuk, (b) butir mulai tumbuh, (c) butir mulai menumbuk satu sama lain dan (d) batas butir mulai terbentuk [12].

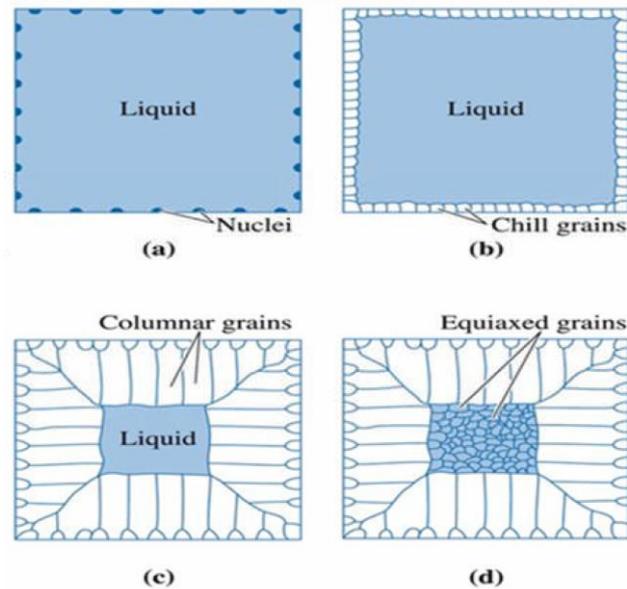


Gambar 2.6 Skema Pembentukan Logam [12]

Pada proses solidifikasi di pengecoran logam, pada umumnya proses solidifikasi dimulai dari permukaan cetakan yang dikarenakan panas dari logam cair pertama kali akan diserap oleh permukaan cetakan. Logam cair yang kontak langsung dengan cetakan akan mengalami pembekuan terlebih dahulu dibandingkan dengan logam cair yang tidak kontak langsung dengan cetakan. Hal ini menyebabkan inti-inti kristal tumbuh ke arah dalam cetakan. Kristal-kristal tumbuh dari inti asal mengarah ke bagian dalam coran dan butir-butir kristal tersebut akan

berbentuk memanjang seperti kolom yang disebut dengan struktur *columnar* [12].

Mekanisme solidifikasi secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 (a) nukleasi dimulai, (b) pembentukan *chill zone*, (c) pembentukan *columnar*, dan (d) pembentukan daerah *equiaxed* [12]

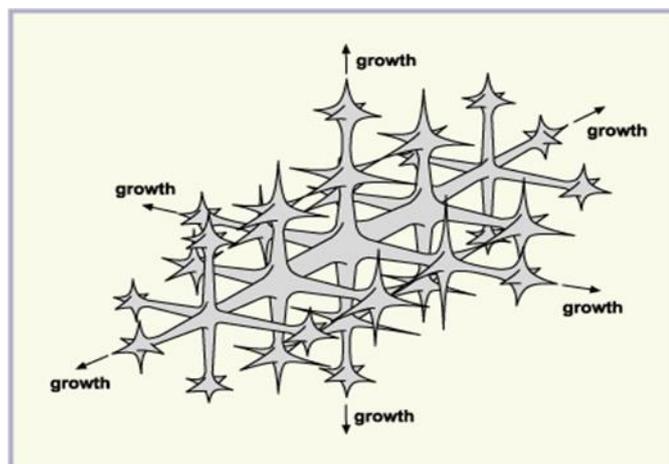
Gambar 2.7 menjelaskan tentang mekanisme solidifikasi pada proses pembekuan logam. Dari Gambar 2.7, kita dapat melihat bentuk mikrostruktur yang dihasilkan selama proses pembekuan berlangsung, antara lain : [12].

1. *Chill zone*, daerah pendinginan cepat sehingga sering dihasilkan struktur yang berbutir halus tergantung dari perbedaan temperatur antara cetakan dan logam cair.
2. *Columnar zone*, daerah perpanjangan *chill* yang dikontrol oleh kecepatan perpindahan panas akibat adanya pertumbuhan kontinyu dari daerah *chill*.

3. *Equiaxed zone*, struktur yang berorientasi acak akibat adanya perbedaan temperatur yang kecil antara *solid* dan *liquid* sehingga pendinginan lanjut konstitusional menjadi efektif bagi proses nukleasi kristal-kristal baru.

2.7 Struktur Dendrit

Struktur dendrit merupakan suatu struktur yang khas pada produk hasil pengecoran. Struktur dendrit menyerupai bentuk pohon atau ranting dengan banyak cabang yang menyebar dari pusat pertumbuhan. Struktur dendrit tidak diharapkan selama proses pengecoran logam dikarenakan dapat menurunkan sifat mekanik dari bahan coran. Struktur dendrit dapat dihilangkan dengan proses perlakuan panas berupa homogenisasi. Struktur dendrit terbentuk ketika kecepatan pendinginan di *interface* antara logam cair dengan cetakan berlangsung dengan cepat sehingga terbentuk struktur yang bercabang-cabang yang umumnya mengikuti arah kristalografi tertentu yang dapat dilihat pada Gambar 2.8 [12].

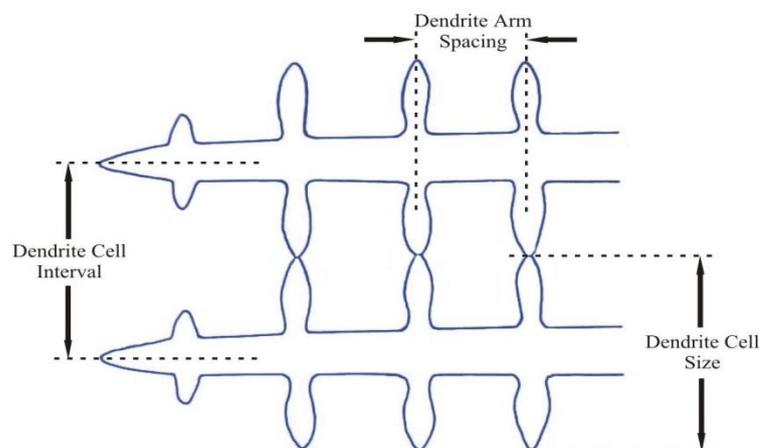


Gambar 2.8 Struktur dendrit yang sedang tumbuh [12]

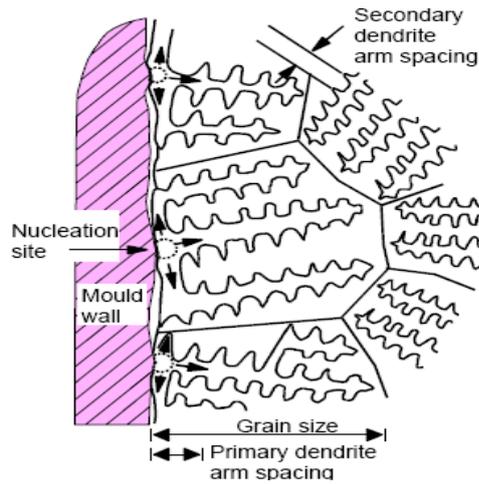
Ada beberapa hal penting yang menjadi acuan dalam menjelaskan karakteristik dendrit terdapat dalam Gambar 2.8, antara lain :

1. Jarak lengan dendrit, jarak antar lengan sekunder dendrit.
2. Jarak sel dendrit, jarak antara garis sumbu dendrit yang saling berdekatan.
3. Ukuran sel dendrit, lebar dendrit.

Jarak lengan dendrit atau *dendrite arm spacing* (DAS) ini dipengaruhi oleh kecepatan proses pembekuan pada pengecoran logam. DAS ini dihitung dari tengah cabang dendrit ke tengah cabang dendrit yang lain. Nilai DAS ini sangat berpengaruh terhadap sifat fisik dan mekanik pada suatu paduan logam. Nilai DAS yang semakin besar mengindikasikan struktur mikro yang kasar sehingga dapat disimpulkan bahwa sifat mekanik yang terbentuk tidak begitu baik. Sedangkan nilai DAS yang kecil mengindikasikan bahwa struktur mikro yang terbentuk halus sehingga sifat mekanik yang dihasilkan cukup baik. Pada Gambar 2.9 menjelaskan komponen-komponen dendrit dan Gambar 2.10 menjelaskan tentang mekanisme pembentukan DAS [12].



Gambar 2.9 Komponen-komponen dendrit [12]



Gambar 2.10 Proses pembentukan dendrit [12]

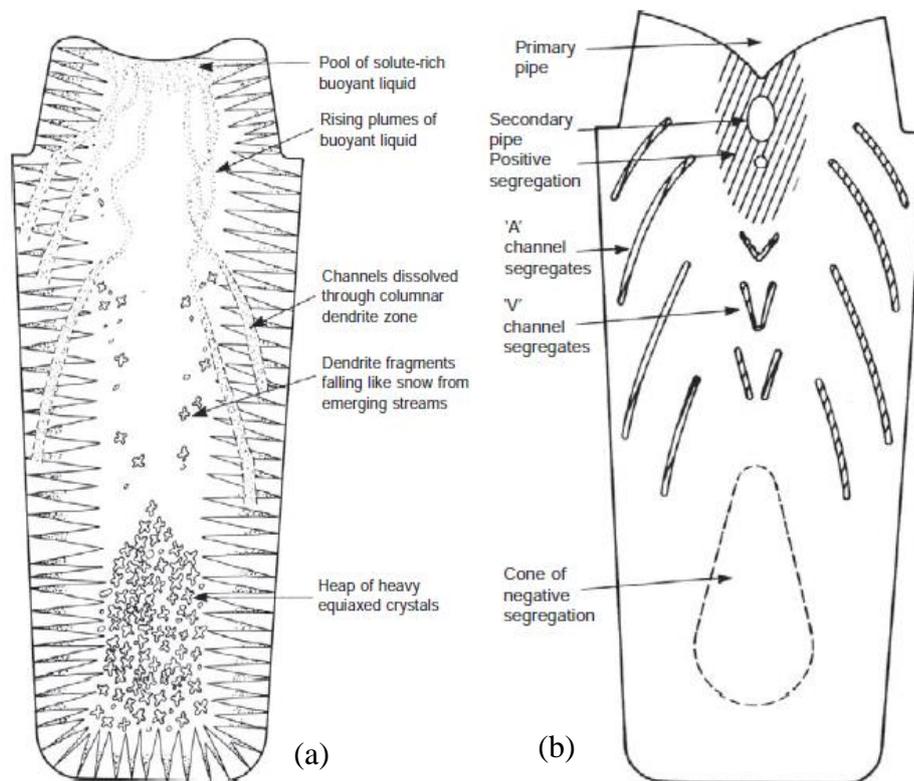
2.8 Segregasi Pada Pengecoran Logam

Segregasi pada pengecoran adalah fenomena di mana komponen atau elemen dalam logam cair tidak terdistribusi secara merata selama solidifikasi. Segregasi ini dapat menyebabkan variasi komposisi kimia dan sifat mekanik dalam material cor. Segregasi secara umum dapat dipengaruhi oleh laju pendinginan, gradien temperatur antara cetakan dan logam cair, komposisi pada paduan dan cetakan yang digunakan selama proses pengecoran. Segregasi dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu : [13].

1. Segregasi makro (*Macrosegregation*)

Segregasi yang terjadi pada skala besar dan dapat mempengaruhi seluruh bagian pengecoran. Disebabkan karena perbedaan pendinginan dan solidifikasi di berbagai bagian cetakan. Bagian yang mendingin lebih cepat cenderung memiliki komposisi berbeda dari bagian yang mendingin lebih lambat. Segregasi makro dapat menyebabkan variasi signifikan dalam sifat mekanik

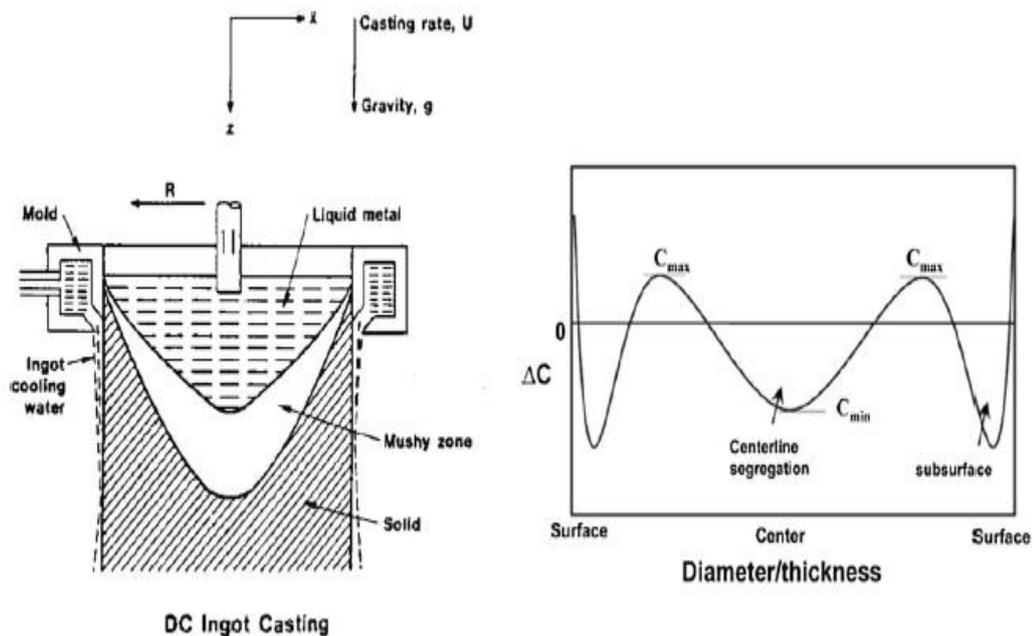
dan kimia material di berbagai bagian pengecoran, yang dapat mempengaruhi performa keseluruhan komponen [13]. Untuk contoh ilustrasi segregasi makro yang terjadi pada ingot baja dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Proses terjadinya segregasi makro pada ingot baja
(a) selama solidifikasi (b) Ingot yang sudah jadi [13]

Pada Gambar 2.11 dapat dilihat, ketika logam cair baja yang mengandung unsur paduan seperti karbon, sulfur, dan fosfor dituangkan pada bagian atas cetakan ingot dan mengisi seluruh ruang cetakan, maka akan terbentuk segregasi pada bagian atas ingot. Hal ini disebabkan unsur-unsur paduan seperti karbon, sulfur, dan fosfor memiliki densitas dan titik leleh yang lebih rendah dari baja. Akibat densitas dan titik leleh yang lebih rendah tersebut ketika logam cair mengalir akan membentuk saluran yang bercabang-cabang dan dapat

melarutkan dendrit-dendrit pada daerah *columnar zone* yang dapat dilihat pada Gambar 2.11(a). Akibat pergerakan aliran logam tersebut selama proses solidifikasi akan membentuk makrosegregasi seperti huruf A dan huruf V dan terbentuknya daerah positif makrosegregasi pada bagian atas ingot dan daerah negatif segregasi pada bagian bawah ingot yang dapat dilihat pada Gambar 2.11(b) [13]. Untuk ilustrasi makrosegregasi pada paduan aluminium DC *cast* dapat dilihat pada Gambar 2.12.



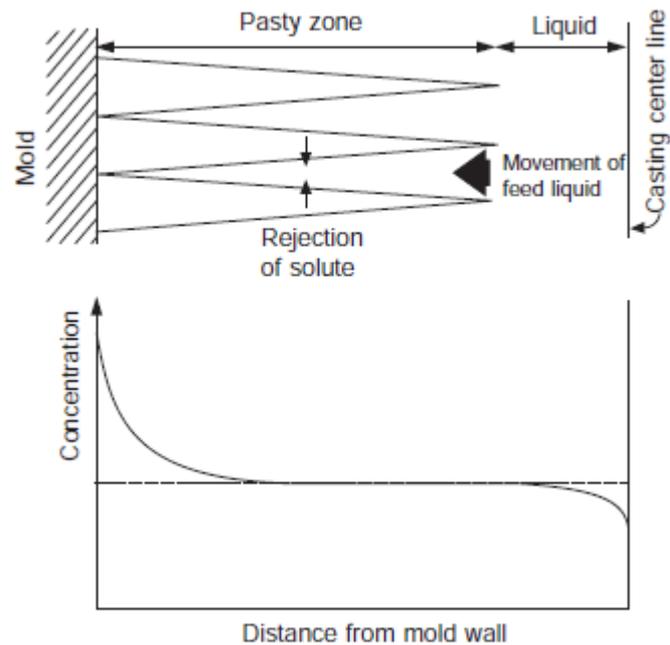
Gambar 2.12 segregasi makro pada aluminium DC (*Direct Chill*) *cast* pada bagian kiri skema proses dan bagian kanan profil segregasi [14]

Pada aluminium DC (*Direct Chill*) terdapat segregasi yang terbentuk selama proses pendorongan logam cair ke dalam cetakan. Dapat dilihat pada Gambar 2.12 di sebelah kiri merupakan skema terbentuknya segregasi, yang mana ketika logam cair diberikan tekanan atau didorong ke dalam cetakan maka terjadi

perbedaan temperatur antara logam cair yang berada di bagian atas dan logam cair yang berada di bagian bawah. Akibat perbedaan temperatur tersebut mengakibatkan terbentuknya *mushy zone* atau zona campuran cair dan padat yang berada pada bagian tengah dari logam aluminium. Pada Gambar 2.12 di sebelah kanan dapat dilihat grafik hubungan derajat segregasi (ΔC) terhadap daerah logam. Dapat dilihat pada grafik terdapat adanya segregasi makro yang berupa *centerline segregation* pada daerah *mushy zone* yang terbentuk selama proses *direct chill casting* [14].

2. Segregasi mikro (*Microsegregation*)

Segregasi mikro terjadi pada skala kecil, di dalam dendrit atau antara dendrit (interdendritik). Segregasi ini disebabkan oleh perbedaan kecepatan difusi elemen selama solidifikasi. Unsur-unsur dengan difusivitas lebih rendah cenderung terjebak di antara dendrit. Segregasi mikro dapat menyebabkan variasi komposisi kimia pada skala mikro, yang mempengaruhi kekuatan, keuletan, dan ketahanan korosi. Partikel – partikel dari unsur – unsur paduan cenderung akan terperangkap selama proses solidifikasi pada lengan – lengan dendrit [13]. atau Untuk ilustrasi mikrosegregasi secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.13.

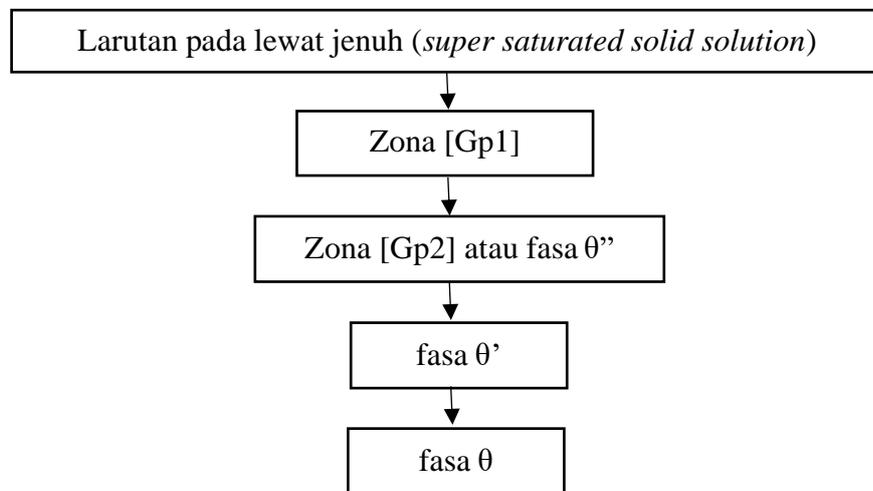


Gambar 2.13 Mikrosegregasi pada dendrit [13]

2.9 Pengaruh Waktu *Aging* Pada Sifat Mekanik Aluminium

Lamanya waktu *aging* pada aluminium dapat mempengaruhi sifat mekanik dari aluminium. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan presipitat selama proses *aging* berlangsung. Proses *aging* dibagi menjadi 2 jenis yaitu *natural aging* dan *artificial aging*. *Natural aging* adalah *aging* untuk paduan aluminium yang di *age hardening* dalam keadaan dingin. *Natural aging* berlangsung pada temperatur ruang antara 15 °C - 25 °C dan dengan waktu penahanan 5 sampai 8 hari. *Artificial aging* adalah *aging* untuk paduan aluminium yang di *age hardening* dalam keadaan panas. *Artificial aging* berlangsung pada temperatur antara 100 °C - 200 °C dan dengan lamanya waktu penahanan antara 1 sampai 24 jam. Pengambilan temperatur *artificial aging* pada temperatur antara 100 °C - 200 °C akan berpengaruh pada tingkat kekerasan sebab pada proses *artificial aging* akan terjadi perubahan-perubahan fasa atau struktur.

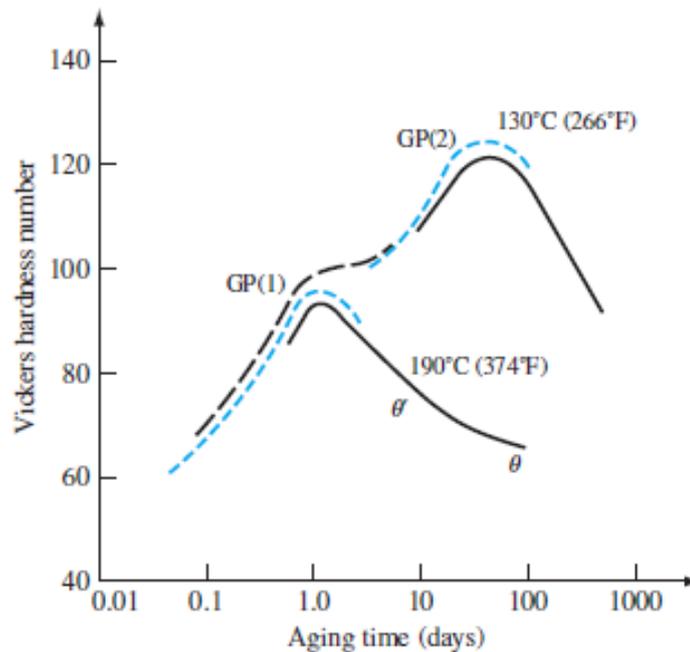
Perubahan fasa tersebut akan memberikan sumbangan terhadap pengerasan [15]. Berikut pada Gambar 2.14 merupakan diagram urutan perubahan fasa yang terjadi pada proses *artificial aging*.



Gambar 2.14 Diagram perubahan fasa di proses artificial aging [15]

Pada gambar diagram di atas dapat menjelaskan beberapa tahapan fasa yang terbentuk pada proses *artificial aging*, Pada awal-awal tahap *artificial aging* struktur atau fasanya masih berupa larutan padat lewat jenuh (*Super Saturated Solid Solution*). Seiring dengan penambahan waktu penuaan atau ketika penuaan sampai di daerah *under aged*, maka mulai terbentuk zona presipitat zona [GP 1] dan paduan aluminium menjadi agak kuat dan keras. Ketika waktu *aging* ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *peak aged*. Pada daerah *peak aged* presipitat mengumpul atau mulai paduan aluminium yang optimal. Apabila setelah mencapai *peak aged* (puncak penuaan) waktu *artificial aging* masih ditambah lagi maka akan masuk dalam daerah *over aged*. Pada daerah *over aged* ini akan didapatkan fasa θ , jika fasa θ ini terbentuk maka akan menyebabkan paduan aluminium menjadi lunak kembali dan berkurang

kekerasannya [16]. Pada kurva penuaan di Gambar 2.15 menjelaskan hubungan lamanya waktu *aging* dengan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium.



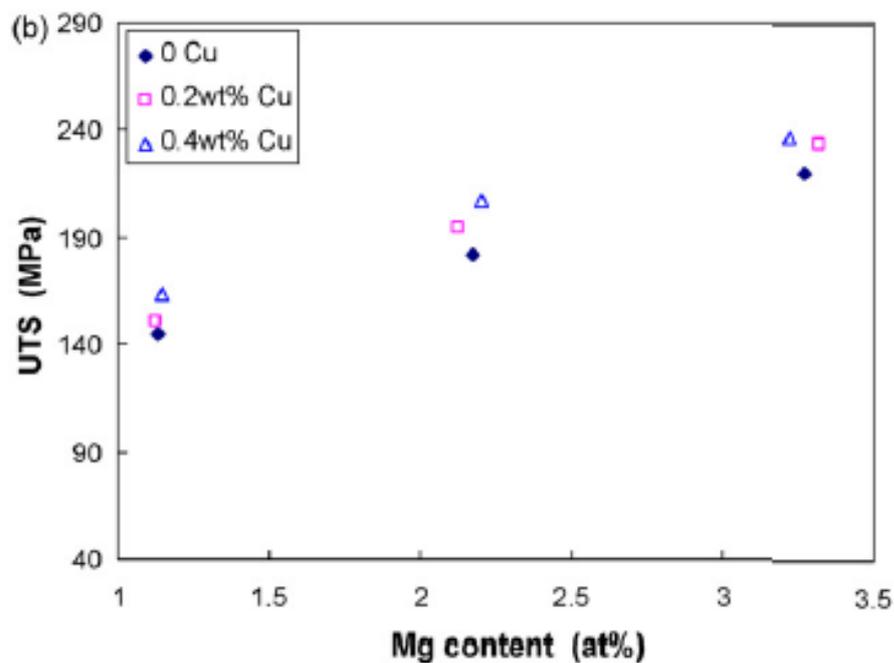
Gambar 2.15 Hubungan antara lamanya waktu *aging* dengan kekuatan dan kekerasan paduan aluminium [16]

2.10 Pengaruh Penambahan Cu Pada Paduan Al-Mg

Penambahan unsur Cu dapat mengubah ketahanan paduan Al-Mg terhadap korosi, yang mana penambahan Cu sebesar 0,33% pada paduan AA 5023 dapat sedikit meningkatkan ketahanan terhadap *pitting corrosion* dan *filiform corrosion* dalam jumlah yang dapat diterima [17]. Penambahan Cu dapat meningkatkan elongasi dan kuat tarik pada paduan AA 5083. Dengan penambahan Cu sebesar 0,6% elongasi paduan AA 5083 meningkat sebesar 3% dan kekuatannya meningkat menjadi 334 MPa yang awalnya 289 MPa [18]. Penambahan Cu sebesar 6% juga

dilaporkan dapat meningkatkan elongasi pada paduan Al-Mg yang ditambahkan unsur Zn sebesar 6% [19].

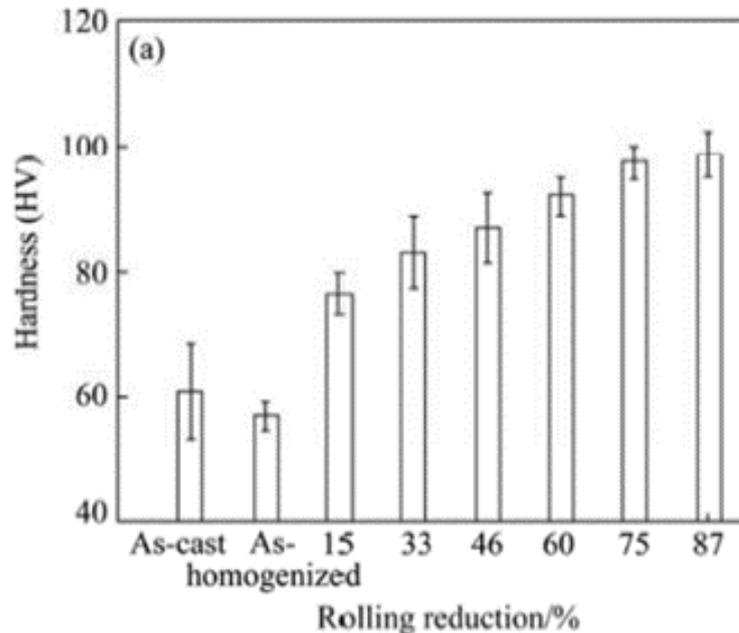
Penambahan Cu pada paduan Al-Mg dapat meningkatkan sifat kekerasan ketika dilakukan proses *aging*, yang mana dengan penambahan Cu dari 0,2 % menjadi 0,4% kekerasan paduan meningkat dari 63 HV menjadi 77,4 HV ketika di *aging* pada suhu 200°C selama 16 jam [20]. Pengaruh Penambahan unsur Cu pada paduan aluminium magnesium juga dapat meningkatkan sifat mekanik berupa kekuatan dari paduan ini. Unsur Cu dapat memperhalus butir paduan dan membentuk presipitat berupa Al_2Cu dan Al_2CuMg yang dapat memperkuat paduan [21]. Dapat dilihat pada Gambar 2.16 bahwa penambahan sejumlah kecil Cu sebesar 0,2% dan 0,4% sebagai fungsi kandungan Mg dapat meningkatkan kuat tariknya secara signifikan.



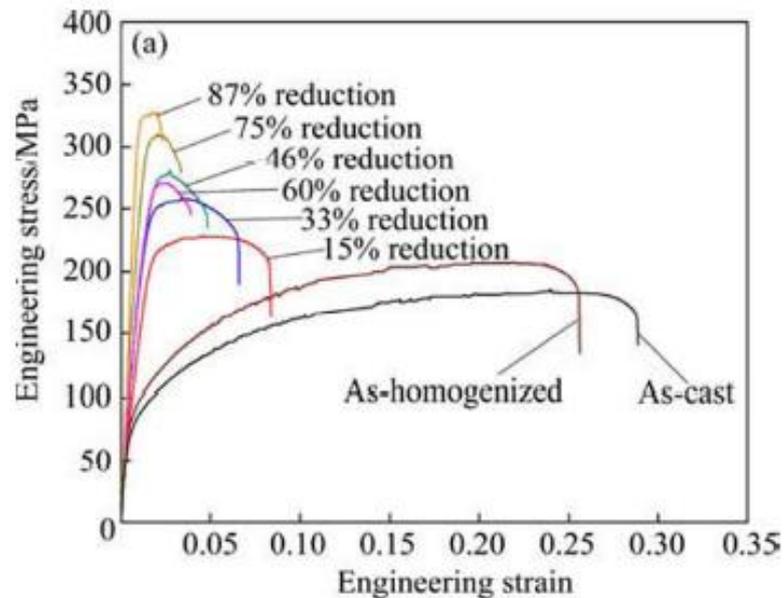
Gambar 2.16 Kekuatan tarik sebagai fungsi kandungan Mg dalam paduan Al-Mg dengan berbagai kandungan Cu [21]

2.11 Pengaruh Pengerolan Dingin Pada Paduan Al-Mg

Pada paduan aluminium magnesium dapat ditingkatkan kekuatannya dengan cara pengerjaan dingin salah satunya adalah dengan pengerolan dingin. Proses pengerolan dingin pada paduan aluminium magnesium dapat meningkatkan kekerasan kuat tarik, kuat luluh dari paduan namun dapat mengurangi elongasi atau *ductility*. Selain meningkatkan kekuatan pengerolan dingin juga dapat meningkatkan *fatigue performance* dari paduan [22]. Pada paduan aluminium magnesium seri 5052 dengan variasi persen reduksi 15%, 33%, 46%, 60%, 75%, dan 87% didapatkan kenaikan nilai kekuatan dan kekerasan yang signifikan yang dapat dilihat pada Gambar 2.17 dan 2.18 [23].

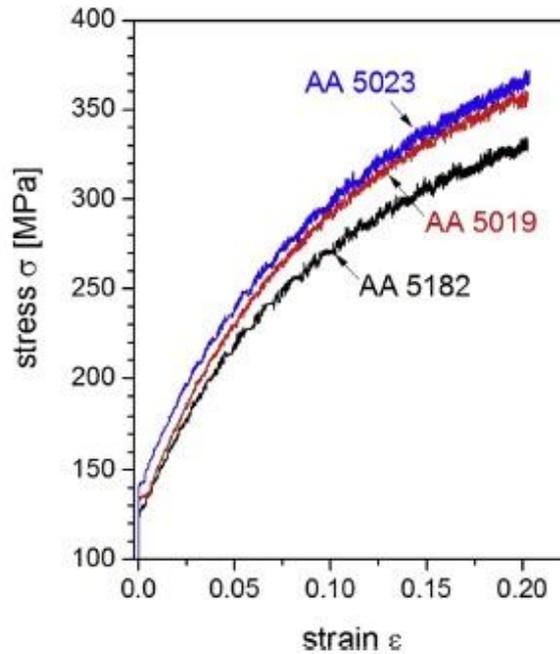


Gambar 2.17 Variasi kekerasan dari berbagai persen reduksi [23]



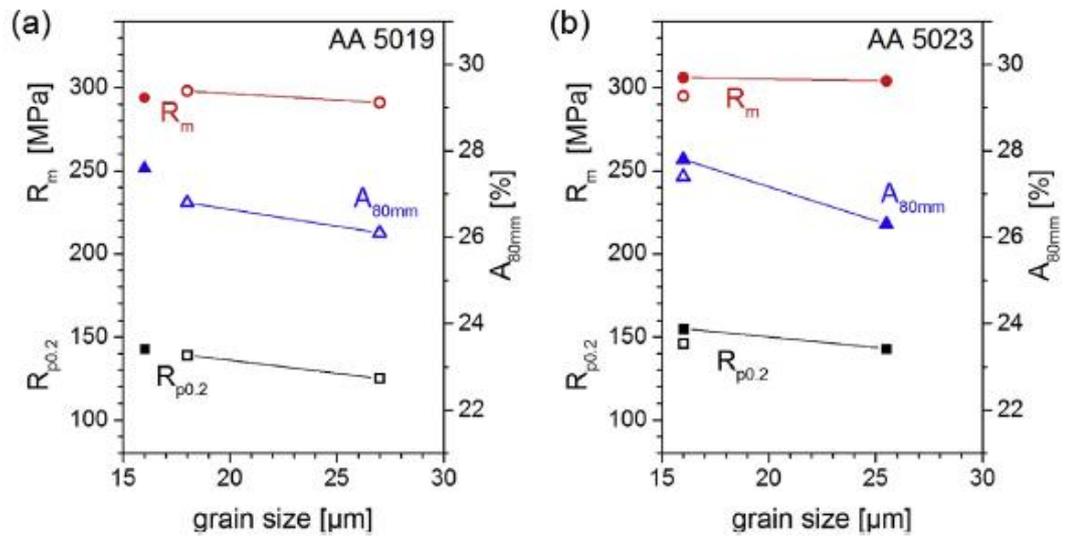
Gambar 2.18 Variasi kekuatan dari berbagai persen reduksi [23]

Kandungan Cu pada paduan aluminium magnesium dapat mempengaruhi kekuatan dari paduan. Telah diteliti perbandingan kuat tarik antara paduan aluminium magnesium atau paduan seri 5 yaitu antara AA 5182, AA 5019, AA 5023. Perbedaan kandungan Cu antara ketiga paduan tersebut yaitu pada paduan AA 5019 kandungan Cu <0,10%, paduan AA 5182 kandungan Cu <0,15%, dan pada paduan AA 5023 kandungan Cu sebesar 0,2% – 0,5%. Dapat dilihat pada Gambar 2.19 perbandingan grafik uji tarik pada ketiga paduan tersebut. Dari grafik dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kandungan Cu pada paduan aluminium magnesium maka akan semakin tinggi kekuatan dari paduan [17].



Gambar 2.19 Variasi uji tarik dari berbagai paduan Seri 5 yang memiliki perbedaan persentase Cu [17]

Persen reduksi pengerolan dingin pada paduan aluminium magnesium juga dapat mempengaruhi kekuatan dari paduan. Terdapat perbedaan persen reduksi pengerolan pada paduan AA 5019 paduan AA 5023 yang mana pada kedua paduan memiliki variasi persen reduksi sebesar 46% dan 25%. Untuk paduan AA 5019 setelah dirol didapat ukuran butir sebesar 18 μm dan 27 μm . Untuk paduan AA 5023 memiliki ukuran butir yang lebih kecil yaitu 16 μm dan 25 μm [17]. Untuk grafik perbandingan nilai kuat tarik, kuat luluh, dan elongasi dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Perbandingan sifat mekanik
 (a) Paduan AA 5019 (b) Paduan AA 5023 [17]