

BAB II STUDI PUSTAKA

2.1. *Squeeze Casting*

Pengecoran *Squeeze* atau yang sering juga disebut penempaan logam cair adalah kombinasi proses pengecoran dan penempaan yang dapat dilakukan dengan bantuan tekanan tinggi ketika diterapkan selama pembekuan lelehan (**M. Dhanashekara dan Senthil Kumar,2014**)Untuk memperoleh produk cor yang memenuhi syarat-syarat ideal bagi suatu *sound – cast*, ada beberapa variabel yang perlu diperhatikan, yaitu :

a. Temperatur Tuang (*Casting Temperature*)

Temperatur ini tergantung pada jenis paduan dan bentuk coran / komponen. Biasanya temperatur tuang diambil 6 – 55⁰C di atas temperatur liquidus.kisaran suhu untuk penelitian adalah 680⁰C hingga 750⁰C hasil menunjukkan bahwa suhu penuangan yang lebih rendah lebih dekat ke suhu leleh menghasilkan coran yang berkualitas baik

b. Waktu Tunggu (*Time Delay*)

Waktu tunggu / Waktu tuang adalah lamanya waktu yang diukur dari saat pertama penuangan logam cair ke dalam rongga cetak hingga saat permukaan punch menyentuh dan mulai menekan permukaan logam cair. Bentuk penampang yang kompleks memerlukan waktu yang cukup bagi logam cair mengisi keseluruhan rongga cetakan; untuk itu perlu adanya tenggang waktu yang cukup sebelum punch menyentuh dan menekan logam cair. Hal ini untuk menghindari terjadinya porositas akibat penyusutan (*shrinkage porosity*).

c. Volume Cairan (*Melt Volume*)

Diperlukan kontrol yang akurat ketika logam cair dituangkan ke dalam rongga cetak (*die cavity*).

d. Durasi Penekanan (*Pressure Duration*)

Durasi penekanan dihitung dari saat punch di titik terendah sampai saat punch diangkat (penekanan dilepaskan). Untuk benda cor dengan berat hingga 9 kg, durasi penekanan yang sering dipakai bervariasi antara 30 – 120 detik. Akan tetapi biasanya durasi ini juga tergantung pada bentuk geometri coran yang diinginkan. Untuk material komposit pemberian tekanan setelah pembekuan (*solidification*) tidak memperbaiki sifat, tetapi hanya menambah waktu siklus saja

e. Temperatur Perkakas (*Casting Temperatur*)

Temperatur normal adalah 190 – 315⁰C. Untuk produk cor yang mempunyai penampang relatif tebal, rentang temperatur ini dapat diturunkan. Biasanya temperatur punch diatur 15 – 30⁰C dibawah temperatur die terendah untuk memungkinkan adanya kelonggaran atau ventilasi yang memadai diantara keduanya. Kelonggaran yang berlebihan antara punch dan die mengakibatkan erosi pada permukaan keduanya.

f. Batas Tekanan (*Pressure Level*)

Rentang tekanan normal adalah 50 – 140 MPa, tergantung pada bentuk geometri komponen serta sifat mekanis yang dibutuhkan. Tetapi dimungkinkan tekanan minimum adalah 40 MPa. Tekanan yang sering digunakan 70 MPa.

g. Pelumasan (*Lubrication*).

Proses squeeze casting membutuhkan pelumas pada permukaan dies untuk memudahkan proses pengambilan produk cor dari cetakannya. Akan tetapi sistem pelumasan ini diusahakan jangan sampai menutupi lubang ventilasi yang ada pada dies. Untuk paduan aluminium, magnesium, dan tembaga, permukaan dies biasanya disemprot dengan pelumas colloidal graphite. Sedangkan ferrous casting, permukaan dies biasanya dilapisi dengan sejenis bahan keramik untuk mencegah efek pengelasan antara produk cor dengan permukaan dies.

h. Kecepatan Pengisian (*Filling rate*)

Makin rendah kecepatan pengisian akan menyebabkan makin tingginya kemungkinan untuk mendapatkan aliran laminer. Akan tetapi kecepatan pengisian yang terlalu rendah dapat menyebabkan kehilangan panas (heat loss) yang besar dan berakibat pada terjadinya premature solidification serta cold shuts

1.2 Jenis Pengecoran *Squeeze Casting*

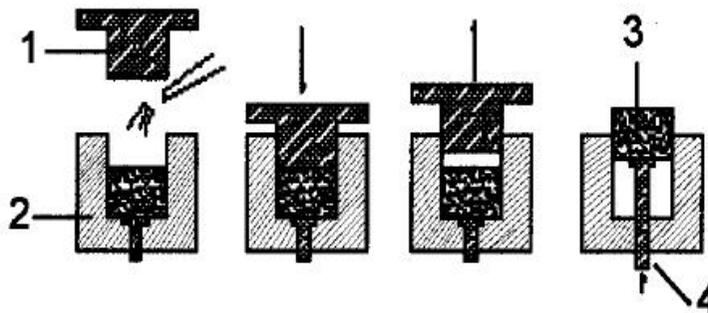
- Pengisian langsung (*direct squeeze casting*).

Proses pengecoran dimana logam cair didinginkan dengan disertai pemberian tekanan secara langsung. Dengan harapan mampu mencegah munculnya porositas gas dan penyusutan pada hasil coran. Keuntungan utama proses direct squeeze casting adalah sebagai berikut;

1. Mampu menghasilkan produk cor tanpa porositas gas dan penyusutan.
2. Tidak diperlukan gating system, dengan demikian tidak terjadi pembuangan material.
3. Tidak mempertimbangkan castability karena pemberian tekanan dapat mengeliminir kebutuhan akan high fluidity, baik untuk coran umum maupun paduan kasar.
4. Mikrostruktur coran dapat dimanipulasi dengan mudah melalui suatu proses kontrol yang baik seperti temperatur penuangan dan besarnya tekanan.

Untuk mencapai sifat coran yang optimum dapat juga ditambahkan bahan inti tertentu, akan tetapi hal ini biasanya tidak begitu penting.

5. Dikarenakan tidak adanya cacat pada proses squeeze yang baik maka biaya perlakuan setelah coran selesai dan biaya untuk pengelasan non destructive dapat dihemat atau tidak diperlukan.
6. Squeeze casting merupakan salah satu teknik yang paling efektif dan efisien untuk menghasilkan komponen komposit/paduan ferrous maupun non ferrous dengan bentuk mendekati kesempurnaan.

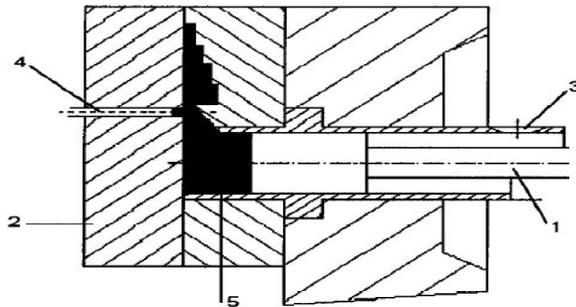


Gambar 2. 1. Direct Squeeze Casting.

- Pengisian tidak langsung (*indirect squeeze casting*)

Istilah indirect dipakai untuk menggambarkan injeksi logam kedalam rongga cetakan dengan bantuan piston berdiameter kecil dimana mekanisme penekan ini dipertahankan sampai logam cair membeku. Keuntungan utama ISC adalah kemampuannya untuk menghasilkan produk cor dengan bentuk yang lebih kompleks dengan memberikan beberapa sistem pengeluaran inti (*core pull*). Proses ini sebetulnya merupakan proses cangkakan antara low pressure dan high pressure die casting. Proses ISC ini tidak sebaik proses DSC. Secara khusus ada dua kelemahan ISC dibandingkan dengan DSC.

- Penggunaan bahan baku tidak efisien karena adanya kebutuhan pembuatan runner dan gating system. Efisiensi pemakaian bahan hanya 28 %. Sebagai contoh untuk menghasilkan dengan berat 0,62 kg diperlukan bahan cor seberat 2,2 kg.
- Wrought aerospace alloys yang memiliki kekuatan yang tinggi, pada dasarnya sulit dikerjakan dengan ISC, kalau pun bisa hasil coran tidak bisa bebas dari cacat.



Gambar 2. 2. Indirect Squeeze Casting

1.3 Pengaruh temperature tuang (*Casting Temperature*)

Menurut (AH Ahmad, Dkk, 2014) metode termal langsung digunakan untuk penciptaan mikrostruktur globular yang cocok untuk logam semi padat membentuk dalam validasi bekerja aluminium cair A356 dituangkan ke dalam cetakan tabung tembaga metalik dan didinginkan ke semi padat suhu sebelum dipadatkan dalam air pada suhu kamar. Pengaruh menuangkan suhu 630 °C , 650 °C, 665 °C, 680 °C dan waktu tahan 45s dan 60 s pada struktur mikro paduan aluminium A356 . Hasil simulasi menunjukkan bahwa rata-rata tingkat suhu dalam cetakan tembaga dari menuangkan suhu awal sebelum quenching kira-kira 1 °C/s. pemeriksaan yang dipadatkan mikrostruktur menunjukkan bahwa struktur mikro lebih bulat ketika menurunkan suhu penuangan dan menahannya periode digunakan. Dari mikroskop itu ditemukan bahwa struktur yang paling bulat dan terkecil adalah dicapai pada parameter pengolahan 630°C dan 45 an

Pengaruh temperature penuangan dapat dilihat bahwa semakin tinggi temperature penuangan semakin kecil penyusutan yang terjadi pada hasil coran. Ini disebabkan karena semakin tinggi temperature yang digunakan maka struktur atom dalam aluminium semakin tak beraturan jadi distribusi atom tersebar secara merata akan memberikan semakin banyak waktu pembekuan yang sempurna sehingga rongga udara akan mendapatkan cukup waktu untuk tertutupi.

Pada proses squeeze casting menggunakan tekanan 25 Mpa- 150 Mpa. Pada tekanan 25 Mpa dengan temperatur tuang 650°C, 700°C, dan 750°C masing-masing tekanan dituang dalam temperatur cetakan 250°C dengan durasi penekanan 30 detik. Dalam penelitian ini menggunakan Al paduan dan pelumas 10% grafit dalam minyak pelumas tipe 20W / 50 digunakan: Si-8,08%, Cu-1,920%, Fe-0,686%, Mn-0,173%, Ni-0,086%, Al-rem. Pelelehan digunakan menggunakan tungku resistensi dan mesin hidrolik. sebelum cairan yang telah di cor di tuang ke cetakan. Cetakan dipanaskan terlebih dahulu sampai temperatur 250°C. Kemudian cairan dimasukkan ke dalam cetakan setelah itu di tekan

dengan tekanan yang telah divariasi secara berurutan dengan waktu tekan 30 detik. Dalam temperatur tuang, kepadatan meningkat seiring dengan peningkatan tekanan. Pada temperatur tuang 650°C pada tekanan 75 Mpa kepadatannya meningkat 2.830 g/cm³, pada temperatur tuang 700°C densitasnya meningkat tajam dari 2.720 g/cm³ pada tekanan 0 Mpa menjadi 2.842 g/cm³, sedangkan pada temperatur tuang 750°C kerapatannya semakin meningkat seiring dengan tekanan yang semakin tinggi. Karenanya pada kurva 700 dan 750°C cenderung meningkat. Kecenderungan ini diakibatkan dengan tekanan dan temperatur dapat menurunkan porositas dan mengurangi jarak antar atom sehingga jarak antar atom semakin rapat. Suhu optimum pada temperatur tuang 700°C pada tekanan 150 Mpa. (A. Raji dan R. H. Khan, 2006). Pada *squeeze casting* Al-Si4Cu terdapat beban penekanan 10, 15, 20, 25, 30 MPa dengan temperatur tuang yang 750, 800, dan 850°C dan temperatur cetakan 300°C dengan durasi penekanan 30 detik, percobaan korosi dilakukan dengan beberapa waktu dan tekanan yang divariasikan. Pengujian korosi menggunakan larutan NaCl 3,5%. Dari ghasil pengecoan ini di analisis laju korosinya dengan menggunakan elektrokimia dari Al-Si-4Cu dilakukan dengan potensiostad polarisasi. Semua percobaan dilakukan dengan komputer (PCI4/750, GAMRY Instruments, Inc., Warminster, PA) dalam larutan NaCl 3,5% per liter air suling pada suhu kamar. Struktur mikro dari bahan coran berbentuk hipoetektik yang terdiri dari alfa pimer silikon almunium. pada tekanan 30 Mpa dengan variasi temperatur tuang 750, 800, dan 850°C didapat ukuran butir yang semakin halus. Dan tekanan semakin tinggi dengan variasi temperatur menghasilkan struktur mikro yang lebih halus. Pada parameter *squeeze casting* telah menurunkan arus korosi sekitar 100 mV menjadi -792 mV. Pada tekanan 15 Mpa dengan temperatur 750°C I_{corr} yang dihasilkan semakin sedikit sedangkan pada temperatur 850°C I_{corr} semakin meningkat. Sedangkan pada tekanan 20-30 Mpa pada suhu 850°C terjadi penurunan I_{corr} . Semakin halus mikrostruktur maka ketahanan korosinya semakin menurun. Pada pengujian ini korosi yang terjadi berupa korosi sumuran (Yaseen. R. S, Hussein. H. A, 2015). Pada beban penekanan 60 MPa dengan variasi temperatur tuang 680, 700, dan 720°C didapat ketebalan 0,02 mm dengan diameter 0.10. analisa struktur mikro menghasilkan bahwa temperatur tuang yang rendah dapat menyempurnakan struktur dendrite dan membentuk eutektik dibatas dendrite (Zhang. X, dkk, 2017). Al A319 dihasilkan dari proses *squeeze casting* dengan beban penekanan 10, 15, 20, 25, 30 Mpa dan temperatur tuang 850°C dengan proses pemanasan T6 dengan panas isotermik. Perlakuan panas isotermik yang cepat menghasilkan peningkatan morfologi pada permukaan spesimennya lebih halus dan dapat diterima dibanding dengan perlakuan panas T6 dan kemungkinan juga dampak

dari durasi paparan yang singkat dari percobaan pemanasan isotermik yang cepat, sehingga peningkatan laju oksidasinya berkurang dan lapisan oksidanya terkelupas (**Razooqi. R.N, dkk, 2013**). Pengecoran daur ulang Al-Si digunakan menggunakan variasi temperatur tuang 670°C, 720°C, dan 770°C menunjukkan bahwa struktur mikro yang terjadi keseluruhan pada bahan coran berupa struktur *dendrite*. Struktur *dendrite* merupakan salah satu ciri dari aluminium paduan (Al-Si). Yang membedakan variasi temperatur tuang adalah pada struktur *dendrite* dan susunannya. Pada temperatur 670°C mempunyai ukuran dendrite yang besar, padat, dan porositas sedang. Semakin besar temperatur pengecoran maka struktur *dendrite* akan semakin mengecil (**M.T, Tofa, Zubaidin dan Wijoyo, 2017**). Sebuah produk cor-coran yang mempunyai variasi temperatur tuang 650°C, 700°C, dan 750°C dan temperatur cetakan 100°C, 200°C, dan 300°C menunjukkan perubahan serpihan Mg yang semula tebal menjadi tipis dikarenakan terjadinya laju pembekuan, temperatur tuang dan waktu pembekuan. Semakin tinggi temperatur tuang maka yang dihasilkan serpihan Mg semakin tebal yang terdapat oksidasi dikarenakan gas lingkungan seperti oksigen dan hidrogen yang menjadikan serpihan Mg menjadi tipis, serta lambatnya pembekuan menyebabkan logam cair teroksidasi lebih banyak yang ditunjukkan dengan dominan semakin kecilnya serpihan yang dihasilkan pada temperatur tuang yang tinggi. Pada temperatur 750°C dengan temperatur 200°C terjadi pengurangan serpihan garis tipis lebih dominan, berarti dengan adanya laju pembekuan dan waktu pembekuan yang cukup lama membuat magnesium lebih mudah teroksidasi yang membuat laju korosi semakin cepat. dengan penambahan Mg pada proses pengecoran membuat sifat mekanik suatu bahan semakin meningkat. Jumlah Mg yang berkurang mengakibatkan sifat reaksi oksidasi Mg cepat terjadi dan cepat menguap pada logam AlMg₂ mencapai titik lebur. Menurunnya unsur Mg dapat menurunkan kekuatan logam AlMg (**Apris. L. K. W, dkk, 2016**)

1.4 Pengaruh variasi waktu tuang (Time Delay)

Menurut (**Mohammad B Ndaliman, dkk, 2013**) Waktu tuang adalah waktu / kecepatan penuangan yang dibutuhkan untuk memenuhi cetakan. Kecepatan penuangan yang berbeda akan mempengaruhi sifat mekanik produk coran. Kisaran kecepatannya adalah 2,0 cm / det hingga 16,0 cm / det. Kecepatan tuang yang optimal adalah dalam kisaran 2,2 cm / det hingga 2,8 cm / det, di mana kekerasan dan kekuatan masing-masing adalah 65,4 dan 127 N / mm².

Untuk penelitian ini, parameter pengecoran bervariasi adalah suhu penuangan dan laju penuangan. Spesimen paduan aluminium pasir-cor diproduksi dengan cetakan pola kayu. Prosedur pengecoran standar, yang terdiri dari pembuatan

pola, pencetakan, peleburan, penuangan dan pembersihan / fettling. Setelah pencetakan, potongan-potongan dari paduan aluminium dilelehkan dalam tungku peleburan. Pengisian dan peleburan dilakukan selama 1 jam. Pengukuran suhu dilakukan dengan *thermocouple*, dan paduan itu selalu dipanaskan sampai suhu 1000° C di atas suhu penuangan yang ditentukan. Hal ini memungkinkan penurunan suhu yang terjadi selama *reload* dan kehilangan suhu selama waktu yang diperlukan untuk menuangkan coran untuk dikompensasikan. Ukuran dan bentuk yang sama dilemparkan untuk menyajikan keseragaman dalam pengukuran.

Menuangkan kecepatan logam cair, V dapat didefinisikan sebagai aliran logam per satuan waktu. Dalam menentukan kecepatan penuangan, parameter, V, dinyatakan sebagai jarak ladel di atas baskom penuangan per satuan waktu penuangan logam. Ini dinyatakan sebagai:

$$V = \frac{H}{T} \left(\frac{cm}{det} \right)$$

dimana: V = kecepatan penuangan (cm / s);

H = Tinggi ladel di atas cetakan (cm);

T = Waktu untuk menuangkan logam cair (detik).

Logam cair kemudian dituangkan ke dalam cetakan dan waktu penuangan untuk setiap cetakan secara bervariasi untuk delapan spesimen sehingga memperoleh kecepatan tuang yang berbeda untuk setiap pengecoran pengecoran. Suhu penuangan dipertahankan pada 700 ° C. Suhu penuangan coran paduan aluminium diukur dengan termokopel. Dalam ladel penuang, ujung instrumen diizinkan untuk melakukan kontak dengan pangkal logam cair yang terkandung di dalamnya. Untuk setiap pengecoran, dicatat pertambahan suhunya. Yang pertama adalah pembacaan suhu pada awal menuangkan logam cair ke dalam cetakan dan yang kedua adalah pembacaan suhu cetakan yang terisi. Rata-rata dari dua suhu yang dihitung adalah suhu untuk casting tertentu. Ini dilakukan untuk delapan coran pada temperatur yang berbeda. Kecepatan menuangkan dipertahankan pada 2,5 cm / det. Logam cair yang dituangkan diizinkan untuk memadatkan dan mendinginkan, dan kemudian dikeluarkan dari pasir dan operasi fettling dilakukan pada mereka menggunakan metode normal

Pengaruh waktu tuang bahwa semakin lama waktu tuang yang diberikan maka akan semakin kecil penyusutan yang terjadi. Hal ini bias terjadi karena logam cair semakin banyak mendapatkan waktu untuk memenuhi rongga cetakan sehingga coran yang dihasilkan semakin padat dan penyusutan menjadi semakin kecil

1.5 Perlakuan Panas T6

Heat treatment (perlakuan panas) adalah salah satu proses untuk mengubah struktur logam dengan cara memanaskan specimen pada *electric trance* (tungku) pada temperatur rekristalisasi selama periode waktu tertentu, kemudian didinginkan pada media pendingin seperti udara, air, air garam dan solar yang masing-masing mempunyai kerapatan pendinginan yang berbeda beda. Dengan adanya pemanasan dan pendinginan dengan kecepatan tertentu, maka bahan-bahan logam dan paduan memperlihatkan perubahan strukturnya. Perlakuan panas memiliki pengaruh yang besar pada karakteristik komposit seperti kekerasan dan ketahanan aus yang lebih baik (**Keshavamurthy dkk, 2016**).).

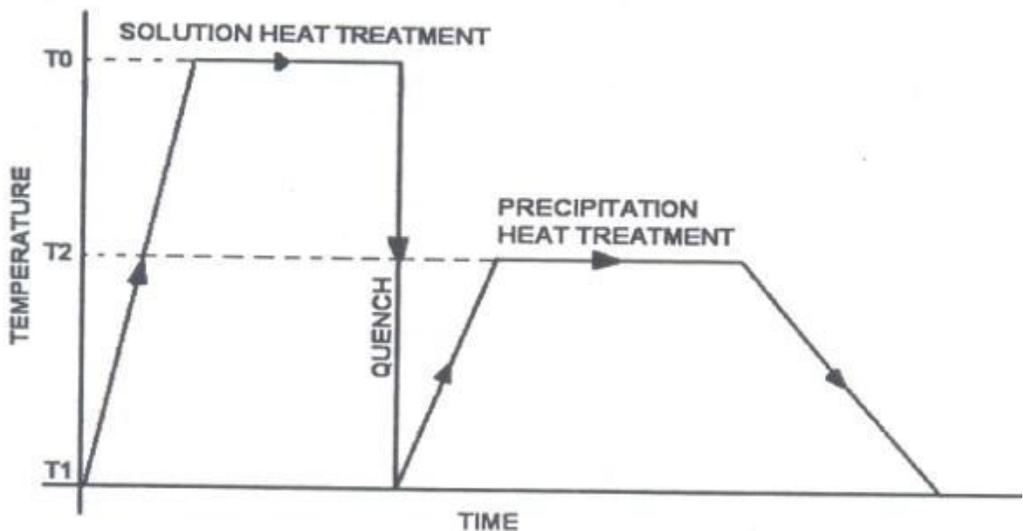
Perlakuan panas pada aluminium paduan dilakukan dengan memanaskan sampai terjadi fase tunggal kemudian ditahan beberapa saat dan diteruskan dengan pendinginan cepat hingga tidak sempat berubah ke fase lain. Jika bahan tadi dibiarkan untuk jangka waktu tertentu maka terjadilah proses penuaan (*aging*). Perubahan akan terjadi berupa presipitasi (*pengendapan*) fase kedua yang dimulai dengan proses nukleasi dan timbulnya klaster atom yang menjadi awal dari presipitat. Presipitat ini dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Proses ini merupakan proses *age hardening* yang disebut *natural aging*. Jika setelah dilakukan pendinginan cepat kemudian dipanaskan lagi hingga di bawah temperatur solvus (*solvus line*) kemudian ditahan dalam jangka waktu yang lama dan dilanjutkan dengan pendinginan lambat di udara disebut proses penuaan buatan (*artificial aging*).

Salah satu cara perlakuan panas pada logam paduan aluminium adalah dengan penuaan keras (*age hardening*). Melalui penuaan keras, logam paduan aluminium akan memperoleh kekuatan dan kekerasan yang lebih baik. Dahulu orang menyebut penuaan keras dengan sebutan pemuliaan atau penemperan keras. Penamaan tersebut kemudian dibakukan menjadi penuaan keras karena penemperan keras pada logam paduan aluminium berbeda dengan penemperan keras yang berlangsung pada penemperan keras baja.

Paduan aluminium yang dapat ditua keraskan atau di *age hardening* dibedakan atas paduan aluminium yang dapat ditua keraskan dalam keadaan dingin dan paduan aluminium yang dapat ditua keraskan dalam keadaan panas. Penuaan keras berlangsung dalam tiga tahap.

Tahapan perlakuan panas T6 (*Age Hardening*) adalah :

1. *Solution treatment*
2. *Quenching*
3. *Aging*

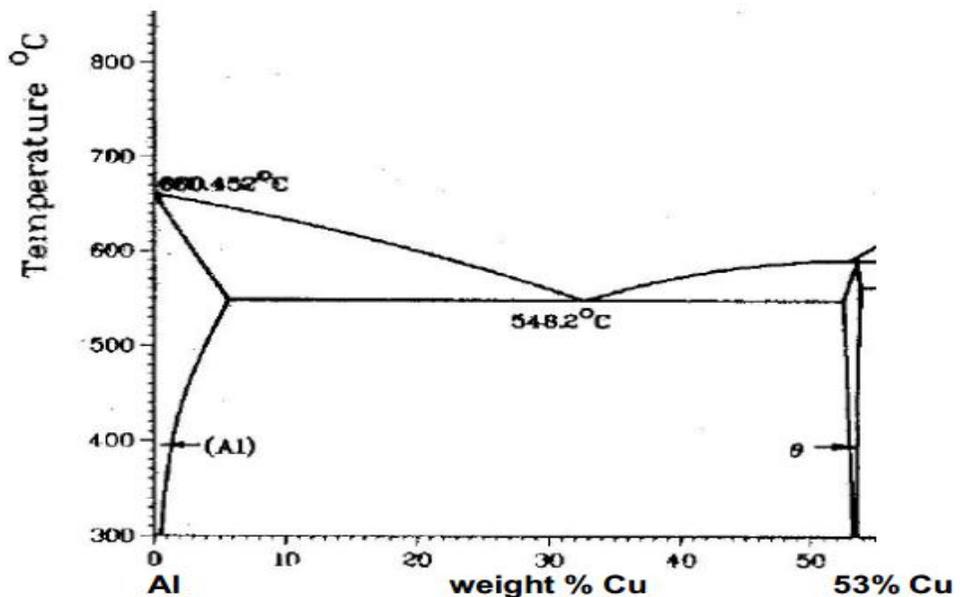


Siklus perlakuan panas menurut **K. Fazlur Rahman & M. M. Benal, 20**

Gambar 2. 3. Siklus Perlakuan Panas

i. *Solution Heat Treatment* (Perlakuan Panas Pelarutan).

Tahap pertama dalam proses age hardening yaitu *solution heat treatment* atau perlakuan panas pelarutan. *Solution heat treatment* yaitu pemanasan logam aluminium dalam dapur pemanas dengan temperatur 550°C - 560°C dan dilakukan penahanan atau *holding* sesuai dengan jenis dan ukuran benda kerja (Schonmetz, 1990). pada tahap *solution heat treatment* terjadi pelarutan fasa-fasa yang ada, menjadi larutan padat. Tujuan dari *solution heat treatment* itu sendiri yaitu untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogen. Proses *Solution heat treatment* dapat dijelaskan dalam gambar 2. dimana logam paduan dipanaskan dalam dapur pemanas hingga mencapai temperatur T1. Pada temperatur T1 fase logam paduan akan berupa kristal campuran α (symbol angka 8 miring kepotong) dalam larutan padat. Pada temperatur T1 tersebut pemanasan ditahan beberapa saat agar didapat larutan padat yang mendekati homogen.



Gambar 2. 4 Diagram fasa perlakuan panas Al-Cu

ii. *Quenching* (Pendinginan Cepat)

Benda yang telah mengalami perlakuan panas lalu diperlakukan pendinginan, mempunyai kekuatan tarik yang menurun apabila dibandingkan dengan benda sebelum mengalami perlakuan panas, hal ini disebabkan karena lambatnya laju pendinginan yang terjadi, sehingga akan menimbulkan butiran yang terbentuk menjadi besar. Dengan laju pendinginan yang cepat akan membentuk struktur butiran yang kecil, sehingga kekuatan baja menjadi tinggi dan tidak mudah putus (**Rubijanto, 2006**)

Material awal memiliki struktur mikro berupa karbida spheroidal dalam matriks ferit sedangkan struktur mikro hasil quench-temper terdiri dari martensit, perlit dan martensit temper. Semakin lama waktu temper yang diberikan maka martensit temper yang terbentuk akibat proses temper akan semakin banyak pula sedangkan martensit hasil quench makin sedikit, hal ini akan menurunkan nilai kekerasan dari material karena sifat dari martensit temper yang lebih lunak dari pada martensit hasil quench. Dengan turunnya kekerasan diikuti naiknya keuletan material akan menyebabkan umur lelah material yang makin rendah, hal ini terjadi karena fenomena tersebut masih berada pada daerah dimana dengan kekerasan yang dimiliki material belum

melampaui batas lelah maksimumnya sehingga kekerasan berbanding lurus dengan umur lelah material (**Ahmad Fahrur Rozaq dan Soeharto, 2013**).

iii. *Aging* (Tahapan Penuaan).

Aging dapat dilakukan dengan membiarkan larutan lewat jenuh itu pada temperatur kamar selama beberapa waktu. Dinamakan *natural aging* atau dengan memanaskan kembali larutan lewat jenuh itu ke temperatur di bawah garis solvus dan dibiarkan pada temperatur tersebut selama beberapa saat. Dinamakan *artificial aging* Bila *aging* temperatur terlalu tinggi dan atau *aging time* terlalu panjang maka partikel yang terjadi akan terlalu besar (sudah mikroskopik) sehingga efek penguatannya akan menurun bahkan menghilang sama sekali, dan ini dinamakan *over aged*.

Setelah dilakukan pendinginan cepat kemudian dipanaskan lagi hingga dibawah temperatur solvus (*solvus line*) kemudian ditahan dalam jangka waktu yang lama dan dilanjutkan dengan pendinginan lambat di udara. Perubahan sifat-sifat dengan berjalannya waktu pada umumnya dinamakan *aging* atau penuaan. *Aging* atau penuaan pada logam paduan dibedakan menjadi dua, yaitu penuaan alami (*natural aging*) dan penuaan buatan (*artificial aging*).

Aging (perlakuan penuaan) yaitu perlakuan panas dengan menahannya pada suatu temperatur tertentu (temperatur kamar atau temperatur dibawah *solvus line*/batas pelarut) untuk jangka waktu tertentu. Penuaan dapat dibagi menjadi dua yaitu :

- 1) Penuaan yang dilakukan dengan membiarkan larutan padat jenuh itu pada temperatur kamar selama beberapa waktu, dinamakan *natural aging* yaitu penuaan yang terjadi secara alamiah.
- 2) Penuaan dengan memanaskan kembali larutan padat jenuh itu kesuatu temperatur di bawah garis *solvus* dan dibiarkan pada temperatur tersebut selama beberapa saat, dinamakan *artificial aging* (*aging* buatan/*aging treatment*).

1.6 Koefisien muai

Adalah perubahan suatu benda yang bisa menjadi bertambah panjang, lebar, luas, atau berubah volumenya karena terkena panas (kalor). Singkatnya, pemuaian panas adalah perubahan benda yang terjadi karena panas. Pemuaian tiap-tiap benda akan berbeda, tergantung pada suhu di sekitar dan koefisien muai atau daya muai dari benda tersebut. Perubahan panjang akibat panas ini, sebagai contoh, akan mengikuti:

$$L_t = L_0(1 + \alpha * \Delta t)$$

Dimana

- L_t adalah panjang pada suhu t
- L_0 adalah panjang pada suhu awal
- α adalah koefisien muai panjang/ koefisien muai linier
- Δt adalah besarnya perubahan suhu

Suatu benda akan mengalami muai panjang apabila benda itu hanya memiliki (dominan dengan) ukuran panjangnya saja. Muai luas terjadi pada benda apabila benda itu memiliki ukuran panjang dan lebar, sedangkan muai volum terjadi apabila benda itu memiliki ukuran panjang, lebar, dan tinggi.

$$A_t = A_0(1 + \beta * \Delta t)$$

Dimana

- A_t adalah luas (area) pada suhu t
- A_0 adalah luas pada suhu awal
- β (2 kali $\cdot \alpha$) adalah koefisien muai luas
- Δt adalah besarnya suhu

Dan untuk perubahan volum:

$$V_t = V_0(1 + \gamma * \Delta t)$$

Dimana

- V_t adalah volum pada suhu t
- V_0 adalah volum pada suhu awal
- γ (3 kali $\cdot \alpha$) adalah koefisien muai volum
- Δt adalah besarnya perubahan suhu

Pada umumnya, ukuran suatu benda akan berubah apabila suhunya berubah. Pada benda-benda yang berbentuk batang, perubahan ukuran panjang akibat perubahan suhu adalah sangat nyata, sedangkan perubahan ukuran luas dapat diabaikan karena kecilnya.

Perubahan panjang akibat perubahan suhu dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

Persamaan tersebut dapat diubah menjadi dimana $\Delta L/L_0$ adalah perubahan relative dari panjang dan ΔT adalah perubahan suhu. Dengan demikian koefisien muai panjang (α) suatu zat didefinisikan sebagai perubahan relative dari panjang zat itu perderajat perubahan suhu (**Tim Penyusun, 2007**).

Efek-efek yang lazim dari perubahan temperatur (suhu) adalah suatu perubahan ukuran bahan. Bila temperatur dinaikan maka jarak rata-rata diantara atom-atom akan bertambah yang mengakibatkan suatu ekspansi dari seluruh benda padat tersebut. Perubahan dari setiap dimensi linier tersebut, seperti panjang, lebar, atau tebalnya dinamakan ekspansi linier.

Koefisien ekspansi linier mempunyai nilai yang berbeda-beda untuk bahan-bahan yang berbeda. Tegasnya boleh dikatakan bahwa koefisien ekspansi linier atau koefisien muai panjang tergantung pada temperatur referensi yang dipilih untuk menentukan panjang awal. Akan tetapi variasinya biasanya dapat diabaikan dibandingkan terhadap ketelitian dengan nama pengukuran (**Tepler, 1998**).

Salah satu sifat zat pada umumnya adalah akan mengalami perubahan dimensi (panjang, luas dan volume) bila dikenai panas, seandainya benda tersebut berwujud batang atau kabel maka yang banyak menarik perhatian adalah perubahan panjangnya. Untuk itu didefinisikan suatu besaran yang disebut koefisien muai panjang (α) suatu perubahan fraksional panjang $\Delta L/L_0$ dibagi perubahan suhu. Bila $\Delta L = L_t - L_0$

$$\text{Maka, } L_t = L_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T) \dots\dots\dots(2)$$

Bila umumnya α berharga sangat kecil, sehingga α^2 dapat diabaikan, maka :

$$L_2 = L_1 (1 + \alpha (T_2 - T_1)) \dots\dots\dots(3)$$

Persamaan diatas menyatakan bahwa panjang batang pada suatu kondisi dapat dinyatakan dalam panjang batang disetiap kondisi lain asal suhu kedua kondisi itu diketahui (**Tim Penyusun, 2003**).

Semua logam memuai pada fraksi yang sama dari volume semula. Kehilangan logam seperti timah seolah-olah mengetahui bahwa ia akan cepat melebar, sehingga ia memuai dengan cepat sesuai dengan kenaikan temperature sedangkan platina dengan titik lebur tinggi memperlambat Sedangkan platina dengan titik lebur tinggimemperlambatkelajuanpemuaiannya. Koefisien volume dapat dihitung dalam bentuk koefisien linier (lurus) sebagai berikut, misalnya sebuah benda padat berbentuk paralelepipedum tegak yang panjang isinya L_1 , L_2 , dan L_3 .

Maka volumenya ialah :

$$V = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{dV}{dt} = L_1 \cdot L_2 \cdot \frac{dL_1}{dt} + L_1 \cdot L_3 \cdot \frac{dL_2}{dt} + L_1 \cdot L_2 \cdot \frac{dL_3}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

Ini kita bagi dengan L_1, L_2, L_3 , maka :

$$1. \frac{dV}{V dt} = 1 \cdot \frac{dL_1}{L_1 dt} + 1 \cdot \frac{dL_2}{L_2 dt} + 1 \cdot \frac{dL_3}{L_3 dt} \dots\dots\dots(6)$$

(Sears&Zemansky, 1969)