BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Komposit

Material komposit adalah sistem bahan yang terdiri dari kombinasi dua atau lebih unsur mikro atau makro yang berbeda dalam bentuk, komposisi, kimia dan yang pada dasarnya tidak larut dalam satu sama lain. Salah satunya yang disebut matriks (pengikat) dan yang lainnya adalah penguat. Fase yang memperkuat tertanam dalam matriks untuk memberikan karakteristik yang diinginkan. (**B. Mahalingegowda & B. S. Mahesh, 2014**).

Penguat adalah komposit terdapat bahan yang di sebut sebagai matriks dan bahan peguat. Bahan matriks umumnya dapat berupa logam, polimer, keramik, dan karbon. Matriks dalam komposit berfungsi untuk mendistribusikan beban ke dalam seluruh material penguat komposit. Sifat matrik biasanya ductile (ulet). Sifat bahan penguat biasanya kaku dan tangguh. **(Herman.S,2010)**

2.2. Penyusun Komposit

Komposit pada umumnya terdiri dari 2 fase :

2.2.1. *Matriks*

Matriks adalah fase dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan).

Matriks mempunyai fungsi sebagai berikut :

a. Mentransfer tegangan ke serat.
b. Membentuk ikatan koheren, permukaan matrik/serat.
c. Melindungi serat.
d. Memisahkan serat.
e. Melepas ikatan.
f. Tetap stabil setelah proses manufaktur.

2.2.2. *Reinforcement atau filler atau fiber*

Salah satu bagian utama dari komposit adalah *reinforcement* (penguat) yang berfungsi sebagai penanggung beban utama pada komposit.

2.3. Klasifikasi Komposit

Berdasarkan matrik, komposit dapat diklasifikasikan kedalam tiga kelompok besar yaitu:

a. Komposit Matrik Keramik (Ceramic Matrix Composites – CMC)

Ceramic metal composite yaitu material dua fasa dengan satu fasa berfungsi sebagai matriks di mana matriksnya tersebut dari keramik. Penguat yang umumnya du gunakan pada CMC adalah; oksida, carbide, dan nitride. Salah satu pembuatan dari CMC yaitu dengan proses DIMOX yaitu proses pembentukan

komposit dengan reaksi oksidasi leburan logam untuk pembentukan matriks keramik di sekeliling daerah filler (penguat).

b. Komposit Matrik Logam (Metal Matrix Composites – MMC)

Metal matrix composites adalah salah satu jenis komposit yang memiliki matriks logam. Material MMC mulai dikembangkan sejak tahun 1996. Pada mulanya yang diteliti adalah Continous Filamen MMC yang digunakan dalam aplikasi aerospace.

c. Komposit Matrik Polimer (Polymer Matrix Composites – PMC)

Polimer merupakan matriks yang paling umum digunakan pada material komposit. Karena memiliki sifat yang lebih tahan terhadap korosi dan lebih ringan. Matriks polimer terbagi 2 yaitu *thermoplastic* dan *thermoset*. Perbedaannya *thermoplastic* dapat didaur ulang sedangkan thermoset tidak dapat didaur ulang. Sehingga lebih banyak yang digunakan thermoplastic belakangan ini. Jenis-jenis thermoplastic yang biasa digunakan adalah *polypropylene* (PP), *polystryrene* (PS), *polyethylene* (PE), dan lain-lain.

2.4. Bahan Komposit

2.4.1. Aluminium 6061 (Al-Mg-Si)

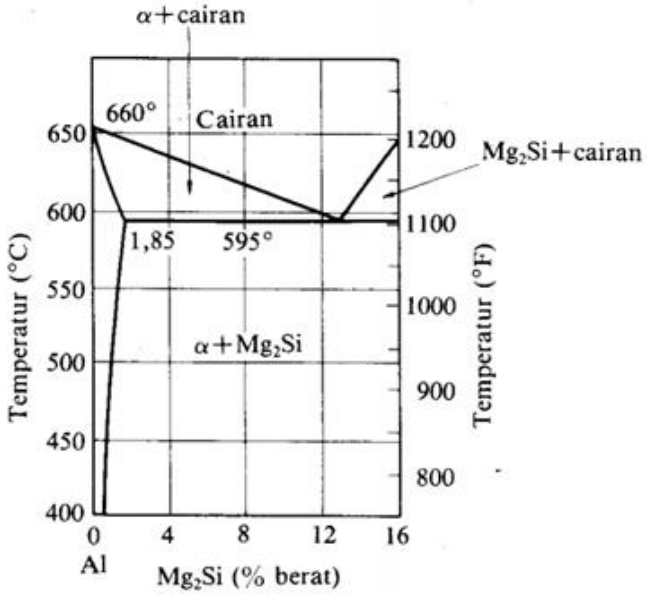
Dalam penelitian ini Al 6061 (Al-Mg-Si) berfungsi sebagai *matriks*. Yaitu paduan aluminium seri 6xxx yang mengandung magnesium dan silicon sebagai unsur paduan utama. *Density* adalah 2,7 gr/cm^3 dan mencair pada suhu sekitar 630℃ dua digit terakhir dari Al 6061 mengidentifikasi paduan aluminium yang berbeda dalam kelompok. Angka kedua menunjukkan modifikasi paduan. Sebuah digit kedua nol menunjukkan paduan asli dan bilangan bulat 1 sampai 9 menunjukkan modifikasi paduan berturut-turut. Komposisi Al 6061 ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 2.1. Komposisi Al 6061 (**Veigas Criston, dkk, 2016**).

Komponen	**Komposisi %**
Si	0.55
Cu	0.3
Fe	0.15
Mn	0.15
Mg	0.9
Zn	0.12
Cr	0.23
Ti	0.1
Al	96.5

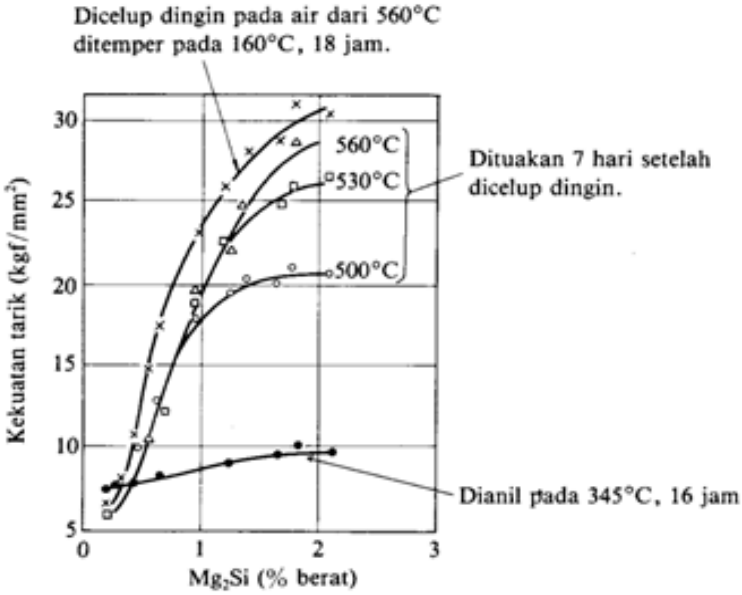
Kalau sedikit Mg ditambahkan kepada Al, pengerasan penuaan sangat jarang terjadi, tetapi apabila secara simultan mengandung Si, maka dapat dikeraskan dengan penuaan panas setelah perlakuan pelarutan. Hal ini disebabkan karena senyawa Mg_2Si berkelakuan sebagai komponen murni dan membuat keseimbangan dari sistim biner semu dengan Al. Gambar. 2.2. menunjukkan diagram fasa paduan Al-Mg_2Si. Yang berasal dari kelarutan yang menurun dari Mg_2Si terhadap larutan padat Al dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Sebagai paduan praktis dapat diperoleh paduan 5053, 6063 dan 6061. Paduan dalam sistim ini mempunyai kekuatan kurang sebagai bahan tempaan dibandingkan dengan paduan-paduan lainnya, tetapi sangat liat, sangat baik mampu bentuknya untuk penempaan, ekstrusi dan sebagainya, dan sangat baik untuk mampu bentuk yang tinggi pada temperatur biasa. Mempunyai mampu bentuk yang baik pada ekstrusi dan tahan korosi, dan sebagai tambahan dapat diperkuat dengan perlakuan panas setelah pengerjaan. Paduan 6063 dipergunakan banyak untuk rangka-rangka konstruksi. Karena paduan dalam sistim ini mempunyai kekuatan yang cukup baik tanpa mengurangi hantaran listrik, maka dipergunakan untuk kabel tenaga. Dalam hal ini pencampuran dengan Cu, Fe dan Mn perlu dihindari karena unsur-unsur itu menyebabkan tahanan listrik menjadi tinggi.

Berikut ini adalah gambar diagram fasa dari Al-Mg-Si :



Gambar 2.1. Diagram fasa biner semu dari paduan Al-Mg_2Si.

Gambar 2.3. menunjukkan hubungan antara kekuatan setelah penuaan dan kadar Mg_2Si. Pada temperatur biasa cukup untuk dapat dikeraskan dengan penuaan akan tetapi pengerasan maksimum dapat dicapai dengan jalan perlakuan pelarutan pada 500°C, pencelupan dingin dan ditemper pada 160°C selama 18 jam.



Gambar 2.2. Pengaruh kadar Mg_2Si pada kekuatan tarik paduan Al-Mg_2Si.

Selanjutnya Tabel 2.2. menunjukkan contoh perlakuan panas dan sifat-sifat mekanik untuk paduan sitim ini.

Tabel 2.2. Sifat-sifat mekanik paduan Al-Mg_2Si.

Paduan	Keadaan	Kekuatan tarik (kgf/mm²)	Kekuatan mulur (kgf/mm²)	Perpanjangan (%)	Kekuatan geser (kgf/mm²)	Kekerasan Brinell	Batas lelah (kgf/mm²)
6061	O	12,6	5,6	30	8,4	30	6,3
	T4	24,6	14,8	28	16,9	65	9,5
	T6	31,6	28,0	15	21,0	95	9,5
6063	T5	19,0	14,8	12	11,9	60	6,7
	T6	24,6	21,8	12	15,5	73	6,7
	T83	26,0	24,6	11	15,5	82	—

2.4.2. *Aluminium Oxide* (Al_2O_3)

Dalam penelitian ini *aluminium oxide* (Al_2O_3) berfungsi sebagai penguat (*reinforcement*). Al_2O_3 atau disebut *aluminium oxide* adalah senyawa kimia dari aluminium dan oksigen dengan rumus kimia Al_2O_3 . Hal ini umumnya atau sering disebut dengan alumina yang dimana memiliki kepadatan 3,94-4,1 gr/cm^3 dan mencair pada suhu sekitar 2072℃ (**Veigas Criston, dkk, 2016**).

Aluminium oksida adalah senyawa kimia dari aluminium dan oksigen dengan rumus kimia Al_2O_3. Ini adalah yang paling umum terjadi dari beberapa oksida aluminium, dan secara khusus diidentifikasi sebagai aluminium (III) oksida. Hal ini

biasa disebut alumina, dan bisa juga disebut *aloxide*, *aloxite*, atau *alundum* tergantung pada bentuk atau aplikasi tertentu (**B. Mahalingegowda & B. S. Mahesh, 2014**).

Jenis penguat dari suatu material komposit sangat berpengaruh pada sifat-sifat material tersebut, selain itu ukuran partikel penguat juga mempengaruhi kekuatan/ketangguhan suatu material komposit hal ini disebabkan beban yang diterima akan di distribusikan ke seluruh bagian partikel penguat, sehingga semakin kecil ukuran partikel penguat maka jumlah penampang akan menjadi lebih besar karena beban yang terjadi akan diterima oleh seluruh luas penampang permukaan dari partikel penguat tersebut **(Seputro Harjo, 2002)**.

2.5. Metode *Electroles Plating*

Electroless plating biasanya digunakan untuk komponen mekanik ataupun elektronik khususnya untuk meningkatkan ketahanan aus (*wear resistance*) dan dalam beberapa kasus dilakukan untuk neningkatkan ketahanan korosi (dengan perlakuan panas khusus). *Electroless plating* dibagi menjadi dua bagian yaitu *autocatalytic plating* adalah proses *electroless plating* yang dimana elektron bebas yang berasal dari reduksi agen bergabung dengan ion logam dalam larutan dan membentuk logam padat pada permukaan, karena elektron diperoleh dari reduksi agen, maka proses pelapisan (*coating*) ini dapat terjadi setelah substrate tertutup/terlapisi dengan ketebalan tertentu, *electroless* nikel adalah salah satu contohnya. Sedangkan *ion-exchange plating* adalah proses *electroless plating* yang dimana berbasis pada oksidasi dari substrate yang akan dilapisi oleh ion logam yang lain yang berasal dari larutan pelapis, lapisan yang terbentuk dengan proses ini biasanya lebih tipis, sebab proses pelapisan akan terhenti ketika seluruh substrate telah terlapisi dan tidak dapat dihasilkan lagi *supplai electron* dengan proses oksidasi, logam yang dilapisi dengan metode ini biasanya adalah seng dan timah (**Zainuri. M, dkk, 2008**).

Salah satu jenis metode pembuatan komposit matriks keramik Al_2O_3 adalah melalui proses oksidasi, karena aluminium sulit berinfiltrasi dengan keramik Al_2O_3. Hal ini disebabkan pada awal oksidasi, aluminium membentuk lapisan tipis yang terjadi dipermukaan, lapisan tipis ini sulit ditembus dan sangat stabil. Rendahnya pembasahan dalam sistem logam dengan keramik, Mg dapat ditambahkan karena memiliki reaktivitas yang tinggi dan energi bebas yang kecil dalam proses oksidasi yang dapat menaikkan penetrasi kapilaritas oksida dan mempermudah terbentuknya *interface* logam/keramik juga mempengaruhi tegangan permukaan (**Sahari G. N. Anastasia, 2009**).

2.6. Metode *Squeeze Casting*

Istilah *squeeze casting* dapat diterapkan pada berbagai proses dimana tekanan diterapkan pada sistem pemadatan, biasanya melalui tekanan secara hidraulik maupun menggunakan beban penekan. Tekanan yang diterapkan memaksa logam cair untuk memiliki kontak intim dengan cetakan yang pada gilirannya menyebabkan perpindahan panas yang cepat menghasilkan ukuran butir yang lebih halus dan

komponen jarak lengan dendrit kecil dengan sifat mekanik mendekati produk tempa (**Moosa Ahmed A, dkk, 2011**).

Pengecoran *squeeze* sering disebut juga penempaan logam cair (liquid metal forging), yaitu suatu proses dimana logam cair didinginkan sambil diberikan tekanan. Proses ini pada dasarnya mengkombinasikan keuntungan-keuntungan pada proses *forging* dan *casting*.

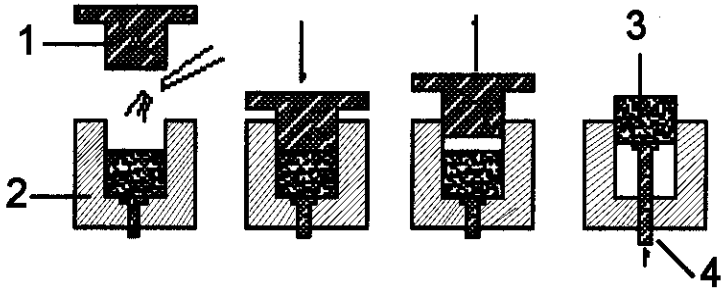
Perlengkapan proses antara lain : dapur pemanas, mekanisme press, *punch*, dan *die (direct), pouring hole, injection chamber plunger* dan *gating system (indirect).* Kontak logam cair dengan permukaan *die* memungkinkan terjadinya perpindahan panas yang cukup cepat, menghasilkan struktur mikro yang homogen dengan sifat mekanik yang baik.

Pengecoran *squeeze* dikelompokkan menjadi dua berdasarkan mekanisme pengisian logam cair ke dalam die yaitu : *Direct Squeeze Casting* (DSC) dan *Indirect Squeeze casting* (ISC).

2.6.1. *Direct Squeeze Casting* (DSC)

Keuntungan utama proses DSC 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 begitu mempertimbangkan *castability* karena pemberian tekanan dapat mengeliminir kebutuhan akan *high fluidity*, baik untuk coran secara 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 pengetesan *non destructive* dapat dihemat atau tidak diperlukan.
6. Sifat mekanik hasil coran dengan komposisi yang sama, bisa sebaik atau bahkan lebih baik dibandingkan produk coran dengan teknik yang lain.
7. *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 2.3. Mekanisme *direct squeeze casting*.

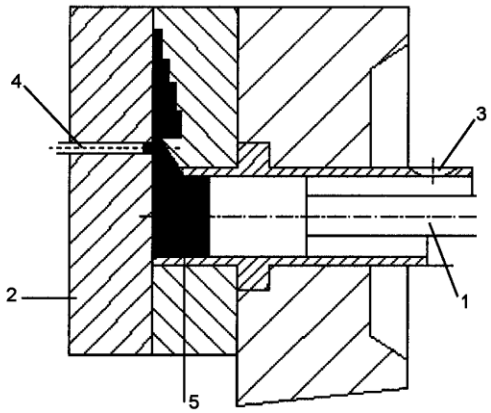
- Keterangan gambar :
  1. *Punch*
  2. *Dies*
  3. Benda Cetak
  4. Plunyer Pendorong

Metoda DSC dapat diadopsi untuk menghasilkan komponen otomotif, seperti *piston*, *brake-disc*, *velg/wheel*, dan industri rekayasa umum lainnya dengan kualitas yang cukup tinggi.

2.6.2. *Indirect Squeeze Casting* (ISC)

Istilah *indirect* dipakai untuk menggambarkan injeksi logam ke dalam 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 cangkokan antara *low pressure* dan *high pressure die casting*. Proses ISC ini tidak sebaik proses DSC. Secara khusus ada dua kelemahan ISC dibanding dengan DSC :

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



Gambar 2.4. Mekanisme *indirect squeeze casting*.

- Keterangan gambar :
  1. Plunyer penekan
  2. *Dies*
  3. *Pouring hole*
  4. *Gating system*
  5. Benda cetak

Parameter proses pengecoran *squeeze*

Untuk memperoleh produk cor yang memenuhi syarat-syarat ideal bagi suatu *sound-cast*, ada beberapa variabel yang perlu diperhatikan, yaitu :

1. Volume Cairan Logam (*Melt Volume*)
   Diperlukan kontrol yang akurat ketika logam cair dituangkan ke dalam rongga cetak (*die cavity*).
2. Temperatur Tuang (Casting Temperature)
   Temperatur ini tergantung pada jenis paduan dan bentuk coran/komponen. Biasanya temperatur tuang diambil 6-55℃ di atas temperatur liquidus.
3. Temperatur Perkakas (Tooling Temperature)
   Temperatur normal adalah 190-315℃. Untuk produk cor yang mempunyai penampang relatif tebal, rentang temperatur ini dapat diturunkan. Biasanya temperature punch diatur 15-30℃ dibawah temperature die terendah untuk memungkinkan adanya kelonggaran atau ventilasi yang memadai diantara keduanya. Kelonggaran yang berlebihan antara punch dan die mengakibatkan erosi pada permukaan keduanya.
4. Waktu Tunggu (*Time Delay*)
   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 komplek 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*).

5. 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.

6. 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.

7. Pelumasan (*Lubrication*)

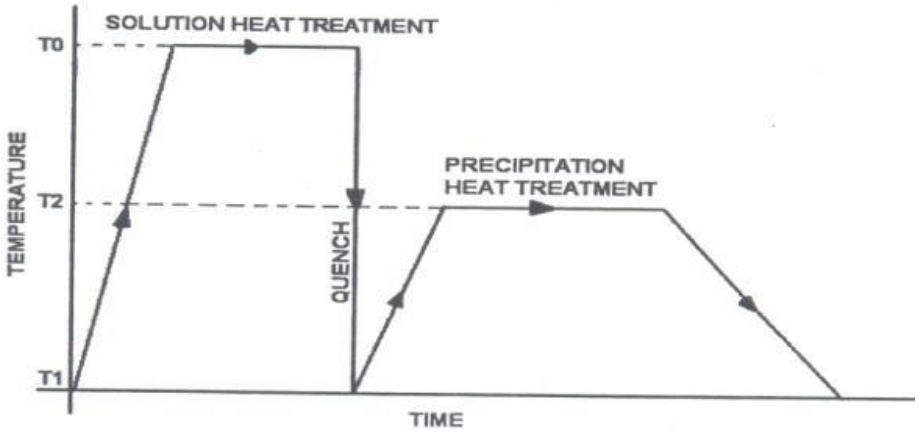
   Proses *squeeze casting* membutuhkan pelumas pada permukaan *dies* untuk memudahkan proses pengambilan produk cor dari cetakannya. Akan tetapi sistem pelumasan ini diusahakan jangan sampai menutupi lubang ventilasi yang ada pada *dies*. Untuk paduan aluminium, magnesium, dan tembaga, permukaan *dies* 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*.

8. 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*. Oleh karena itu perlu ditentukan kecepatan pengisian yang optimal, sehingga aliran pengisian menjadi laminer dan tidak terjadi turbulensi.

2.7. Perlakuan Panas T6

Perlakuan panas T6 adalah proses pemanasan dan pendinginan terhadap logam yang bertujuan untuk mendapatkan kekerasan yang maksimum, proses penuaan dilakukan secara buatan, karena yang diberikan sangat terukur dan konstan, maka proses aging akan semakin cepat dan material logam akan cepat mencapai kekerasan maksimumnya. Paduan yang dapat ditingkatkan sifat mekaniknya dengan cara *heat treatment* adalah alumunium. Karena paduan yang dapat di *heat treatment* adalah terbentuk dari produk tempa (*wrought product*) maupun produk cor (*cast product*), sedangkan untuk paduan yang tidak dapat di *heat treatment* adalah yang hanya mengandalkan efek pengerjaan.



Gambar 2.5. Siklus perlakuan panas.

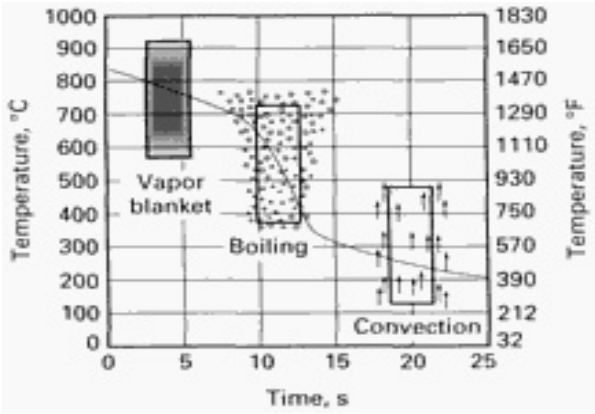
2.7.1. *Solution treatment*

Solution treatment (pemanasan pelarutan) yaitu memanaskan paduan pada temperatur tinggi (diatas *solvus line*) dan diberikan waktu penahanan yang cukup, sehingga mencapai batas kelarutannya atau mencapai fasa tunggal, dimana unsur-unsur pemadu larut secara sempurna kedalam fasa tersebut.

2.7.2. *Quenching*

Quenching (pendinginan cepat) dengan mencelupkan ke dalam air atau media pendingin lainnya yang dilakukan pada temperatur rendah untuk memperoleh larutan padat jenuh (**William F. Smith, 1990**) dalam (**Mursalin, dkk, 2009**).

Menurut (**DeGarmo, dkk, 1987**), dalam (**Kusuma & Citro, 2008**) yang dikutip oleh (**Mursalin, dkk, 2009**), *Quenching* atau pendinginan cepat, bertujuan mempertahankan larutan padat yang telah terbentuk, dapat pula dikatakan bahwa proses ini berguna untuk menahan atom-atom yang larut dalam atom pelarut. Jadi ketika paduan didinginkan dari temperatur pelarut dalam keadaan cepat. Proses pembentukan presipitat dalam aluminium terjadi dengan cepat pada temperatur 260-400℃. Walaupun pendinginan cepat akan menciptakan tegangan sisa dan distorsi tetapi ini juga menjadi suatu pertimbangan tersendiri pada setiap proses desain paduan. Pendinginan cepat juga memperbaiki ketahanan terhadap korosi (**Schulz, 2000**) dalam (**Mursalin, dkk, 2009**).



Gambar 2.6. Tiga tahap pendinginan.

In the vapor blanket stage suhu permukaan sangat tinggi sehingga media pendingin diuapkan dan uap tipis terbentuk di sekitar bagian tersebut. Perpindahan panas terjadi melalui radiasi melalui selimut uap, yang karenanya bertindak sebagai lapisan isolasi. Tingkat pendinginan rendah. Durasi waktu dari lapisan selimut uap dapat sangat bervariasi di antara cairan pendinginan yang berbeda dan juga dipengaruhi oleh kondisi permukaan (misalnya, adanya skala oksida) dan seberapa padat benda kerja yang dimuat pada nampan tungku.

The boiling stage dimulai saat suhu permukaan turun ke titik di mana panas radiasi tidak menopang selimut uap yang stabil. Cairan yang dibawa ke dalam kontak dengan permukaan panas langsung mendidih dan gelembung uap meninggalkan permukaan logam dan memberikan perpindahan panas yang efisien. Hal ini memberikan tingkat ekstraksi panas yang tinggi.

The convection stage dimulai saat suhu permukaan turun ke titik didih media pendinginan. Perpindahan panas terjadi dengan kontak langsung antara permukaan dan cairan. Tingkat pendinginan rendah dan dipengaruhi terutama oleh viskositas dan tingkat konveksi.

Tabel 2.3. Faktor H untuk berbagai media pendingin.

Circulatin or agitation	**Grossmann quench severity factor, *H***			
	Brine	**Water**	**Oil and salt**	**Air**
None	2	0.9-1.0	0.25-0.30	0.02
Mild	2-2.2	1.0-1.1	0.30-0.35	…
Moderate	…	1.2-1.3	0.35-0.40	…
Good	…	1.4-1.5	0.4-0.5	…
Strong	…	1.6-2.0	0.5-0.8	…
Violet	5	4	0.8-1.1	…

Sumber : Heat Treating was published in 1991 as Volume 4 of the ASM Handbook.

Berikut adalah media pendingin yang digunakan dalam proses perlakuan panas antara lain :

1) Air

Air adalah media yang paling banyak digunakan untuk *quenching* karena biayanya yang murah dan mudah didapat dan pendinginannya yang cepat. Salah satu kekurangan air adalah tingkat pendinginan yang cepat menyebabkan distorsi dan retakan. Kerugian kedua dari penggunaan air adalah terjadinya perpanjangan. Laju pendinginan media pendingin air lebih lambat dibandingkan media pendingin air garam, dikarenakan massa jenis air lebih rendah dari pada air garam. Air memiliki massa jenis (ρ = 1000 kg/m^3).

2) Oli

Media pendingin oli adalah media pendingin paling lambat jika dibandingkan dengan media pendingin air dan air garam, dikarenakan media pendingin oli memiliki massa jenis yang paling rendah dibandingkan kedua media pendingin tersebut. Oli mempunyai massa jenis (ρ = 951 kg/m^3). Oleh karena itu media pendingin oli tidak menghasilkan baja sekeras yang dihasilkan pada media pendingin air dan air garam. Pendinginan lambat bertujuan agar didapat struktur mikro yang lebih stabil dikarenakan perubahan bentuk butir terjadi secara perlahan, sehingga menghasilkan baja yang lunak dan ulet.

3) Air garam

Air garam yang diterapkan pada pendinginan, mengacu pada larutan yang mengandung berbagai presentase garam natrium atau kalsium klorida. Tingkat pendinginan yang dihasilkan oleh media pendingin air garam lebih tinggi dari media pendingin air dan oli, dikarenakan media pendingin air garam mempunyai massa jenis yang lebih tinggi dari kedua media tersebut. Massa jenis air garam adalah (ρ = 1025 kg/m^3). Pendinginan air garam digunakan jika media pendingin air atau minyak tidak memberikan kekerasan yang diinginkan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi laju pendinginan media pendingin :

1) Densitas

Semakin tinggi densitas atau massa jenis suatu media pendingin, maka semakin cepat laju pendinginan media pendingin tersebut.

2) Viskositas

Viskositas adalah sebuah nilai kekentalan yang ada pada sebuah fluida atau zat cair. Semakin tinggi viskositas suatu media pendingin, maka laju pendinginan semakin lambat. Contoh Pengaruh viskositas dan densitas berdasarkan media pendingin : air memiliki viskositas rendah (nilai kekentalan cairan kurang) dan air memiliki densitas yang tinggi sehingga laju pendinginan cepat. Sedangkan oli memiliki viskositas yang tinggi dan mempunyai densitas yang rendah, sehingga laju pendinginan lambat.

3) Koefisien perpindahan panas

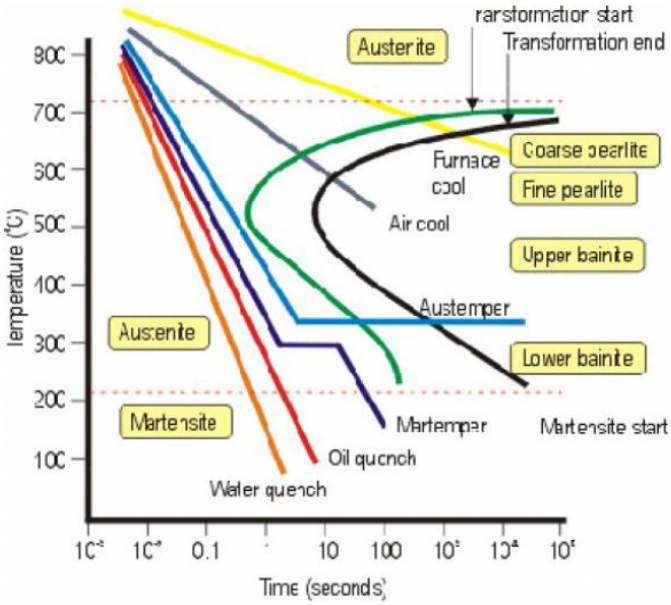
Semakin tinggi koefisien perpindahan panas yang terjadi, maka panas yang mengalir dari benda kerja akan semakin besar pula, sehingga kecepatan pendinginan lebih besar.

4) Temperatur

Semakin rendah temperatur pada media pendingin (udara, air, oli, garam, dll) maka laju pendinginan semakin cepat karena panas pada benda kerja akan lebih cepat mengalir ke temperatur media pendingin yang lebih kecil.

5) Waktu

Semakin cepat laju pendinginan maka waktu yang diperlukan untuk pendinginan semakin sedikit, sedangakan semakin lama laju pendinginan maka waktu yang diperlukan untuk pendinginan semakin banyak.



Gambar 2.8. Perbandingan kecepatan jenis media pending (*quenching*).

2.7.3. *Aging*

Aging (perlakuaan 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)*.

Menurut (**Kusuma & Citro, 2008**) dalam (**Mursalin, dkk, 2009**), pada proses *aging* terjadi proses presipitasi dari atom *solid solution* melalui nukleasi dan pertumbuhan butir dari atom *solute* menjadi *nuclei presipitat.* Pada beberapa material, proses *aging* untuk mencapai kekuatan dan kekerasan maksimum dapat terjadi dalam kurun waktu yang lama.

Pada temperatur terlalu tinggi atau *aging time* terlalu pajang maka partikel halus yang terdispersi dalam jumlah banyak secara beransur-ansur akan menjadi kasar kembali dengan jumlah yang lebih sedikit dan jarak antara pertikel lebih besar, sehingga penguatannya akan menurun (**Demir & Gunduz, 2008**) dalam (**Mursalin, dkk, 2009**), proses tersebut lazim dinamakan *over aged*.

2.8. Pengukuran CMM (*Coordinate Measuring Machine*)

Dalam fisika dan teknik, pengukuran merupakan aktivitas yang membandingkan kuantitas fisik dari objek dan kejadian dunia nyata. Alat ukur adalah alat yang di gunakan untuk mengukur benda atau kejadian tersebut. Seluruh alat pengukur dapat terkena kesalahan yang bervariasi. Bidang ilmu yang mempelajari cara-cara pengukuran dinamakan metrologi.

Fisikawan menggunakan banyak alat untuk melakukan pengukuran mereka. Ini di mulai dari alat yang sederhana seperti penggaris dan stopwatch sampai ke mikroskop elektron dan pemercepat partikel. Instrumen virtual digunakan luas dalam pengembangan alat pengukur modern.

Coordinate measuring machine (mesin pengukur kordinat) adalah sebuah alat pengukur multi fungsi berkecepatan tinggi yang menghasilkan akurasi dan efisiensi pengukuran yang tinggi.

Gambar 2.8. CMM (*Coordinate Measuring Machine*).

Pada prinsipnya CMM kebalikan dari CNC. Pada CNC kordinat yang dimasukkan menghasilkan gerakan pahat pada sumbu X, Y dan Z. Sedangkan pada CMM kontak antara probe dengan benda kerja menghasilkan kordinat. Selain itu jika pada mesin CNC menggunakan bantalan peluru bersirkulasi (*circulated ball bearing*) maka pada mesin CMM menggunakan bantalan udara (*air pad bearing*) sehingga gerakannya sangat halus.

Untuk menjamin keakuratannya konstruksi CMM di buat sangat kaku (rigit). Salah satu caranya dengan menggunakan granit sebagai meja atau bidang acuan.

Menentukan spesifikasi CMM sangat penting untuk menyesuaikan antara benda kerja dengan kemampuan CMM tersebut. Kapasitas dalam CMM adalah ukuran maksimum dari objek atau benda kerja dimana mesin CMM dapat mengakomodasinya. Sebuah CMM harus memiliki kapasitas yang cukup agar sesuai dengan ukuran benda-benda kebutuhan pengguna untuk mengukur.

Pengukuran kecepatan adalah tingkat dimana CMM dapat membaca posisi dan melakukan pengukuran. Ini mungkin merujuk pada kecepatan pencitraan probe, atau untuk proses pengukuran secara keseluruhan, yang juga merupakan fungsi dari jenis kontrol (CNC menjadi lebih cepat dari kontrol manual).

CNC (Computer Numerical Control) atau DCC (Kontrol Komputer Langsung) adalah sistem kontrol yang dibangun di CMM untuk mengontrol gerakan probe. CNC-CMMS paling cocok untuk lingkungan produksi yang membutuhkan volume yang lebih tinggi pengukuran, dan juga dalam aplikasi yang memerlukan pengukuran kompleks dan kecil dengan fitur halus.

CMM terdiri dari beberapa bagian utama yang saling terkait dan mempengaruhi akurasi mesin tersebut, bagian-bagian tersebut adalah :

1. Working Table, merupakan tempat meletakan part yang akan diukur. Rata-rata terbuat dari batu granit.
2. Support, merupakan kaki untuk menopang seluruh beban CMM. Beberapa CMM dilengkapi air damper untuk mengurangi efek getaran yang dihasilkan lingkungan sekitar CMM.
3. Air bearing, CMM menggunakan air bearing sebagai landasan untuk bergerak bagi semua axis.
4. Axis Guideways, adalah track atau lintasan semua axis untuk bergerak, memiliki kontak langsung dengan air bearing. Material rata-rata terbuat dari alumunium ada juga yang menggunakan batu granit, untuk mesin dengan akurasi lebih tinggi menggunakan bahan ceramic.
5. Motor, adalah unit untuk menggerakan axis, khusus untuk mesin otomatis atau hanya motorized menggunakan joystick.
6. Joystick, merupakan control panel untuk memudahkan operator mengoperasikan mesin.
7. Controller, memiliki beragam fungsi diantaranya : interface antara mesin dengan PC, motor driver sebagai sumber daya bagi pergerakan motor, data storage untuk menyimpan file-file correction atau program penggerak CMM, ADC dan DAC, dll.
8. Probe Head, berfungsi sebagi trigger bagi CMM untuk merekam posisi koordinat part yang disentuhnya (touch point). Beberapa CMM dilengkapi non-contact Probe Head untuk mendapatkan touching point yang banyak bisa mencapai ratusan bahkan ribuan point untuk keperluan CAD/CAM. Untuk menyentuh part tidak dapat langsung disentuh ke part tetapi harus melalui perantara stylus yang berfungsi sebagi peraba.
9. Sensor-sensor, CMM memiliki banyak sensor untuk meningkatkan akurasinya sensor tersebut diantaranya : temperature sensor, overcurrent sensor, limit switch, home position sensor, air pressure sensor, reading head.
10. Linear Scale, unit ini sebagai transducer untuk merubah perubahan posisi menjadi arus atau tegangan yang kemudian dengan menggunakan software menjadi data-data koordinat X, Y dan Z.
11. Software, merupakan program penghubung antara user dengan mesin.

- Keunggulan CMM :
  1. Kordinat manapun dari benda kerja dapat ditentukan dengan mudah.
  2. Presisi pengukuran yang tinggi.
  3. Unit pengelolah data dapat mengolah data secara cepat dan langsung bisa dicetak.
  4. Waktu seting pengukuran yang singkat.

- Kekurangan CMM :
  1. Harganya ukup mahal.
  2. Membutuhkan skill khusus untuk bisa mengoprasikannya.

2.9. Pengujian Logam

Pengujian logam adalah proses pengujian bahan-bahan logam untuk mengetahui sifat dan karakteristik logam yang meliputi sifat mekanik, sifat fisik, bentuk struktur, dan komposisi atau unsur-unsur yang terdapat didalamnya. Adapun proses pengujian dikelompokkan menjadi tiga metode pengujian, yaitu :

1. *Destructive Test* (DT), yaitu proses pengujian logam yang dapat menimbulkan kerusakan logam atau specimen yang diuji.
2. *Non Destructive Test* (NDT), yaitu proses pengujian logam yang tidak dapat menimbulkan kerusakan logam atau specimen yang diuji.
3. *Metallography*, yaitu proses pengujian logam tentang komposisi kimianya, unsur-unsur yang terdapat didalamnya, dan bentuk strukturnya.

2.9. 1. Kekerasan *Rockwell B*

Uji kekerasan yang paling banyak dipergunakan di Amerika Serikat adalah uji kekerasan *Rockwell*. Hal ini disebabkan oleh sifat-sifanya yaitu: cepat, bebas dari kesalahan manusia, mampu untuk membedakan perbedaan kekerasan yang kecil pada baja yang diperkeras, dan ukuran kelekukannya kecil, sehingga bagian yang mendapat perlakuan panas yang lengkap, dapat diuji kekerasannya tanpa menimbulkan kerusakan. Pengujian kekerasan dengan metode *Rockwell* ini menggunakan standard *ASTM E 18*-03$^{\in 1}$. Adapun skala kekerasan metode pengujian *Rockwell* ditunjukkan pada tabel berikut ini :

Tabel 2.4. Skala Kekerasan *Rockwell*.

Skala Simbol	**Indentor**	**Total Beban (kgf)**	**Warna Dial**	**Aplikasi Skala**
B	1⁄16-in. (1.588-mm) ball	100	Merah	Paduan tembaga, baja lunak, paduan aluminium, besi tempa, dll.
C	Diamond	150	Hitam	Baja, besi tuang keras, besi tempa peritik, titanium, baja lapisan keras yang dalam, dan bahan lain yang lebih keras dari skala B-100.
A	Diamond	60	Hitam	Carbide cementite, baja tipis, dan baja lapisan keras yang tipis.

D	Diamond	100	Hitam	Baja tipis, baja lapisan keras yang sedang, dan besi tempa peritik.
E	1⁄8-in. (3.175-mm) ball	100	Merah	Besi tuang, paduan alumunium, magnesium, dan logam bantalan.
F	1⁄16-in. (1.588-mm) ball	60	Merah	Paduan tembaga yang dilunakkan dan plat lunak yang tipis.
G	1⁄16-in. (1.588-mm) ball	150	Merah	Besi tempa, paduan tembaga, nikel-seng, dan tembaga-nikel.
H	1⁄8-in. (3.175-mm) ball	60	Merah	Aluminium, seng, timah.
K	1⁄8-in. (3.175-mm) ball	150	Merah	Logam, bantalan, dan bahan lainnya sangat lunak atau tipis
L	1⁄4-in. (6.350-mm) ball	60	Merah	Logam, bantalan, dan bahan lainnya sangat lunak atau tipis
M	1⁄4-in. (6.350-mm) ball	100	Merah	Logam, bantalan, dan bahan lainnya sangat lunak atau tipis
P	1⁄4-in. (6.350-mm) ball	150	Merah	Logam, bantalan, dan bahan lainnya sangat lunak atau tipis
R	1⁄2-in. (12.70-mm) ball	60	Merah	Logam, bantalan, dan bahan lainnya sangat lunak atau tipis
S	1⁄2-in. (12.70-mm) ball	100	Merah	Logam, bantalan, dan bahan lainnya sangat lunak atau tipis
V	1⁄2-in. (12.70-mm) ball	150	Merah	Logam, bantalan, dan bahan lainnya sangat lunak atau tipis

Sumber : ASTM Internasional E 18-03$^{\epsilon 1}$An American National Standard 2004

Berikut adalah skala yang paling umum digunakan dalam pengujian *Rockwell* adalah :

1. HRA digunakan untuk material yang sangat keras beban uji 60 kgf.
2. HRB digunakan untuk material yang sangat lunak dan indentornya berupa bola baja dengan diameter 1/16 inchi dan beban uji 100 kgf.

3. HRC digunakan untuk material dengan kekerasan sedang dan indentornya berupa intan kerucut dengan sudut 120° dan beban uji sebesar 150 kgf.

Dalam pengujian *Rockwell* terdapat dua macam indentor yaitu :
1. Kerucut intan dengan besar sudut 120° dan disebut sebagai *Rockwell Cone.*
2. Bola baja dengan berbagai ukuran disebut sebagai *Rockwell Ball.*

Berdasarkan besar beban minor dan major, dalam proses pengujian kekerasan metode *Rockwell* dibedakan dalam dua kelompok, yaitu :
1. *Rockwell*
   Beban minor: 10kg
   Beban major: 60, 100, 150kg
2. *Rockwell superficial*
   Beban minor: 3kg
   Beban major: 15, 30, 45kg

2.9. 2. Struktur Mikro XRD

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi material kristalit maupun nonkristalit, sebagai contoh identifikasi struktur kristalit (kualitatif) dan fasa (kuantitatif) dalam suatu bahan dengan memanfaatkan radiasi gelombang elektromagnetik sinar-X. Tahapan kerja XRD terdiri dari empat tahap, yaitu preparasi, difraksi, deteksi dan interpretasi. Untuk dapat melakukan fungsinya, XRD dilengkapi dengan komponen-komponen penting seperti tabung sinar-X, *monochromator*, dan detektor.

Sinar-X terjadi apabila suatu berkas elektron bebas berenergi kinetik tinggi menumbuk logam yang merupakan sumber sinar dengan daya tembus yang besar. Kemudian elektron-elektron inilah dalam tumbukannya dengan anoda menimbulkan pancaran sinar-X, sehingga puncak-puncak akan muncul atau terlihat dari suatu bahan yang ditembakkan. Dengan adanya puncak-puncak yang terbentuk dapat diketahui indeks bidang dari bahan yang digunakan.

XRD merupakan suatu teknik pengujian yang digunakan untuk menentukan unsur dan senyawa kimia, struktur kristal, parameter kisi, volume, kisi dan lain-lain.

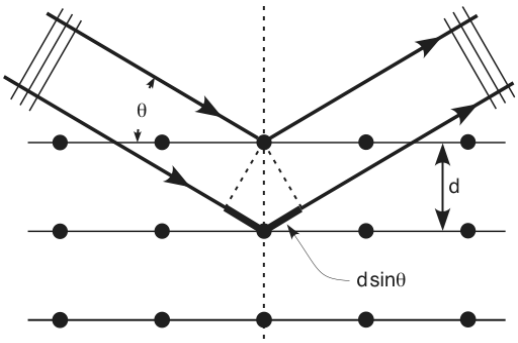
Metode difraksi sinar-X

Seberkas Sinar-X dipantulkan dari sehimpunan bidang kristal yang berjarak antara d berkas sinar yang dipantulkan dari bidang yang kedua menempuh jarak $2d \sin \theta$ lebih panjang dari pada berkas yang dipantulkan dari bidang pertama, dengan adalah sudut datang yang diukur terhadap permukaan kristal.

Sinar-sinar pantul yang sefase berbeda lintasan sebesar kelipatan bulat dari panjang gelombang akan menimbulkan interferensi saling menguatkan. Pemantulan dan interferensi bergabung menjadi difraksi. Difraksi akan saling menguatkan jika terpenuhi persamaan Bragg sebagai berikut

$$2d \sin \theta = n\lambda \qquad (1)$$

Hasil tersebut dikenal dengan sebagai hukum Bragg bagi difraksi Sinar-X. Dengan d merupakan jarak antara bidang (hkl) untuk sebuah kristal, θ adalah sudut Bragg, λ adalah panjang gelombang radiasi, dan bilangan bulat n = 1, 2, 3, dan seterusnya.

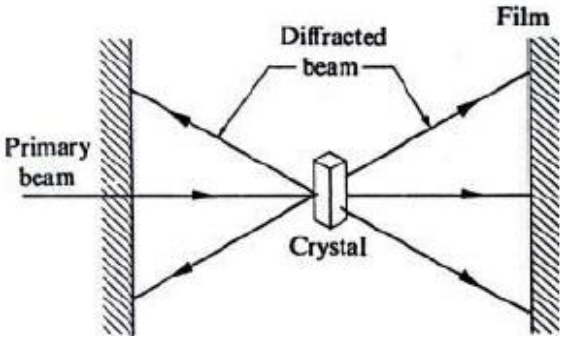


Gambar 2.10. Hamburan sinar-X pada kristal.

Berdasarkan penetapan salah satu dari parameter tersebut metode difraksi dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu: 1) Metode Laue, 2) Metode kristal berputar, 3) Metode serbuk.

1. Metode Laue

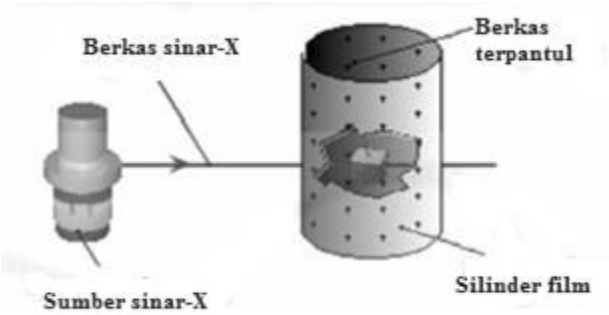
Metode difraksi ini tidak menggunakan sinar monokromatik dan spektrumnya juga tidak menggunakan karakteristik melainkan menggunakan yang kontinu dari logam targetnya. Eksperimen metode Laue menggunakan sinar-X polikromatis dengan arah tetap. Metode Laue dapat digunakan untuk menentukan orientasi bidang kristal tunggal.



Gambar 2.11. Metode laue.

2. Metode kristal berputar

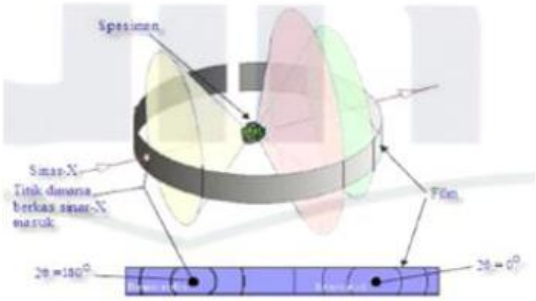
Pada umumnya metode ini digunakan untuk menganalisa struktur kristal tunggal. Metode ini menggunakan sinar-X monokromatis dengan sudut datang divariasi. Proses metode kristal berputar ini terjadi ketika kristal dari sampel uji disinari oleh sinar-X dan sinar-X tersebut mengelilingi kristal sehingga pada orientasi tertentu akan dihasilkan berkas difraksi.



Gambar 2.12. Metode rotasi kristal.

3. Metode serbuk

Dalam metode serbuk ini kristal yang akan diamati dalam bentuk serbukan dengan setiap butir serbuk berlaku sebagai kristal berukuran kecil, dengan orientasi acak dan diputar tidak melalui satu sumbu saja. Alternatif lain adalah menggunakan difraktometer sebagai pengganti kamera dan hasil difraksi direkam dalam *chart recorder*.

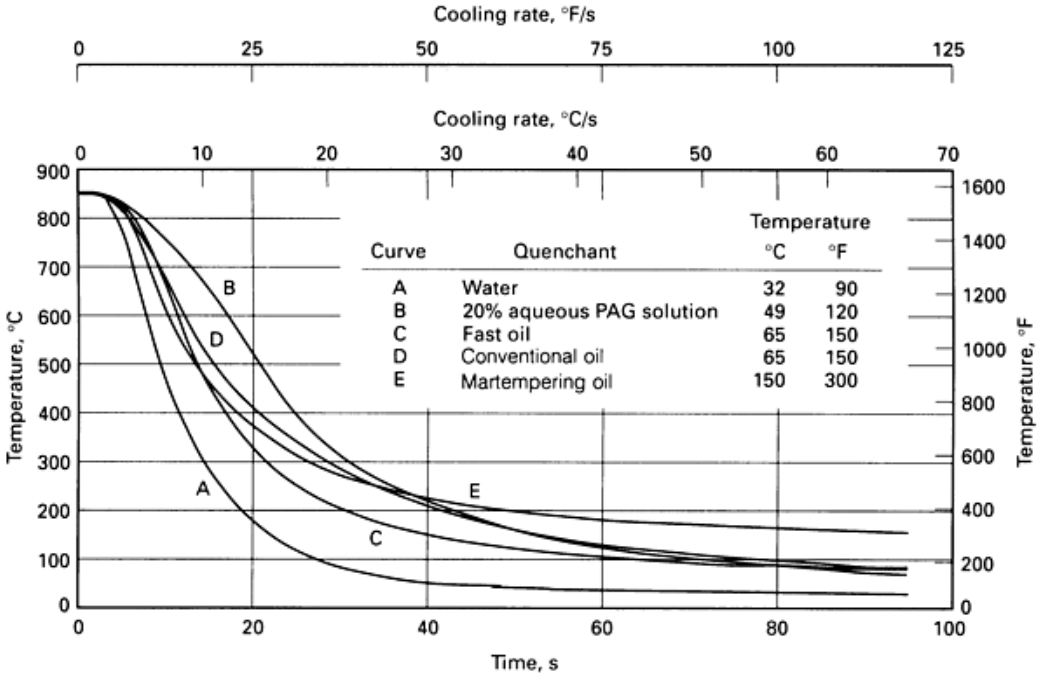


Gambar 2.13. Metode serbuk**.**

2.10. Pengaruh Jenis Media Pendingin terhadap Perubahan Bentuk, Dimensi, Distribusi Kekerasan dan Struktur Mikro

Pengaruh jenis pendingin yang digunakan memiliki dampak yang sangat signifikan pada tingkat pendinginan (lihat Gambar 2.15.). Kurva ini diperoleh dengan probe diameter 25,4mm (1,0 inci) yang didinginkan ke dalam air, larutan polialkilen glikol

20%, minyak cepat, minyak konvensional, dan minyak martemper pada temperatur 32, 49, 65, 65, dan 150℃ (90, 120, 150, 150, dan 300°F). Kurva pendinginan dengan berbagai bentuk diperoleh pada masing-masing larutan dengan menggunakan ukuran probe dan kecepatan pendingin yang sama.



Gambar 2.14. Pengaruh dari jenis pendingin terpilih pada kurva pendinginan dari batang baja diameter 25,4mm (1,0 inci). Semua pendingin mengalir pada 0.50 m/s (100ft/menit).

Media pendingin air dan 20% polietilen glikol (PEG) komposit SiCp/2009 dengan dimensi spesimen (200mmx100mmx2mm) bahwa media pendingin (air) spesimen mengalami perubahan bentuk (distorsi) yang serius karena timbulnya tegangan termal dan media pendingin (PEG) spesimen masih kelihatan datar (**He Tianbing, dkk, 2016**).

Menurut (**Nuraini Elin, dkk, 1996**) dengan media pendingin yang berbeda, maka akan didapat laju pendinginan yang berlainan yang menghasilkan perubahan struktur mikro dan kekerasan. Perlakuan panas yang diteruskan dengan pendinginan dalam pasir memberikan nilai kekerasan paling rendah (57,5 kg/mm^2), sedangkan pendinginan dengan udara dan air nilainya lebih tinggi, masing-masing 58,7 kg/mm^2

dan 59 kg/mm^2. Hal ini dapat dijelaskan bahwa semakin lambat laju pendinginan (dalam pasir), maka pertumbuhan butir lebih besar dari pada pembentukan nukleus. Oleh karena itu ukuran butir menjadi lebih besar, sebaliknya kekerasannya rendah.

Ukuran butir yang diperoleh dengan pendinginan udara dan air makin halus. Dengan media air, dimana pendinginan berlangsung sangat cepat, maka kesempatan pertumbuhan butir terhambat sehingga ukuran butir lebih halus dibandingkan dengan media udara dan pasir.

Pengamatan struktur mikro terhadap AlMg2 yang didinginkan dalam udara, pasir maupun air tidak memberikan perbedaan yang berarti, dimana hanya nampak adanya butir-butir yang memanjang searah pengerolan. Tetapi jika dilihat ukuran butirnya, maka pengaruh media pendingin sudah nampak walaupun kecil. Berturut-turut ukuran butir yang diperoleh dengan media pendingin air, udara
dan pasir adalah 26,8 μm, 27,0 μm dan 27,3 μm.

2.11. Pengaruh Temperatur Media Pendingin terhadap Perubahan Bentuk, Dimensi, Distribusi Kekerasan dan Struktur Mikro

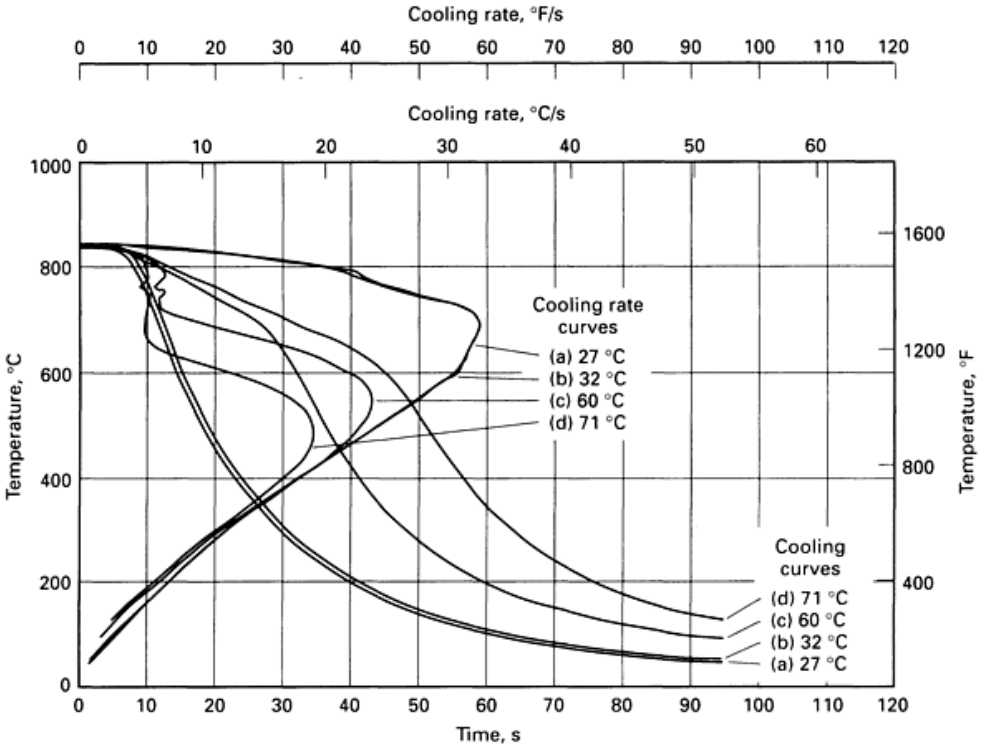
Pengaruh temperatur pendingin air pada kurva pendinginan dan kurva laju pendinginan yang dihasilkan bila diameter batang 38mm (1,5 in). Didinginkan dalam air pada temperatur 27, 32, 60 dan 71℃ (80, 90, 140, dan 160℉) yang mengalir dengan kecepatan 0,25 m/s (50ft/menit) ditunjukkan pada Gambar 2.16. Semua probe yang diinstruksikan diberi austenitisasi pada suhu 845℃ (1550℉). Dan dipadamkan ke dalam air yang mengalir pada kecepatan 0,25 m/s (50ft/menit). Beberapa karakteristik kondisi ini adalah disajikan pada Tabel 2.5. Air pada suhu 60℃ (140℉) menghasilkan laju pendinginan pada suhu 705℃ (1300℉) sebesar 9,3℃/s (16,8℉/s) dengan suhu rendaman air bawah 27℃ (80℉), laju pendinginan pada 705℃ (1300℉) (yang biasa digunakan sebagai indikator kemampuan pendinginan untuk mengekstrak panas) adalah 32,6℃/s (58,6℉/s), sekitar 3,5 kali lebih tinggi dari pada air pada 60℃ (140℉).

Tabel 2.5. Pengaruh temperatur pendingin pada tingkat pendinginan dan kekerasan yang diprediksi pada diameter 38,1mm (1,5 inci) batang baja paduan 4130 rendah yang dipadamkan dalam air (kecepatan 0,25 m/s, atau 50ft/menit) dari 845℃ (1550℉).

Tingkat Temperatur Pendingin		**Tingkat Pendinginan Pada**						**Koefisien Film**	
		705℃ (1300℉)		**345℃ (650℉)**		**205℃ (400℉)**			
℃	℉	**℃/s**	**℉/s**	**℃/s**	**℉/s**	**℃/s**	**℉/s**	**W/m2 · K**	**Btu/ft2 · h · ℉**

27	80	32.6	58.6	14.6	26.2	7.3	13.2	9382.9	1652.5
32	90	32.3	58.1	14.6	26.3	7.2	13.0	9024.6	1589.4
38	100	31.0	55.8	14.3	25.8	7.0	12.5	7645.4	1346.5
49	120	24.3	43.7	14.4	25.9	6.8	12.2	3504	617.1
60	140	9.3	16.8	14.3	25.7	6.3	11.3	754.0	132.8
71	160	5.6	10.1	13.7	24.6	5.9	10.6	417	73.5
82	180	4.7	8.5	13.5	24.2	5.4	9.7	341	60.1
93	200	3.5	6.3	13.2	23.7	5.1	9.1	241	42.5

Sumber : Heat Treating was published in 1991 as Volume 4 of the ASM Handbook.



Gambar 2.15. Kurva pendinginan dan kurva laju pendinginan yang dihasilkan pada temperatur pendingin 27, 32, 60, dan 71℃ (80, 90, 140, dan 160°F) air yang mengalir pada 15 m/menit (50ft/menit) melewati batang diameter 38mm (1,5 in).

Media pendingin air dengan variasi temperatur (20℃, 70℃, 100℃) tingkat pendinginan yang lebih rendah mengurangi tegangan sisa sehingga perubahan bentuk (distorsi) juga terjadi pengurangan (**Zhang Yu-xun, dkk, 2016**).