

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Dari penelitian oleh **Listiawati (2012)** yang meneliti tentang pengaruh temperatur sintering terhadap distribusi kekerasan dan porositas powder metallurgy pada bushing duralumin, dimana dengan variasi temperatur sintering 450°C, 470°C, 490°C, 510°C, dan 530°C diperoleh nilai distribusi kekerasan sebesar 54VHN, 56VHN, 65VHN, 66VHN, dan 68VHN. Serta nilai porositas 9%, 7%, 6%, 6%, dan 5%. Seiring dengan meningkatnya temperatur sintering diperoleh nilai distribusi kekerasan yang meningkat sedangkan prosentase nilai porositasnya semakin turun.

Rusianto (2009) meneliti bahwa alumunium serbuk untuk pembuatan *bushing* kompaksi tekanan yang dibutuhkan adalah 5400 Kg. Variasi suhu *pressing* T (suhu ruang) 100 °C, 200 °C, 300 °C pemanasan dan pengepresan menggunakan alat cetakan *hot pressing powder metallurgy*. Hasil penelitian menunjukkan presentase rata-rata porositas mengalami penurunan dengan meningkatnya temperatur kompaksi, dan berat jenis *bushing* mengalami kenaikan dengan meningkatnya suhu *hot pressing*. Pada pengujian kekerasan diketahui bahwa kekerasan *bushing* meningkat dan laju keausan menurun dengan semakin meningkatnya suhu *hot pressing*.

Fitria dan Waziz (2004) meneliti serbuk paduan Al-9% Si hasil pengikiran. Pembuatan spesimen dengan variasi tekanan kompaksi 300, 400 dan 500 MPa dan variasi suhu sinter 450, 500 dan 550°C selama 2 jam dalam lingkungan gas argon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan meningkatnya tekanan kompaksi dan suhu sinter akan meningkatkan kekerasan dan densitas dari spesimen.

2.2 Powder Metallurgy

Powder Metallurgy adalah suatu teknik pembuatan benda atau barang yang mempunyai bentuk-bentuk tertentu dari bubuk metal atau logam, baik yang ferrous maupun yang non-ferrous melalui proses penekanan. Proses ini dapat disertai pemanasan, akan tetapi suhu pemanasan harus masih berada dibawah suhu titik cair dari bubuknya. Pemanasan selama proses penekanan atau sesudah penekanan yang dikenal dengan istilah "*sinter*", akan menghasilkan peningkatan nilai pengikat antar partikel-partikel halus, hal ini sekaligus dapat meningkatkan kekuatan dan sifat-sifat fisis lainnya. Hasil atau produk dari teknik metalurgi serbuk, dapat terdiri dari produk

campuran serbuk berbagai logam atau dapat pula terdiri dari campuran bahan bukan logam, untuk meningkatkan ikatan partikel dan mutu benda kerja secara keseluruhan. Sebagai contoh; diperlukan kobal atau jenis logam lainnya untuk mengikat partikel tungsten (wolfram), sedangkan grafit ditambahkan pada serbuk logam bantalan (*bearing*), untuk meningkatkan kualitas bantalannya.

Ada beberapa alasan mengapa teknologi *powder metallurgy* dapat begitu berkembang, sama berkembangnya dibandingkan dengan teknologi pengecoran konvensional atau produk permesinan lainnya. Alasan-alasannya adalah:

- a. Dapat membentuk campuran metal/logam yang lebih intim/kompak
- b. Bisa didapat dari hasil tambang (hasil ekstraksi)
- c. Dapat dihasilkan logam paduan yang baik, meskipun titik lebur dari masing-masing logam berlainan
- d. Dapat digunakan dalam memproduksi benda kerja secara massal
- e. Mudah mendapatkan campuran/paduan logam dengan sifat-sifat tertentu,

2.2.1 Keuntungan dan Kekurangan

Produksi logam dengan proses metalurgi serbuk mempunyai beberapa keuntungan dan keterbatasan. Keuntungan yang dapat diperoleh dari proses metalurgi serbuk adalah (Amstead, B.H., dkk, 1995):

1. Proses metalurgi serbuk dapat menghasilkan produk bimetal yang terdiri dari lapisan serbuk yang berbeda.
2. Dapat menghasilkan produk dengan porositas yang terkendali.
3. Dapat menghasilkan produk yang kecil dengan toleransi ketat dan permukaan halus dalam jumlah banyak
4. Serbuk yang murni akan menghasilkan produk yang murni pula.
5. Tidak ada bahan yang terbuang selama proses produksi.
6. Upah buruh lebih murah karena tidak diperlukan tenaga dengan keahlian khusus untuk menjalankan mesin pres dan mesin-mesin lainnya.

Sedangkan keterbatasan dari proses metalurgi serbuk adalah :

1. Harga serbuk logam sangat mahal dan terkadang sulit dalam penyimpanannya karena mudah terkontaminasi.
2. Beberapa jenis produk tidak dapat dibuat secara ekonomis karena keterbatasan kapasitas mesin pres.

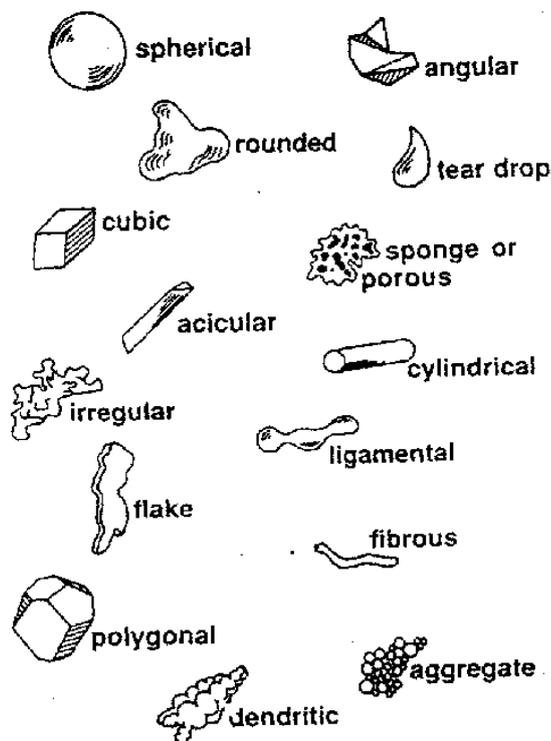
3. Bentuk yang sulit atau rumit tidak dapat dibuat karena selama proses penekanan (pemampatan) serbuk logam tidak mampu mengalir mengisi ruang cetakan.
4. Pada serbuk logam yang mempunyai titik cair rendah seperti timah hitam dan seng kemungkinan timbul kesulitan dalam proses penyinteran.
5. Dengan proses metalurgi serbuk sulit mendapatkan kepadatan yang merata.

2.2.2 Karakteristik Serbuk Logam

Serbuk logam dalam metalurgi serbuk perlu diketahui karakternya untuk menentukan perlakuan dan sifat-sifatnya. Hal ini dapat diketahui dari:

1. Bentuk partikel (*particle shape*)

Proses metalurgi serbuk sangat terpengaruh pada bentuk serbuk disebabkan proses dan alat yang digunakan berbeda. Akibat dari metode yang berbeda, bentuk partikel serbuk (gambar 2.1) juga berbeda ada yang membulat (*spherical*), serpih (*flake*), kotak (*cubic*), berpori (*sponge*), dendritik (*dendritic*), atau bahkan tidak teratur (*irregular*). Untuk menentukan bentuk serbuk dapat dilakukan pengamatan dengan *Zoom Stereo Microscope*.



Gambar 2.1. Bentuk serbuk serbuk logam

Sumber : German, R. M., 1984

2. Ukuran Partikel (*particle size*)

Ukuran serbuk menentukan tingkat kehalusan serbuk. Hal ini dapat ditentukan dengan pengayakan standar berukuran 36-850 μm (Amstead, B.H.,dkk, 1993) atau menggunakan cara pengukuran mikroskopis partikel serbuk standar dengan ukuran 0,1-1000 μm (Kalpakjian, 1989).

3. Mampu alir (*flowability*)

Mampu alir adalah kemampuan sebuah partikel serbuk untuk mengisi ruang cetakan. Hal ini akan berpengaruh terhadap densitas.

4. Sifat kimia (*chemical properties*)

Sifat kimia partikel serbuk, akan berpengaruh terhadap perlakuan dan sifat bahan jadi.

5. Kompresibilitas (*compressibility*)

Kompresibilitas merupakan kemampuan sebuah partikel untuk dikompaksi (ditekan). Harga ini diukur dengan membandingkan volume sebelum kompaksi dengan volume setelah kompaksi.

6. Kemampuan sinter (*sinterability*)

Kemampuan sinter merupakan kemampuan antar partikel serbuk untuk saling melekat dengan proses pemanasan di bawah titik cair bahannya.

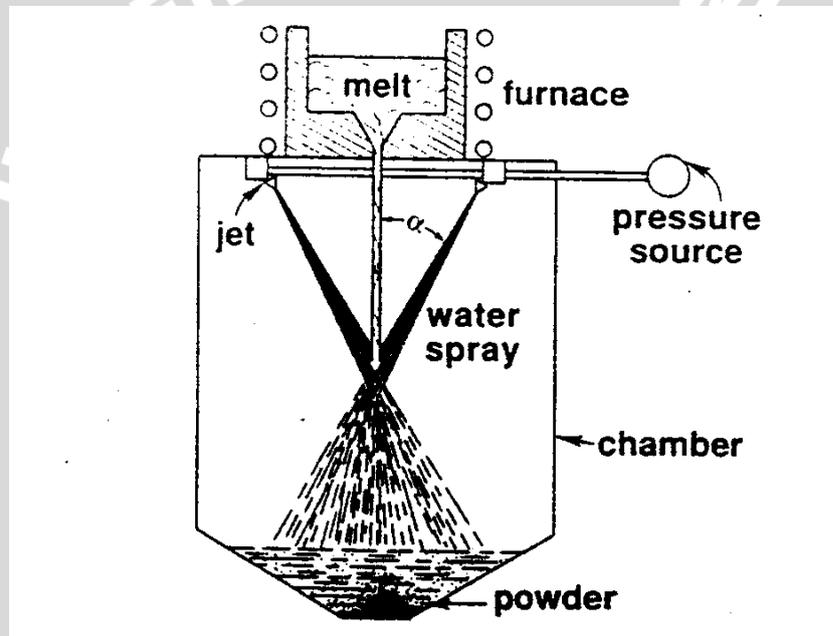
2.3 Pembuatan Serbuk

Proses pembuatan serbuk bisa dilakukan melalui tiga macam cara yaitu : secara fisik, secara kimiawi, dan secara mekanik. Pembuatan serbuk secara fisik dapat diibaratkan sebagai proses atomisasi yaitu proses perusakan arus logam cair yang disemprot dengan bahan pendingin yang dalam hal ini dapat berupa cairan atau gas sehingga logam cair berubah menjadi tetesan padat yang berbentuk butiran. Sedangkan pembuatan serbuk dengan cara kimia melibatkan banyak reaksi dekomposisi kimia terhadap senyawa logam ini juga termasuk reaksi reduksi didalamnya. Pembuatan serbuk secara mekanik secara umum dapat dilakukan pada logam – logam yang bersifat getas sehingga mudah dihancurkan dengan diberikan gaya tekan dan dijadikan serbuk.

1. Metode Fisik

Pembuatan serbuk dengan metode fisik yang paling banyak digunakan adalah proses atomisasi yang prinsipnya adalah mengalirkan logam cair melalui celah nozzle. Kemudian aliran logam cair disemprotkan dengan tekanan udara atau air sehingga membeku menjadi serbuk. Dalam proses ini harus diperhatikan lubang alat,

temperatur proses dan tekanan penyemprotan karena hal ini berhubungan erat dengan sifat dari serbuk. Ukuran serbuk hasil atomisasi mempunyai variasi yang luas tergantung dari kondisi proses yang digunakan. Peningkatan tekanan gas atau air akan menghasilkan serbuk yang lebih halus. Pembuatan serbuk dengan metode ini biasanya digunakan untuk logam Cu, Al, Zn, Pb, dan logam lain yang mempunyai temperatur lebur rendah. Atomisasi air adalah teknik yang paling umum untuk memproduksi serbuk dari logam yang mempunyai titik lebur dibawah 1600 °C. Air yang bertekanan tinggi disemprotkan secara langsung pada lelehan logam, sehingga memaksa disintegrasi dari lelehan logam tersebut dan terjadi pemadatan dengan cepat. Proses dan mekanisme atomisasi dengan tekanan air ditunjukkan pada gambar 2.2

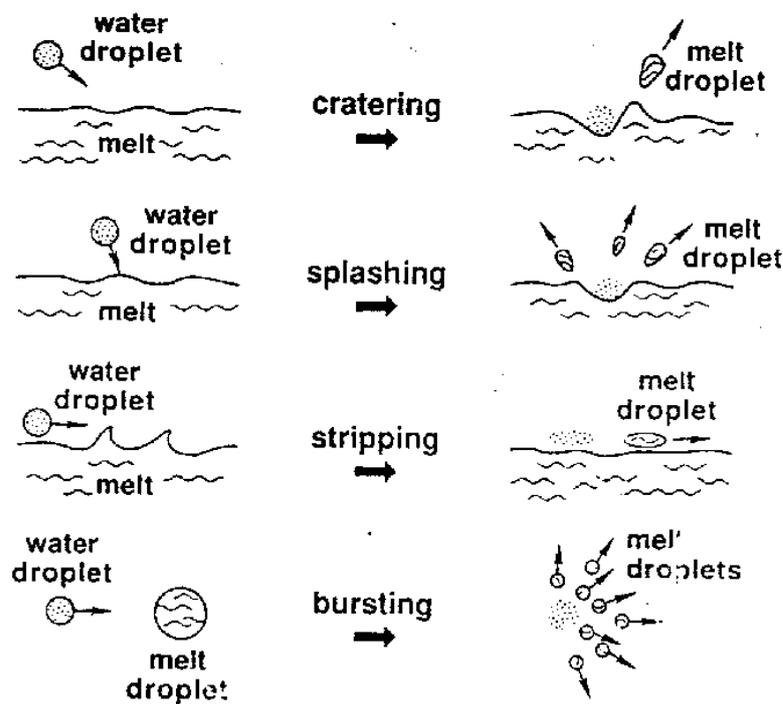


Gambar. 2.2. Proses atomisasi air
Sumber : Kalpakjian, 1989

Proses atomisasi air terjadi ketika logam cair dari nosel bertabrakan dengan air yang disemprotkan dari sprayer, seperti diperlihatkan pada gambar. 2.2, adapun proses pembentukan serbuk yang mungkin terjadi dalam proses atomisasi adalah cratering, splashing, stripping dan bursting, seperti terlihat pada gambar 2.3.

- a) Cratering adalah proses terjadinya tumbukan antara logam cair dengan satu butir air dari sprayer sehingga terbentuk satu melt droplet (butiran logam cair)

- Splashing* adalah proses terjadinya tumbukan antara logam cair dengan satu butir air dari *sprayer* dan terbentuk lebih dari satu *melt droplet* (butiran logam cair).
- Stripping* adalah proses terjadinya tumbukan antara logam cair dengan butiran air dari *sprayer* dimana aliran butiran air tersebut searah dengan aliran logam cair, sehingga terbentuklah *melt droplet* (butiran logam cair)
- Bursting* adalah proses terjadinya tumbukan butiran air dengan *melt droplet* hasil dari proses *cratering*, *splashing* atau *stripping*



Gambar 2.3. Mekanisme pembentukan serbuk atau partikel yang terjadi dalam atomisasi air

Sumber : German, R. M., 1984

Ukuran dan bentuk partikel tergantung dari temperatur logam, kecepatan rata-rata aliran logam, ukuran nosel dari *tundish* (tempat menampung dan mengalirkan logam cair), dan karakteristik semprotan air. Aliran logam yang pelan namun konstan kemungkinan akan menghasilkan bentuk yang lebih halus, sedangkan ukuran *nozzel tundish* berkaitan erat dengan kecepatan aliran logam cair.

Dalam tahap penyelesaian serbuk hasil atomisasi air akan mengalami pengayakan, pemanasan, dan penyimpanan. Pengayakan diperlukan untuk memisahkan serbuk kasar dan serbuk halus atau untuk mendapatkan serbuk dengan ukuran tertentu. Untuk mengantisipasi terjadinya oksidasi maka dilakukan

pemanasan secepat mungkin sehingga kandungan air pada serbuk kecil. Apabila serbuk belum akan dibentuk, lebih baik disimpan dalam temperatur kamar dan tidak terlalu banyak berhubungan dengan udara luar agar kondisinya tetap stabil.

2. Metode Kimia

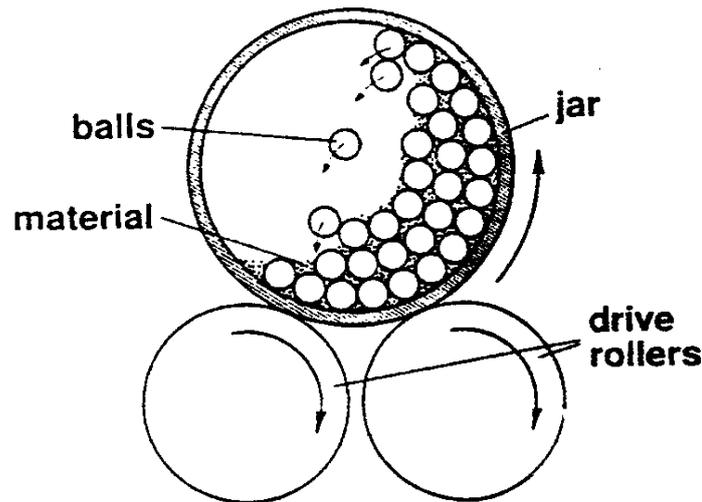
Prinsip dari metode kimia adalah proses dekomposisi kimia suatu senyawa logam. Reaksi reduksi dan oksidasi logam dengan hidrogen atau karbon monoksida sebagai pereduksi merupakan reaksi dekomposisi yang menghasilkan serbuk logam, menurut reaksi :



Reaksi (1) biasanya dipakai untuk menghasilkan serbuk Cu dan reaksi (2) digunakan untuk menghasilkan serbuk Fe. Beberapa metode kimia yang digunakan dalam pembuatan serbuk adalah metode elektrolisa, reduksi oksidasi. Produksi serbuk dengan metode elektrolisa ini seperti pada proses *refining* dari tembaga, pada katoda menggunakan unsur Pb (timah hitam) sedangkan anodanya menggunakan unsur Cu (tembaga), serbuk tembaga yang diperoleh kemudian dicuci dan disaring.

3. Metode Mekanik

Metode ini biasanya digunakan untuk menghasilkan serbuk logam dari logam yang bersifat rapuh dan kekerasannya sedang, pada proses pembuatan serbuk secara mekanik menggunakan suatu alat yang dinamakan *ball mill* atau *roll mill* untuk menghancurkan material menjadi serbuk. Secara garis besar proses pembuatan serbuk logam dengan cara ini adalah dengan memasukkan logam yang akan dijadikan serbuk kedalam suatu silinder berongga yang berputar dan didalamnya terdapat bola-bola baja. Bola baja yang ada didalam silinder akan bertumbukan dengan material secara terus menerus sehingga logam atau material yang dimasukkan akan hancur, seperti terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Pembuatan serbuk dengan *ball mill*
 Sumber : German, R. M., 1984

2.4 Proses Pencampuran Serbuk

Mixing atau pencampuran merupakan suatu proses mencampur serbuk logam dengan bahan-bahan yang lain (pengikat dan pelumas) untuk mendapatkan nominal yang sama atau seragam. Sifat mekanis dari material yang terbuat dari proses metalurgi serbuk sangat sensitif terhadap distribusi partikel dalam suatu bakalan sehingga proses pencampuran merupakan salah satu proses yang penting dalam metalurgi serbuk.

Pencampuran serbuk dapat dilakukan dengan mencampurkan logam yang berbeda dan material-material lain untuk memberikan sifat fisik dan mekanik yang lebih baik. Pencampuran dapat dilakukan dengan proses kering (*dry mixing*) dan proses basah (*wet mixing*). Cara pencampuran basah (*wet mixing*) adalah cara yang lebih banyak dipakai yaitu dengan menggunakan pelarut organik untuk mengurangi pengaruh atmosfer yang menyebabkan peristiwa oksida. Pelumas (*lubricant*) mungkin ditambahkan untuk meningkatkan sifat *powders flow*. Binders ditambahkan untuk meningkatkan *green strength*nya seperti wax atau polimer termoplastik.

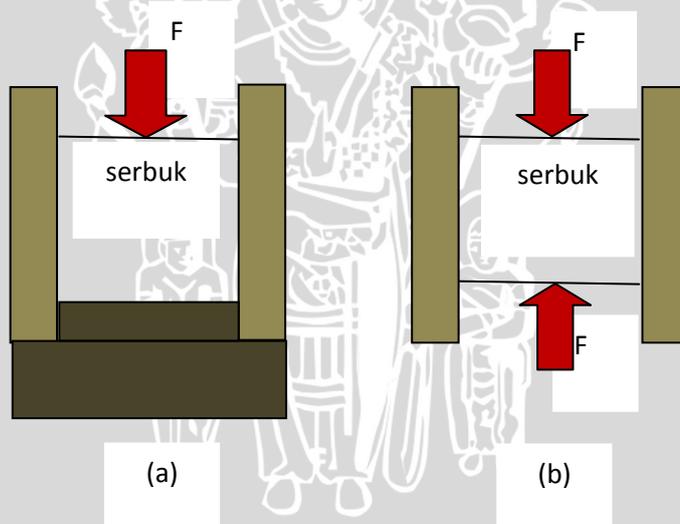
2.5 Compacting

Compacting (kompaksi) merupakan proses pemberian suatu gaya luar berupa tekanan untuk mendeformasi serbuk menjadi benda yang mempunyai bentuk dan ukuran sesuai dengan yang diinginkan yang mempunyai densitas yang lebih tinggi. Proses kompaksi akan mengakibatkan pengaturan partikel, deformasi partikel, terbentuknya ikatan antar partikel.

Terdapat beberapa metode penekanan, diantaranya, penekanan dingin (*cold compacting*) dan penekanan panas (*hot compacting*). *Cold compacting* yaitu memadatkan serbuk pada temperatur ruang dengan 100-900 Mpa untuk menghasilkan *green body*. Proses *cold pressing* terdapat beberapa macam antara lain:

1. *Die Pressing*, yaitu penekanan yang dilakukan pada cetakan yang berisi serbuk.
2. *Cold isotactic pressing*, yaitu penekanan pada serbuk pada temperatur kamar yang memiliki tekanan yang sama dari setiap arah.
3. *Rolling*, yaitu penekanan pada serbuk metal dengan memakai *rolling mill*.

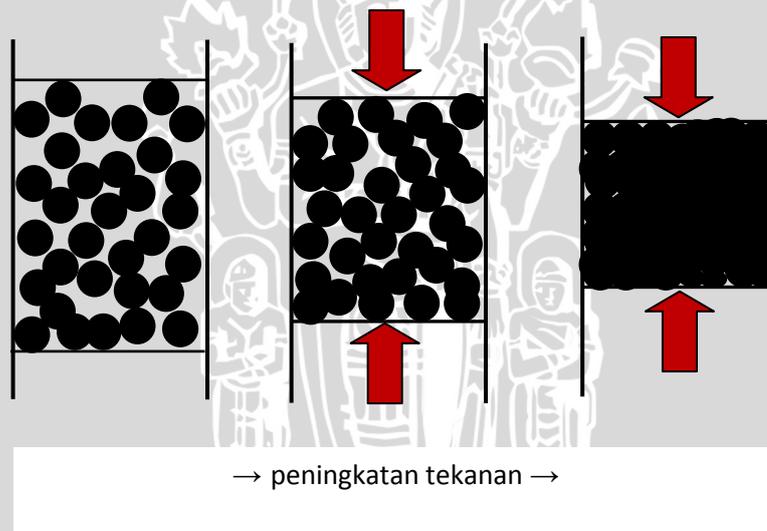
Sedangkan pada proses *hot pressing* merupakan suatu proses kompaksi yang dilakukan pada temperatur yang relatif tinggi. Pada penekanan satu arah penekan (punch) bagian atas bergerak ke bawah, sedangkan pada penekanan dua arah menggunakan dua buah penekan, yaitu penekan atas dan penekan bawah bergerak secara bersamaan dengan arah yang berlawanan, seperti terlihat pada gambar 2.5. Penekanan dengan dua arah memiliki keunggulan berupa hasil densitas bakalan yang seragam.



Gambar 2.5 penekanan satu arah(a) dan penekanan dua arah(b)

Penekanan terhadap serbuk dilakukan agar serbuk dapat menempel satu dengan lainnya sebelum ditingkatkan ikatannya dengan proses *sintering*. Dalam proses kompaksi (penekanan) ini serbuk akan mengalami proses pengaturan partikel, deformasi plastis, dan *mechanical interlocking* (saling mengunci). Ketika diberikan pemberian tekanan awal, respon pertama yang terjadi pada proses kompaksi adalah pengaturan (*rearrangement*). Dalam proses ini tidak terjadi proses deformasi partikel namun hanya penyesuaian letak dari serbuk. Dalam proses pengaturan terjadi pergerakan partikel karena terjadi penekanan yang rendah oleh partikel yang

mempunyai densitas yang lebih besar hingga tercapai koordinasi yang terpadat. Pada saat pemberian tekanan yang tinggi maka akan terjadi peningkatan densitas yang disebabkan oleh perbesaran kontak antar partikel sehingga akan terjadi deformasi plastis pada partikel tersebut. Beban yang diberikan juga menyebabkan tekanan terlokalisasi pada kontak antar partikel sehingga terjadi *strain hardening*. Adanya kontak antar partikel akan menghasilkan zona antar partikel yang terlihat berbentuk flat. Selama proses deformasi, akan terjadi las dingin(*cold welding*) pada antarpartikel yang akan menghasilkan peningkatan kekuatan dalam proses kompaksi. Ikatan las dingin merupakan ikatan antara dua permukaan butiran logam yang bersih yang ditimbulkan oleh gaya kohesi tanpa adanya peleburan atau pengaruh panas. Ketika pemberian beban lebih tinggi lagi maka besar deformasi plastis juga semakin meningkat dan efek dari *strain hardening* pada setiap partikel meningkat sehingga menyebabkan jumlah porositas menurun. Pada gambar 2.6 berikut terlihat fenomena serbuk ketika peningkatan tekanan kompaksi.



Gambar 2.6 fenomena serbuk ketika peningkatan tekanan kompaksi

Secara singkat penyebab ikatan bahan serbuk tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Interbacking, yaitu terjadi ikatan akibat kekerasan permukaan serbuk.
2. Adhesi – kohesi, yaitu suatu interaksi akibat adanya ikatan logam dan ikatan vander walls pada butiran serbuk.

Ikatan logam terjadi antar unsur logam dengan unsur logam, sedangkan ikatan vander walls terjadi akibat adanya fluktuasi dipole pada atom dan butir-butir serbuk. Dan besarnya gaya vander walls ini dipengaruhi oleh bentuk butir serbuk akibat proses kompaksi.

Bentuk benda yang dikeluarkan dari pressing disebut bahan kompak mentah, telah menyerupai produk akhir, akan tetapi kekuatannya masih rendah. Kekuatan akhir bahan diperoleh setelah proses sintering.

Tabel 2.1. Tekanan kompaksi pada berbagai macam serbuk logam

Metal	Pressure (MPa)
Aluminium	70-275
Brass	400-700
Bronze	200-275
Iron	350-800
Tantalum	70-140
Tungsten	70-140
Other materials	
Aluminium oxide	110-140
Carbon	140-165
Cemented carbides	140-400
Ferrites	110-165

Sumber : Anwar, 2007

Proses compacting biasanya dilakukan dengan sistem pneumatic atau hidroulik, dan pada penelitian ini digunakan sistem hidroulik. Sehingga dapat mengetahui besar gaya yang diberikan pada proses compacting dengan rumus 2.1 dibawah ini :

$$F = p \times A \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan : F = gaya (kgf)

p = nilai pada pressure gauge (kgf.cm⁻²)

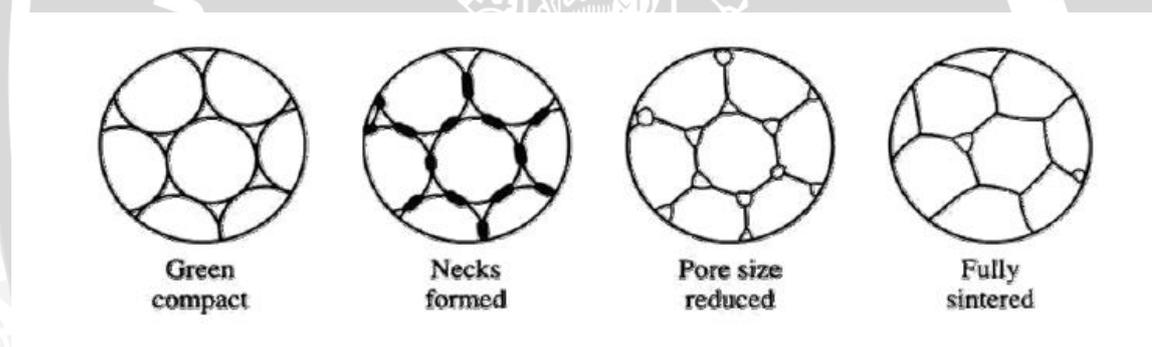
A = luas penampang piston (cm²)

2.6 Sintering

Sintering adalah salah satu tahapan metodologi yang sangat penting dalam ilmu bahan, terutama untuk bahan keramik. *Sintering* merupakan proses pemanasan di bawah titik lebur sehingga terjadi suatu proses pengikatan partikel. Selama sintering terdapat dua fenomena utama yaitu: pertama adalah penyusutan (*shrinkage*) yaitu proses eliminasi porositas dan yang kedua adalah pertumbuhan butiran. Fenomena yang pertama dominan selama pemadatan belum mencapai kejenuhan, sedang kedua akan dominan setelah pemadatan mencapai kejenuhan. Parameter sintering diantaranya

adalah: temperatur, waktu penahanan, kecepatan pendinginan, kecepatan pemanasan dan atmosfer.

Pada proses *sinter*, benda padat terjadi karena terbentuk ikatan-ikatan. Panas menyebabkan bersatunya partikel dan efektivitas reaksi tegangan permukaan meningkat. Dengan perkataan lain, proses *sinter* menyebabkan bersatunya partikel sedemikian rupa sehingga kepadatan bertambah. Selama proses ini terbentuklah batas-batas butir, yang merupakan tahap rekristalisasi dapat dilihat pada gambar 2.7. Disamping itu gas yang ada menguap. Temperatur sinter umumnya berada pada 0.7-0.9 dari temperatur cair serbuk utama. Waktu pemanasan berbeda untuk jenis logam berlainan dan tidak diperoleh manfaat tambahan dengan diperpanjangnya waktu pemanasan. Lingkungan sangat berpengaruh karena bahan mentah terdiri dari partikel kecil yang mempunyai daerah permukaan yang luas. Oleh karena itu lingkungan harus terdiri dari gas reduksi atau nitrogen untuk mencegah terbentuknya lapisan oksida pada permukaan selama proses sinter.



Gambar 2.7 Proses *Sintering*
 Sumber : Murjito, 2009

Penyusutan (*shrinkage*) selalu terjadi selama proses sintering, rumusnya dapat dilihat pada (2.2) dan (2.3) sebagai berikut:

$$\text{Vol_shrinkage} = \frac{V_{\text{sintered}}}{V_{\text{green}}} = \frac{\rho_{\text{green}}}{\rho_{\text{sintered}}} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\text{Linier_shrinkage} = \left(\frac{\rho_{\text{green}}}{\rho_{\text{sintered}}} \right)^{1/3} \dots\dots\dots(2.3)$$

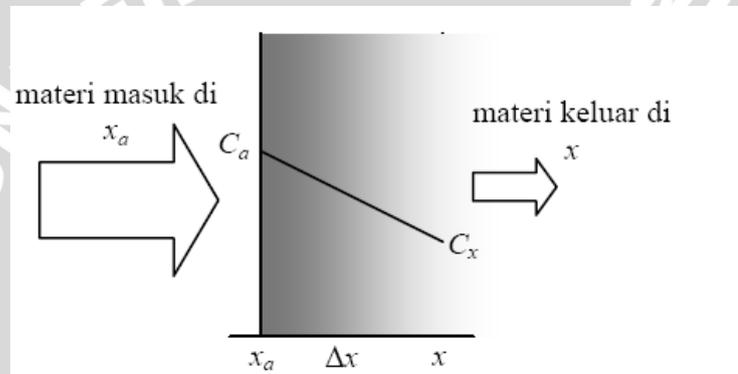
Dari segi cairan, sintering dapat menjadi dua yaitu : sintering fasa padat dan sintering fasa cair. Sintering dengan fasa padat adalah sintering yang dilaksanakan pada suatu temperatur yang telah ditentukan, dimana dalam bahan semuanya tetap dalam fasa padat. Proses penghilangan porositas dilakukan melalui transport massa. Jika dua partikel



digabung dan dipanaskan pada suhu tertentu, dua partikel ini akan berikatan bersama-sama dan akan membentuk neck. Pertumbuhan disebabkan oleh transport yang meliputi evaporasi, kondensasi, difusi.

Pada proses sintering akan terjadi proses difusi, hal ini dikarena adanya perbedaan temperatur. Laju difusi sendiri dapat kita ketahui dengan cara seperti dibawah ini

Pada Kondisi Mantap. Kita bayangkan suatu peristiwa difusi dalam keadaan mantap yang terjadi pada satu lapis material. Materi yang terdifusi menyebar dari konsentrasi yang tinggi ke arah konsentrasi yang lebih rendah, seperti diperlihatkan oleh gambar 2.8. Konsentrasi materi yang terdifusi bervariasi secara linier sebesar C_0 di x_0 menjadi C_x di x . Secara thermo dinamis, faktor pendorong untuk terjadinya difusi, yaitu penyebaran materi, adalah adanya perbedaan konsentrasi.



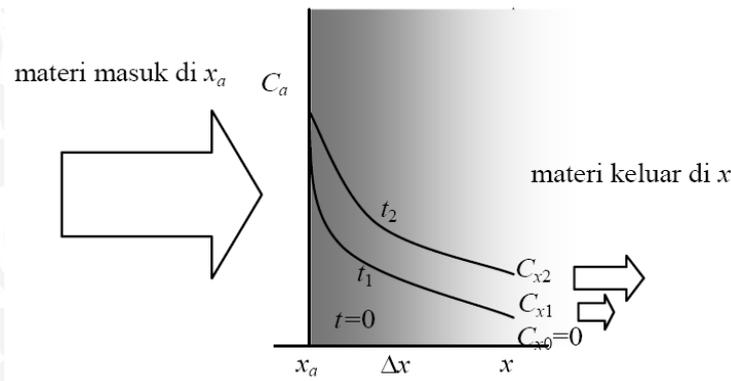
Gambar 2.8 Difusi dalam keadaan mantap
 Sumber :Sudaryatno S & Ning Utari, Mengenal Sifat-Sifat Material (1)

fluksi materi yang berdifusi dapat kita tuliskan sebagai berikut:

$$J_x = -D \frac{dC}{dx} \dots\dots\dots(2.4)$$

D adalah koefisien difusi, dC/dx adalah variasi konsentrasi dalam keadaan mantap di mana C_0 dan C_x bernilai konstan. Relasi (2.4) ini disebut Hukum Fick Pertama yang secara formal menyatakan bahwa fluksi dari materi yang berdifusi sebanding dengan gradien konsentrasi.

Kondisi Transien. Peristiwa yang lebih umum terjadi adalah peristiwa transien, di mana konsentrasi berubah terhadap waktu; C_x merupakan fungsi waktu yang juga berarti bahwa fluksi materi juga merupakan fungsi waktu. Keadaan transien ini digambarkan pada gambar 2.9. Pada $t = 0$ konsentrasi di x adalah $C_{x0} = 0$; pada $t = t_1$ difusi telah terjadi dan konsentrasi di x meningkat menjadi C_{x1} ; pada $t = t_2$ konsentrasi di x meningkat lagi menjadi C_{x2} , dan seterusnya.



Gambar 2.9 difusi dalam keadaan transien
 Sumber :Sudaryatno S & Ning Utari, Mengenal Sifat-Sifat Material (1)

Perubahan konsentrasi adalah selisih antara fluksi yang masuk di x_a dan fluksi yang keluar di x , $J_{x_a} - J_x$. Selisih yang terjadi setiap saat ini merupakan laju perubahan konsentrasi, C_x . Sementara itu fluksi yang keluar di x adalah

$$J_x = J_{x_a} + \frac{\partial J}{\partial x} \Delta x \text{ oleh karena itu maka}$$

$$\frac{dC_x}{dt} = - \frac{\partial J}{\partial x} \Delta x = \frac{d}{dx} \left[\frac{dC_x}{dt} \right] \quad (2.5)$$

Relasi (2.5) ini disebut *Hukum Fick Ke-dua*. Jika D tidak tergantung pada konsentrasi maka (2.5) dapat ditulis seperti pada (2.6)

$$\frac{dC_x}{dt} = D \frac{d^2 C_x}{dx^2} \quad (2.6)$$

Hukum Fick Kedua menyatakan bahwa laju perubahan komposisi sebanding dengan turunan kedua (*Laplacian*) konsentrasi.

2.7 Duralumin

Duralumin merupakan paduan antara alumunium dan tembaga. *Duralumin* memiliki sifat ringan, keuletan yang tinggi, dan juga sifat tahan korosi. Paduan ini dinamakan *duralumin* dikarenakan memiliki sifat *durability* yang tinggi yaitu kemampuan suatu material untuk menerima beban kejut sehingga mampu memperpanjang usia produk akibat *fatigue*. Untuk proses penempa, *duralumin* tidak boleh memiliki presentase tembaga lebih dar 5,6 % karena akan membentuk senyawa $CuAl_2$ dalam logam yang menjadikan logam rapuh (Heine, 1990: 293).

Paduan ini memiliki kekuatan tarik yang maksimum (sampai 400 MPa) setelah dilakukan perlakuan panas. Fungsi Cu sendiri untuk menaikkan kekuatan dan kekerasan, namun menurunkan elongasi (pertambahan panjang saat ditarik). Kandungan Cu dalam alumunium yang paling optimal adalah antara 4-6%. Duralumin ini ditemukan oleh A.Wilm dalam usahanya mengembangkan paduan Al yang kuat. Duralumin adalah paduan praktis yang sangat terkenal disebut paduan alumunium dengan nomor 2017, mengandung 4%Cu, 0,5%Mg, 0,5%Mn pada komposisi standard (Brady & Clauser, 1979)

Sebagai contoh, badan pesawat terbang, yang terbuat dari alloy Al-Cu (duralumin), memiliki bentuk lurus untuk mengurangi ketahanan udara. Logamnya juga harus lunak agar bisa dibentuk seperti yang diinginkan (maka Al digunakan sebagai dasar campuran karena sifatnya yang lunak), namun bentuknya akan berubah jika sifat logamnya lunak. Jadi di tambahkan Cu (dan sejumlah kecil Mg dan Zn). Pada table 2.2 dibawah ini dapat dilihat beberapa komposisi dari aluminium seri 2xxx

Tabel 2.2 Komposisi Aluminium Seri 2xxx

Designation	Si,%	Cu,%	Mn,%	Mg,%	Ni,%	Ti,%	Others,%
2014	0.5-1.2	3.9-5.0	0.4-1.2	0.2-0.8	-	0.15 max	-
2017	0.2-0.8	3.5-4.5	0.4-1.0	0.4-0.8	-	0.15 max	-
2024	0.5 max	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	-	0.15 max	-
2218	0.9 max	3.5-4.5	-	1.2-1.8	1.7-2.3	-	-

Sumber : Avner, 1974

2.7.1 Aluminium

Aluminium berasal dari biji aluminium yang disebut bauksit untuk mendapatkan aluminium murni dilakukan proses pemurnian pada bauksit yang menghasilkan oksida aluminium atau alumina. Kemudian alumina ini dielektrosa sehingga berubah menjadi oksigen dan aluminium.

Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah pada urutan yang kedua setelah besi dan baja, yang tertinggi diantara non fero (Surdia, 2000:129). Aluminium merupakan logam ringan, mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik serta sifat-sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Dengan ditambahnya paduan seperti Cu, Si, Mn, Mg, Zn, dan lainnya maka diperoleh kekuatan mekanik yang meningkat dan memberikan sifat-sifat baik lainnya seperti ketahanan korosi, kekerasan, ketahanan aus dan sebagainya.

2.7.2 Pengaruh Unsur Paduan

Unsur-unsur paduan aluminium antara lain:

❖ *Cooper* (Cu)

Tembaga adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Cu dengan berat atom 63,55 sma dan jari-jari atom 1,275 Å. Lambangnya berasal dari bahasa latin *Cuprum* merupakan konduktor panas dan listrik yang baik. Selain itu unsur ini memiliki korosi yang lambat sekali. Tembaga juga bersifat paramagnetik. Penambahan Cu akan memperbaiki sifat mampu mesin aluminium paduan. Selain itu dengan atau tanpa paduan lainnya akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan, namun *castability* rendah.

❖ Silikon (Si)

Silikon adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Si dengan berat atom 28,0855 sma dan jari-jari atom 1,46 Å yang merupakan unsur terbanyak kedua di bumi.

❖ Magnesium (Mg)

Magnesium adalah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki simbol Mg dengan berat atom 24,31 sma dan jari-jari atom 1,610 Å. Magnesium adalah elemen kedelapan yang membentuk 2 % berat kulit bumi, serta merupakan unsur terlarut ketiga terbanyak pada air laut. Logam alkali tanah ini terutama digunakan sebagai zat campuran (*alloy*) untuk membuat campuran aluminium-magnesium yang sering disebut magnalium atau magnelium. Magnesium juga bersifat paramagnetic. Penambahan unsur magnesium digunakan untuk meningkatkan daya tahan aluminium dan meningkatkan sifat mampu mesin aluminium tanpa menurunkan keuletannya.

❖ *Ferrous* (Fe)

Ferrous adalah sebuah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki simbol Fe dengan berat atom 55,482 sma dan jari-jari atom 1,421 Å. Fe merupakan logam transisi dan bersifat ferromagnetik. Penambahan Fe dimaksudkan untuk mengurangi penyusutan, tetapi apabila kandungan Fe terlalu besar akan menyebabkan struktur butiran yang kasar. Hal ini dapat diperbaiki dengan menambahkan sejumlah Mn dan C dalam presentase kecil.

❖ Mangan (Mn)

Mangan adalah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Mn dengan berat atom 54,938 sma dan jari-jari atom 1,35 Å. Penambahan Mn akan

meningkatkan ketahanan karat aluminium dan apabila dipadu dengan Mg akan memperbaiki kekuatannya.

❖ *Zinc (Zn)*

Seng (*Zinc*) adalah unsur kimia dengan simbol kimia Zn, nomor atom 30, dengan berat atom 65,39 sma dan jari-jari atom 1,390 Å. Umumnya ditambahkan dengan tembaga dalam presentase yang kecil. Dengan penambahan ini akan meningkatkan sifat-sifat mekanis tanpa perlakuan panas serta memperbaiki sifat mampu mesin.

2.7.3 Sifat Umum dari Berbagai Jenis Paduan Al

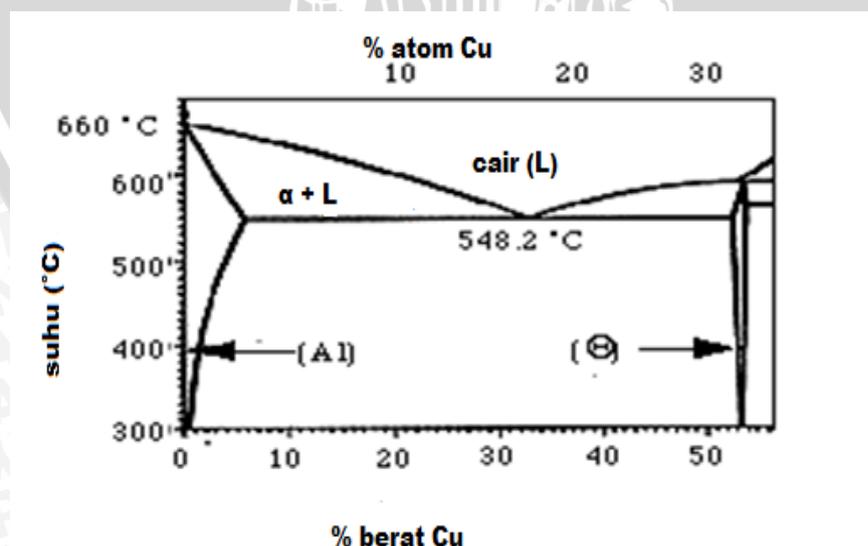
Berikut ini sifat-sifat umum dari berbagai jenis paduan aluminium yaitu:

- Jenis Aluminium Murni (seri 1xxx)

Jenis ini mengandung Al 99,9 %. Aluminium dalam seri ini memiliki sifat yang baik dan ketahanan karat, konduktivitas listrik, mampu las, dan mampu potong. Jenis aluminium ini kurang menguntungkan dari kekuatan yang rendah.

- Jenis Paduan Al-Cu (seri 2xxx)

Jenis paduan Al-Cu adalah jenis yang dapat diberikan perlakuan panas dengan melalui penguatan endapan. Sifat mekanik paduan ini dapat menyamai sifat dari baja lunak tetapi daya tahan korosinya lebih rendah bila dibandingkan dengan jenis paduan lainnya (Heine, 1990: 294). Berikut diagram fase Al-Cu yang dapat dilihat pada gambar 2.10.

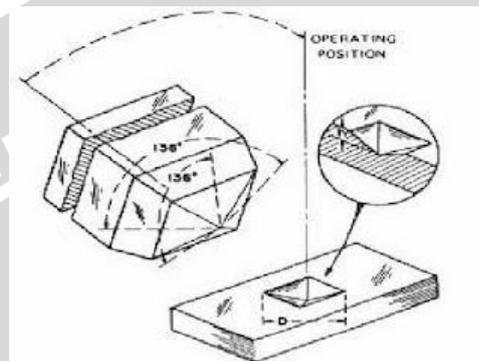


Gambar 2.10 Diagram fase Al-Cu

Sumber : Callister, 1997

2.8 Kekerasan

Kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan beban penetrasi yang disebabkan oleh penusukan oleh benda tekan yang berbentuk tertentu karena pengaruh gaya tertentu. Kekerasan suatu material harus diketahui khususnya untuk material yang dalam penggunaannya akan mengalami gesekan. Pengujian kekerasan sangat berguna sekali untuk mengetahui kualitas suatu bahan yang akan dipergunakan pada produk – produk logam seperti komponen mesin. Pengujian distribusi kekerasan pada penelitian ini menggunakan metode pengujian Vickers.



Gambar 2.11. Skematis Prinsip Indetasi dengan Metode Vickers
Sumber: Suherman, 1987

Pengujian Kekerasan Vickers

Prinsip dasar pengujian ini sama dengan pengujian brinell, hanya saja di sini digunakan indenter intan yang berbentuk pyramid beratas bujur sangkar dan sudut puncak antara dua sisi berhadapan 136° seperti terlihat pada gambar 2.11. Tekannya tentu akan berbentuk bujur sangkar, dan yang diukur adalah panjang kedua diagonalnya lalu diambil rata-ratanya. Angka kekerasan Vickers dihitung sesuai dengan rumus 2.7:

$$HV = 1.8544 \frac{F}{d^2} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana:

HV = angka kekerasan Vickers (kg/mm^2)

F = beban yang diberikan (kg)

d = diagonal identasi (mm^2)

Kekerasan suatu material logam dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya :

1. Unsur paduan

Unsur paduan akan mempengaruhi sifat mekanik suatu logam. Penambahan unsur paduan ini bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik yang dimiliki oleh logam tersebut. Misalnya, untuk meningkatkan sifat mekanik dari aluminium dapat ditambahkan unsur tembaga. Aluminium memiliki kekuatan dan kekerasan yang tidak terlalu tinggi, jika ditambahkan unsur tembaga sebagai paduannya maka dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatannya. Hal ini dikarenakan tembaga bisa memperhalus struktur butir dan akan mempunyai kualitas pengerjaan mesin yang baik, mampu tempa, keuletan yang baik dan mudah dibentuk.

2. Perlakuan panas

Pengaruh perlakuan akan mempengaruhi kekerasan logam tergantung dari perlakuan apa yang diberikan. *Annealing* akan menurunkan kekerasan logam. *Hardening* akan meningkatkan kekerasan logam. *Tempering* akan menurunkan kekerasan logam dibawah perlakuan panas *Hardening*. *Normalising* akan meningkatkan kekerasan logam dibandingkan keadaan awal logam tanpa perlakuan panas.

3. Bentuk dan dimensi butir

Material dengan ukuran butir kecil akan memiliki kekerasan yang tinggi dibandingkan material dengan ukuran butir besar, hal ini dikarenakan semakin kecil ukuran butir maka semakin besar pula luas bidang kontak antar butir sehingga dapat meningkatkan kekerasannya. Begitu juga dengan material butir halus akan memiliki kekerasan tinggi, dibandingkan dengan material dengan butir kasar.

Sedangkan untuk kekerasan produk hasil teknologi *powder metallurgy*, dipengaruhi oleh:

1. Tekanan

Tekanan memiliki pengaruh terhadap nilai kekerasan dari produk hasil *powder metallurgy*. Dengan semakin besarnya tekanan yang diberikan pada saat proses *compacting*, maka ikatan antar butir serbuk akan semakin kuat, sehingga menyebabkan kerapatan yang tinggi. Dengan semakin rapatnya ikatan antar butir inilah menyebabkan kekerasan dari produk *powder metallurgy* semakin meningkat.

2. Luas bidang kontak antar butir

Luas bidang kontak antar butir berpengaruh terhadap mekanisme ikatan antar butir. Semakin besar luas bidang kontak, maka mekanisme ikatan yang terjadi akan

semakin besar sehingga menyebabkan peningkatan kekerasan pada produk hasil *powder metallurgy*.

3. Porositas

Nilai porositas berpengaruh terhadap kekerasan produk hasil *powder metallurgy*. Nilai porositas berhubungan dengan kerapatan ikatan antar butir. Jika kerapatannya tinggi maka nilai porositasnya rendah sehingga kekerasannya meningkat, begitu juga sebaliknya.

2.9 Porositas

Porositas adalah presentase formasi yang terisi oleh ruang berpori. Keporian tergantung pada tingkatan *sintering*. Pada produk-produk tertentu keadaan berporian harus diamati, karena keporian sangat berhubungan erat dengan sifat-sifat dari produk yang dibuat, misalnya: kekuatan, perbandingan berat, daya pengisapan dan daya penahan arus listrik dan panas semuanya tergantung pada keporian suatu produk.

Untuk mencari prosentase porositas kita dapat menggunakan perbandingan 2 buah densitas, yaitu :

1. *true density* adalah kepadatan dari suatu benda padat tanpa porositas yang terdapat didalamnya. Didefinisikan sebagai perbandingan massanya terhadap volume sebenarnya.
2. *Apparent density* adalah berat setiap unit volume material termasuk cacat void yang terdapat dalam material uji (gr/cm^3)

Pengukuran densitas menggunakan metode piknometri yaitu sebuah proses membandingkan densitas relatif suatu peralatan. Jika densitas dari cairan diketahui maka densitas dari padatan dapat dihitung. Untuk memperoleh nilai *true density*, dapat dicari dengan menggunakan persamaan yang ada standart ASTM E252-84, yaitu pada rumus 2.8

$$\rho_{th} = \frac{100}{\left\{ \left(\frac{\%Al}{\rho_{Al}} \right) + \left(\frac{\%Cu}{\rho_{Cu}} \right) + \left(\frac{\%Fe}{\rho_{Fe}} \right) + etc \right\}} \quad (2.8)$$

Dimana : ρ_{th} = *true density* ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)

$\rho_{Al}, \rho_{Cu}, \rho_{Fe}, etc$ = densitas unsur ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)

%Al, %Cu, %Fe, etc = prosentase berat unsur

Sedangkan untuk perhitungan apparent density menggunakan persamaan sesuai standart ASTM B311-93 sebagaimana rumus 2.9 dibawah ini :

$$\rho_s = \rho_w \frac{w_s}{w_s - (w_{sb} - w_b)} \quad (2.9)$$

Dimana : $\rho_s = \text{apparent density} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$

$$\rho_w = \text{densitas air} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$w_s = \text{berat sampel diudara}(\text{gr})$$

$$w_{sb} = \text{berat sampel dan keranjang di dalam air}(\text{gr})$$

$$w_b = \text{berat keranjang didalam air}(\text{gr})$$

Perhitungan prosentase porositas yang terjadi dapat diketahui dengan membandingkan densitas sampel atau apparent density dengan densitas teoritis(true density), yaitu dapat dilihat pada rumus 2.10 :

$$\%P = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}} \right) \times 100\% \quad (2.10)$$

Dimana : $\%P = \text{prosentase porositas} (\%)$

$$\rho_s = \text{apparent density} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\rho_{th} = \text{true density} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

2.10 Bushing

Bushing atau yang lebih dikenal bantalan merupakan elemen atau bagian dari peralatan mesin yang dirancang agar dapat mengurangi gesekan dan dapat menahan beban yang diterimanya, khususnya beban yang bergerak seperti poros sehingga putaran atau gerak bolak – baliknya dapat berlangsung secara halus dan aman. *Bushing* ini termasuk kedalam jenis bantalan luncur (*sliding bearing*). Pada gambar 2.12 di bawah ini menunjukkan bentuk sebuah *bushing* (bantalan poros).



Gambar 2.12 *Bushing*
Sumber: Martin, 2009: 207

Bushing harus memiliki sifat mekanik yang baik agar poros dan elemen mesin yang lain dapat bekerja secara maksimal. Dalam memilih bahan pembuat *bushing* banyak yang perlu diperhatikan, seperti:

1. Dapat menahan beban tanpa mengalami patah atau perubahan bentuk dan tahan terhadap temperatur tinggi.
2. Tahan gesekan dan tahan aus.
3. Tahan terhadap korosi.
4. Dapat menghantar panas.
6. Koefisien muai kecil.
7. Sifat dapat dikerjakan (mampu tempa) yang baik.

Pemakaian *bushing* ini, antara lain *bushing* pada poros engkol, *bushing* pada mesin perkakas, *bushing* pada roda kereta api, *bushing* untuk penggunaan umum, dan masih banyak lagi sesuai dengan yang dibutuhkan.

2.11 Hipotesa

Dengan menggunakan proses *hot compacting* maka kekerasannya suatu spesimen akan semakin tinggi dibanding dengan menggunakan proses *cold compacting*, sehingga akan menyebabkan porositas dari suatu spesimen tersebut menjadi semakin rendah.