

## BAB II

### STUDI LITERATUR

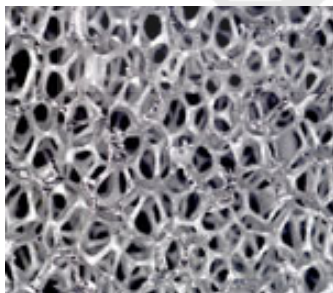
#### II.1 LOGAM BUSA

##### II.1.1 Definisi Logam Busa

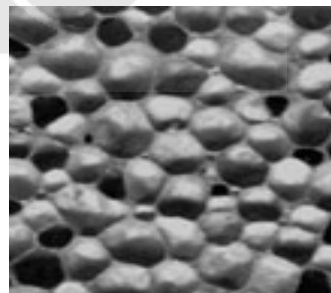
Logam busa atau yang dikenal dengan istilah *Metal Foam* merupakan suatu *Advance Material* yang memiliki struktur berongga pada material logam yang solid dengan volume fraksi pori sebesar 75%-95%<sup>[1]</sup>. Logam busa disebut juga dengan Cellular Material yang didefinisikan sebagai suatu “ruang” dalam material yang dibagi dalam cell-cell tertentu yang memiliki batas-batas antar cell yang terbentuk dari logam padat dan memiliki interior yang berongga.

##### II.1.2 Klasifikasi Logam Busa

Dilihat dari struktur porinya, logam busa ini memiliki dua jenis yaitu *Closed-Cell Foam* dan *Open-Cell Foam*. *Closed-Cell Foam* adalah Cellular Material yang tiap cell-nya tertutup dengan lebar tiap cell-nya 3 mm. Sedangkan *Open-Cell Foam* adalah cellular material yang tiap cell-nya terhubung dengan lebar cell-cell-nya sekitar 5 mm. Jenis-jenis dari logam busa dapat diilustrasikan pada gambar dibawah:



(a)

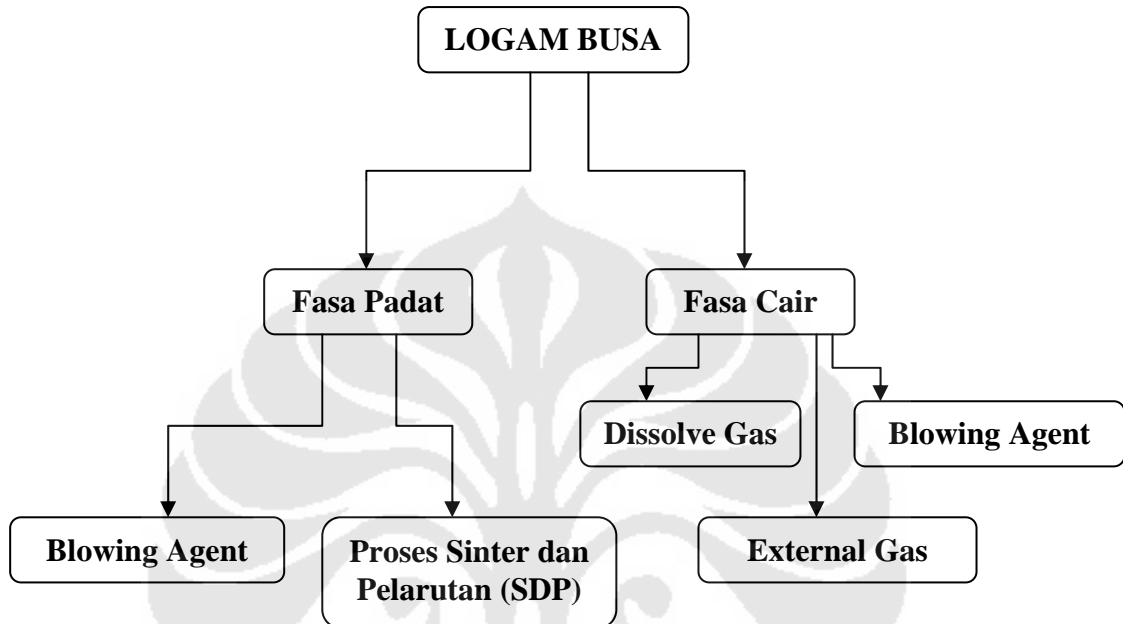


(b)

**Gambar 2.1.** Jenis-jenis Logam Busa: (a) Open-Cell Foam; (b) Closed-Cell Foam<sup>[1]</sup>

### II.1.3 Pembuatan Logam Busa

Fabrikasi logam busa dapat dilakukan dengan dua cara yaitu melalui fasa padat dan cair. Semua jalur ini memiliki tujuan yang sama yaitu untuk menghasilkan porositas dengan ukuran dan bentuk yang diinginkan.



Gambar 2.2. Macam-macam metode pembuatan logam busa<sup>[2]</sup>

Proses pembuatan logam busa melalui fasa cair umumnya menggunakan suatu bahan pembentuk pori (*foaming agent*). Bahan pembentuk pori dipilih yang dapat menghasilkan gas saat dipanaskan bersamaan dengan logam yang akan dijadikan logam busa. *Foaming agent* yang umum digunakan adalah  $TiH_2$  dan  $ZrH_2$ <sup>[3]</sup>. Selain menggunakan *foaming agent*, pembuatan logam busa melalui jalur cair juga bisa dilakukan dengan metode *dissolve gas* dan *external gas*. Pada metode ini pembuatan logam busa dibentuk oleh gas-gas yang terlarut dalam logam cair. Pada saat solidifikasi gas tersebut meninggalkan logam sehingga terbentuk pori. Gas yang digunakan pada metode ini adalah hidrogen dan oksigen untuk *dissolve gas* dan nitrogen dan argon untuk *external gas*.

Untuk pembuatan logam busa melalui fasa padat, melibatkan proses metalurgi serbuk. Metode ini memiliki beberapa keuntungan dalam prosesnya diantaranya bisa mengontrol bentuk sel, ukuran sel, dan distribusi porositas

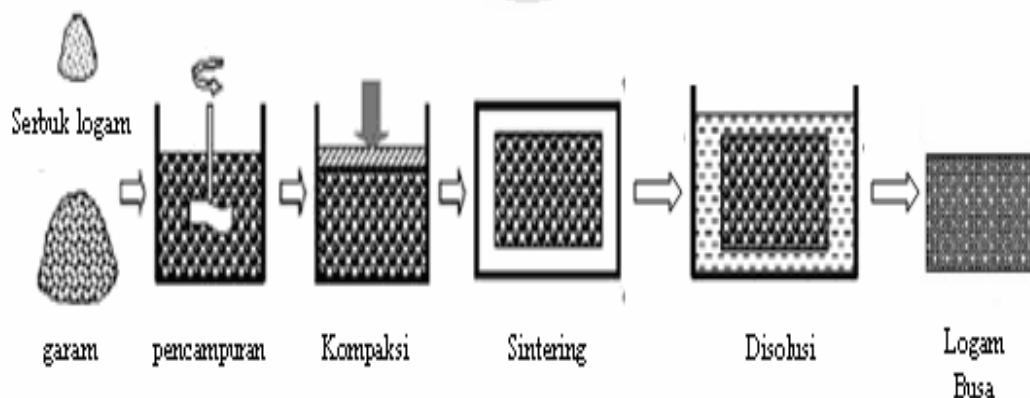
dengan baik. Prinsip pembentukan pori fasa padat ini melalui penggunaan garam yang selanjutnya dilarutkan sehingga didapat pori yang diinginkan.

Dalam penelitian yang dilakukan selanjutnya metode yang digunakan adalah fasa padat dengan jalur metalurgi serbuk dan proses yang digunakan bernama *Sintering and Dissolution Process* (SDP).

#### II.1.4 Sintering and Dissolution Process (SDP)

Proses *Sintering and Dissolution Process* (SDP), yaitu proses pembuatan logam busa melalui jalur padat dengan melibatkan proses metalurgi serbuk sepenuhnya, diikuti oleh proses disolusi untuk pembentukan pori. Kelebihan dari proses SDP adalah morfologi (bentuk dan ukuran) dan jumlah pori yang akan dibentuk dapat dikontrol dengan pemilihan morfologi dan juga jumlah garam yang diinginkan. Karena proses SDP ini melibatkan proses metalurgi serbuk, maka keuntungan lain yang akan didapat dari proses ini adalah produk memiliki bentuk hampir sama dengan cetakan (*near-net shape*), memiliki struktur butir yang halus, lebih mudah untuk melakukan paduan dan komposit yang sulit dicampur dengan peleburan, penggunaan bahan baku yang efisien, mengurangi permesinan, mudah untuk melakukan pengontrolan densitas dan porositas, serta mengurangi reaksi antarmuka<sup>[4]</sup>.

Secara umum jalannya proses SDP bisa dilihat pada gambar 2.3 dimana pada tahap awal proses SDP melibatkan proses metalurgi serbuk sepenuhnya. Selanjutnya proses ini hanya melibatkan proses disolusi untuk pelarutan garam.



Gambar 2.3. Proses pembuatan logam busa<sup>[5]</sup>

## II.2 MATERIAL

### II.2.1 Aluminium

Logam Aluminium merupakan unsur ketiga terbanyak di dunia dan memiliki peranan yang sangat penting dalam aplikasi dibidang industri dan otomotif. Secara harfiah aluminium memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan logam lain, khususnya baja. Tetapi apabila aluminium dipadukan (*alloying*) dengan unsur lain seperti: Silikon (Si), Magnesium (Mg), atau Tembaga (Cu) akan memiliki sifat fisik dan mekanik yang baik diantaranya:

- a) *Yield Strength* meningkat.
- b) Lebih tahan korosi.
- c) *Thermal Conductivity* yang baik.

Secara umum sifat-sifat fisik dan mekanik yang dimiliki aluminium dapat dilihat pada tabel 2.2 dibawah ini:

**Tabel 2.1.** Karakteristik logam aluminium<sup>[6]</sup>

Sifat	Nilai
Komposisi	Al
Nomor atom	13
Berat atom (g/mol)	27
Diameter atom (Nm)	0,268
Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	2,7
Struktur kristal	FCC
Temperatur lebur (°C)	660
Temperatur didih (°C)	2467
Modulus elastisitas (GPa)	71
Yield strength (MPa)	25
Poisson Ratio	0,35
Hardness (VHN)	15
Kekuatan luluh (MPa)	25
Ketangguhan (MPa√m)	33
Konduktivitas panas (W/m°K)	237
Kapasitas panas (J/Kg°C)	917

Ketahanan terhadap korosi	Sangat baik
Machinability	Baik
Formability	Baik

Dalam penelitian yang dilakukan secara teknis, jenis aluminium yang digunakan adalah aluminium serbuk dengan tingkat kemurnian Al 99.99%. Pada proses pembuatan *aluminium foam* selanjutnya serbuk aluminium dipadukan dengan Alumina ( $Al_2O_3$ ) yang berfungsi sebagai *foaming agent*, zinc stearat yang berfungsi sebagai pelumas, dan yang utama yaitu garam (NaCl) yang membuat logam aluminium menjadi berpori (*porous*).

### II.2.2 Alumina ( $Al_2O_3$ )

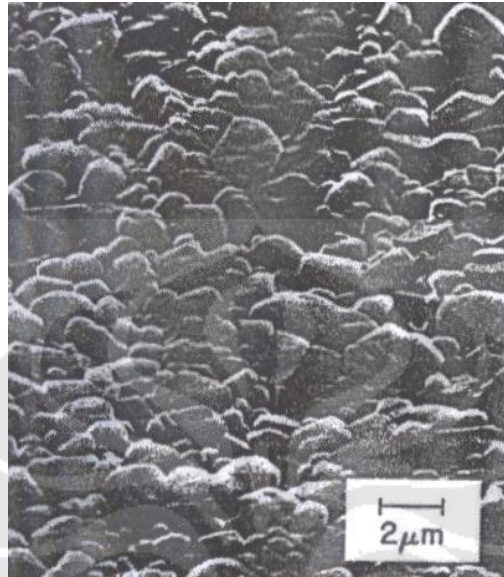
Alumina atau yang disebut dengan *Aluminium Oxide* ( $Al_2O_3$ ) termasuk kedalam keramik yang modern. Alumina merupakan salah satu jenis keramik oksida yang keras dan digunakan dalam jangkauan aplikasi yang luas. Beberapa aplikasi alumina antara lain spark plugs, wear part, milling media dan insulator. Selain itu alumina merupakan material yang paling umum digunakan dalam produksi keramik teknis. Pertimbangan untuk pemilihan alumina karena beberapa alasan, antara lain:

- Mempunyai suatu kekerasan yang tinggi.
- Ketahanan terhadap korosi dan aus yang baik.
- Daya hantar listrik yang rendah.
- Ekonomis dalam proses manufaktur.

**Tabel 2.2.** Karakteristik Alumina<sup>[6,7]</sup>

Sifat	Nilai
Titik lebur ( $^{\circ}C$ )	2015
Kekerasan (GPa)	15
Densitas ( $g/cm^3$ )	3,96
Koefisien termal ekspansi ( $^{\circ}C$ )	$8,3 \times 10^{-6}$
Fracture toughness ( $MPa\sqrt{m}$ )	4
Elastic modulus (GPa)	386

Linear coefficient of thermal expansion (ppm/°C)	8
Flexure strength (MPa)	552



**Gambar 2.4.** Mikrostruktur Penguat Alumina<sup>[7]</sup>

### II.2.3 Zinc Stearat

Zinc Stearat yang memiliki rumus kimia  $(\text{Zn}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2)$  merupakan suatu senyawa yang bereaksi dengan air. Sebagian besar senyawa ini bertindak sebagai pelumas pada hampir semua cetakan, baik pada aplikasi industri plastik atau logam. Hal ini dikarenakan zinc stearate tidak memiliki ion-ion positif atau negatif dan tidak memiliki efek hidrofobik. Aplikasi pada metalurgi serbuk bertindak sebagai “*releasing dies agent*” yang berfungsi untuk memudahkan dalam melepaskan sampel dari dalam dies.

### II.2.4 Garam Natrium Klorida (NaCl)

Natrium Klorida merupakan garam yang banyak digunakan untuk penyedap makanan dan memiliki sifat higroskopis yaitu mampu menyerap air dari lingkungan. Garam ini banyak didapat dari air laut yang diproses secara dengan cara dikeringkan dibawah sinar matahari.

Pada pembuatan logam busa, garam NaCl berperan sebagai pembentukan pori dengan metode fasa padat yaitu meralurgi serbuk. Untuk mendapatkan

ukuran pori yang optimal, dilakukan pengontrolan berupa penyaringan ukuran butir garam sehingga mendapatkan ukuran dan bentuk yang seragam. Selain itu juga terhindar dari pengotor-pengotor yang ada pada garam.

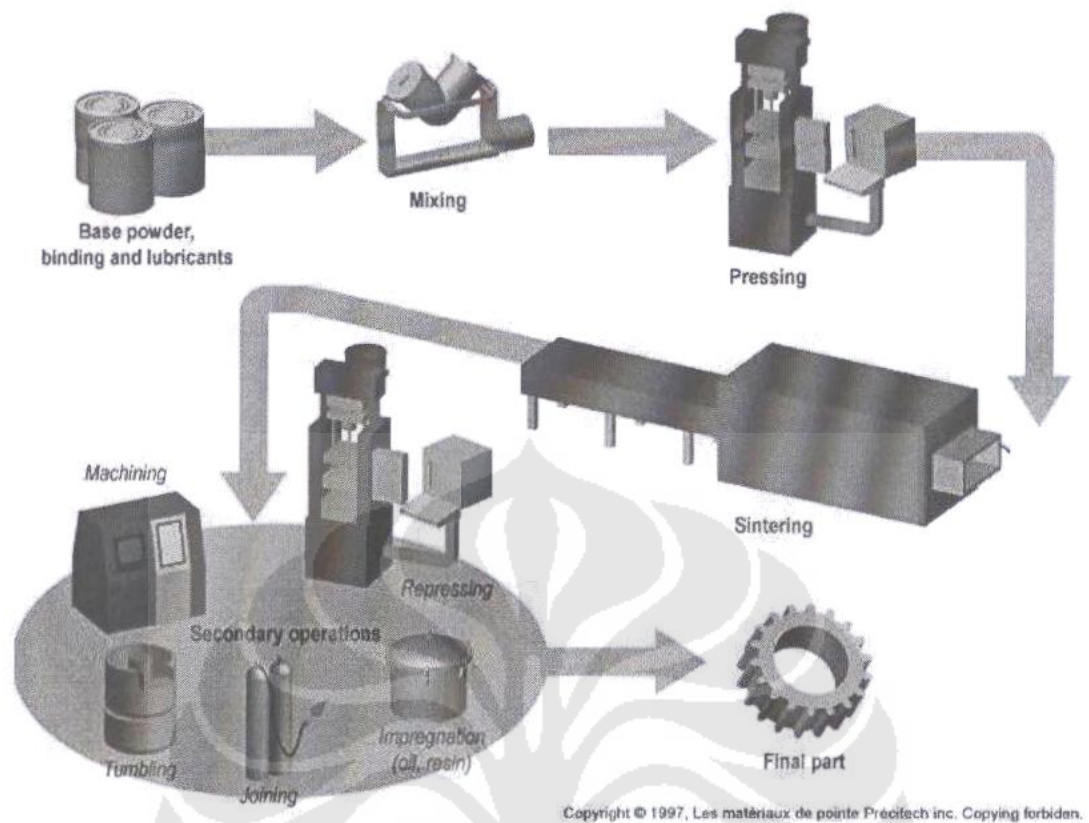
Penggunaan NaCl sebagai garam pada pembuatan pori tidak bereaksi secara kimia dengan logam aluminium. Metode ini dipilih supaya pelarutan garam agar terjadi pori lebih mudah. Berikut ini karakteristik dari NaCl yaitu:

**Tabel 2.3.** Karakteristik NaCl

Sifat	Nilai
Rumus molekul	NaCl
Massa molar	58,442 g/mol
Penampakan	Berupa kristal putih/bening, serbuk
Berat jenis	2,16 g/cm <sup>3</sup> , padat
Titik lebur	801 °C
Titik didih	1465 °C (1738 K)
Kelarutan dalam air	35.9 g/100 mL (25 °C)

### II.3 PROSES METALURGI SERBUK

Proses metalurgi serbuk memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode lain seperti casting. Proses ini memiliki kemampuan untuk memfabrikasi komponen dengan tingkat kerumitan yang tinggi, namun dengan toleransi dimensi yang baik dan berkualitas. Selain itu konsumsi energinya rendah dan pemakaian material yang sangat efektif<sup>[8]</sup>. Mekanisme yang terjadi pada proses metalurgi serbuk melibatkan proses difusi dan transfer material. Pada proses ini tahapan-tahapan yang terjadi antara lain karakterisasi serbuk (ukuran partikel, komposisi kimia, distribusi dan bentuk partikel), kompaksi, *sintering*.



**Gambar 2.5.** Proses Metalurgi Serbuk<sup>[9]</sup>

### II.3.1 Karakterisasi Serbuk

Karakteristik serbuk sangat menentukan kondisi proses metalurgi serbuk. Untuk mendapatkan kemudahan dan kualitas proses yang baik maka dilakukan tahapan berikut ini yaitu: ukuran serbuk, distribusi ukuran serbuk, bentuk serbuk, berat jenis serbuk, mampu alir (*flowability*), dan mampu tekan (*compressibility*).

#### II.3.1.1 Ukuran dan Distribusi Partikel Serbuk

Ukuran partikel ini dapat didefinisikan sebagai ukuran linier dari partikel oleh analisa ayak<sup>[10]</sup>. Ukuran partikel menunjukkan dimensi partikel. Ukuran partikel akan berpengaruh terhadap porositas dan densitas bakalan serta sifat mekanis dari logam busa. Ukuran partikel juga akan menentukan stabilitas dimensi, pelepasan gas yang terperangkap dan karakteristik selama pencampuran. Dalam menentukan ukuran partikel harus berdasarkan teknik pengukuran dan bentuk partikelnya sehingga bentuk partikel ini akan berpengaruh terhadap pendefinisian ukuran partikel, misalnya bentuk partikel yang bulat akan dapat



ditentukan berdasarkan diameternya. Akan tetapi bentuk partikel lainnya seperti *irregular* atau tidak teratur sangat sulit ditentukan ukurannya. Beberapa metode pengukuran serbuk antara lain: mikroskop, pengayakan, sedimentasi, konduktivitas listrik dan difraksi sinar-X<sup>[10]</sup>.

Distribusi ukuran partikel adalah pengelompokan besar partikel dalam ukuran tertentu dan bertujuan untuk menampilkan hasil pengukuran kerapatan maksimum dari suatu partikel. Data ukurannya digunakan untuk melukiskan hasil pengukuran dan asumsi bentuk partikel. Selain itu juga akan terlihat kepadatan suatu partikel yang pada akhirnya akan menentukan densitas, porositas, dan kekuatan dari bakalan.



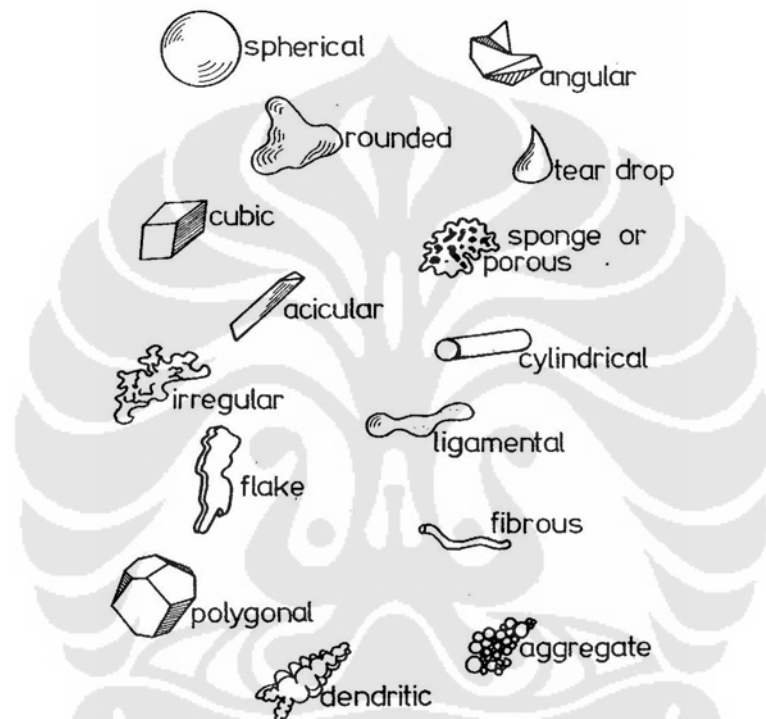
**Gambar 2.6.** Kemampuan Partikel Mengisi Ruang Kosong Antar Serbuk<sup>[4]</sup>

### II.3.1.2 Bentuk Partikel Serbuk

Bentuk partikel serbuk sangat mempengaruhi besarnya kontak antar partikel sehingga besarnya gaya gesekan antar partikel berhubungan dengan luas permukaan partikel serbuk. Dengan semakin kecilnya ukuran butir maka gaya gesek antar partikel semakin besar dan luas permukaan kontak antar partikel lebih banyak saat dilakukan proses kompaksi sehingga akan meningkatkan mekanisme ikatan antar partikel secara difusi saat proses *sintering*. Selain itu serbuk-serbuk yang kasar akan memiliki luas permukaan kontak antar partikel yang sedikit pada saat dikompaksi, dan akan berakibat pada proses *sintering* yang kurang baik sehingga menurunkan sifat mekanik produk metalurgi serbuk<sup>[4]</sup>. Berdasarkan ISO 3252, bentuk partikel serbuk diklasifikasikan sebagai berikut<sup>[11]</sup>:

- Acicular : berbentuk jarum
- Angular : berbentuk polihedral kasar dengan tepi tajam
- Dendritic : berbentuk kristalin dan bercabang

- Fibrous : berbentuk serabut yang beraturan atau tidak beraturan
- Flaky : berbentuk serpihan
- Granular : berbentuk tidak beraturan dan hampir bulat
- Irregular : berbentuk tidak beraturan atau tidak mempunyai simetri
- Nodular : berbentuk bulat dan tidak beraturan
- Sphreroidal : berbentuk bulat



Gambar 2.7. Bentuk Partikel Serbuk<sup>[10]</sup>

Selain kontak antar partikel serbuk, kereaktifan serbuk juga dipengaruhi oleh ikatan antar partikel serbuk, transfer material serbuk, transfer material saat dikompaksi, *compressibility*, yang pada akhirnya akan mempengaruhi *transport* perpindahan masa pada proses *sintering*.

### II.3.1.3 Mampu Alir Serbuk (*Flowability*)

Mampu alir serbuk adalah karakteristik yang berkaitan dengan sifat alir serbuk untuk memenuhi ruang cetakan<sup>[10]</sup>. Sifat ini berkaitan dengan gaya gesek antar partikel serbuk, maka sifat ini erat kaitannya dengan bentuk, ukuran, serta berat jenis dari partikel serbuk.

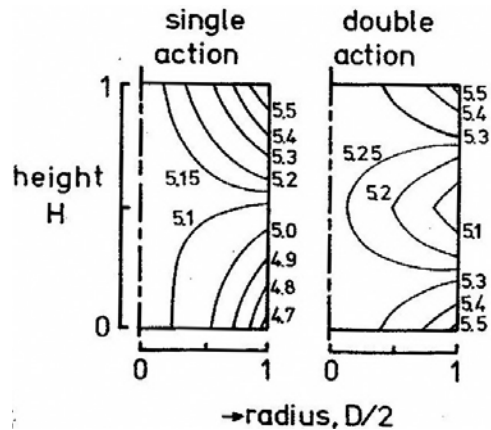
#### II.3.1.4 Mampu Tekan Serbuk (*Compressibility*)

Mampu tekan serbuk merupakan perbandingan volume serbuk mula-mula dengan volume benda yang ditekan yang nilainya berbeda-beda tergantung distribusi ukuran serbuk dan bentuk butirnya<sup>[10]</sup>. Besarnya jumlah pemadatan yang dapat diterima suatu serbuk dengan memberikan tekanan merupakan mampu tekan serbuk. Besarnya mampu tekan serbuk dapat dipengaruhi oleh efek gesekan antar partikel. Misalnya, serbuk besi hasil atomisasi yang memiliki bentuk yang lebih teratur, lebih halus, dan sedikit porositas antar partikel akan memiliki mampu tekan dan *green density* yang lebih tinggi dari pada serbuk *sponge iron*<sup>[4]</sup>.

#### II.3.1.5 Berat jenis Serbuk

Berat jenis serbuk sangat tergantung pada ukuran partikel, distribusi ukuran partikel, bentuk partikel, kondisi permukaan, efisiensi pemadatan serbuk, dan struktur partikel (pori atau tidak berpori)<sup>[4]</sup>. Dalam metalurgi serbuk berat per satuan volume suatu serbuk lepas dinyatakan sebagai berat jenis nyata serbuk atau *apparent density* sedangkan berat jenis setelah serbuk mengalami penekanan kompaksi untuk proses pemanasan (*sintering*) disebut dengan *green density*. Dalam aplikasinya berat jenis serbuk hasil kompaksi kadang tidak homogen. Berikut ini merupakan beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi terjadinya ketidak homogenan tersebut, antara lain<sup>[10]</sup>:

- Memberi pelumas untuk mengurangi gesekan antar partikel dan gesekan dengan cetakan.
- Mengatur perbandingan dimensi cetakan antara tinggi dengan lebar rongga cetakan (L/D). Semakin besar (L/D) maka distribusi akan tidak merata. Oleh karena itu, L/D sebaiknya kecil sehingga distribusi serbuk akan merata/homogen.
- Meningkatkan rasio penekanan kompaksi agar distribusi serbuk lebih baik.
- Menggunakan penekanan dua arah (*double punch*) agar berat jenis serbuk lebih homogen.
- Melakukan penekanan secara bertahap dari mulai yang paling rendah kemudian ditingkatkan tekanannya secara bertahap sampai titik optimum.

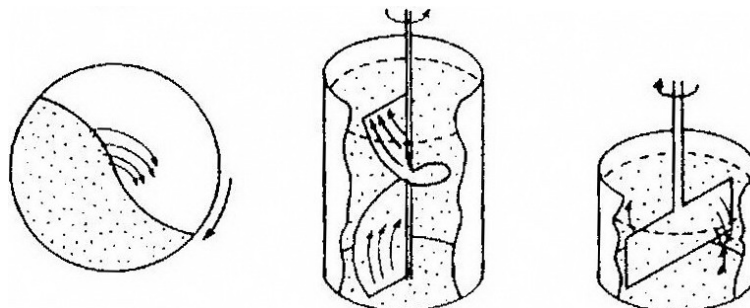


Gambar 2.8. Ketidakhomogenan berat jenis terhadap proses kompaksi<sup>[8]</sup>

### II.3.2 Pencampuran dan Pengadukan Serbuk

Pencampuran dan pengadukan serbuk dilakukan dengan tujuan untuk menghasilkan serbuk yang homogen. Dalam pencampuran dan pengadukan serbuk, variabel yang berpengaruh adalah jenis material serbuk, ukuran partikel, jenis pengaduk, ukuran pengaduk, kecepatan pengadukan dan waktu pengadukan<sup>[10]</sup>. Mekanisme yang terjadi ketika pencampuran serbuk tergantung metode pencampuran (*mixing*) yang digunakan, yaitu<sup>[10]</sup>:

- Difusi : terjadinya pencampuran karena gerak antar partikel serbuk yang dihasilkan oleh perputaran drum.
- Konveksi : terjadinya pencampuran karena ulir di dalam kontainer berputar pada porosnya.
- Geser : terjadinya pencampuran karena menggunakan suatu media pengaduk.



Gambar 2.9. Mekanisme Pencampuran Serbuk, dari kiri ke kanan yaitu difusi, konveksi, dan geser<sup>[8]</sup>

Pada saat suatu wadah diputar, maka akan terjadi gaya setrifugal dan fenomena turbulensi yang mengakibatkan reaksi pencampuran serbuk. Kondisi optimum pencampuran serbuk terjadi pada saat gaya sentrifugal kecil tetapi memungkinkan terjadinya gaya turbulensi. Bila gaya centrifugal terlalu besar maka serbuk dengan berat jenis yang lebih besar akan berada pada bagian luar saja, bila tidak terjadi turbulensi maka pencampuran tidak akan terjadi secara menyeluruh. Oleh karena itu mekanisme pencampuran sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran, waktu, dan besarnya wadah yang digunakan.

Selain faktor diatas ada faktor lain yang mempengaruhi proses pencampuran yaitu gaya gesek antara partikel serbuk. Semakin kecil nilai gaya gesek antar partikel serbuk maka tingkat keberhasilan pencampuran serbuk semakin kecil. Nilai gaya gesek partikel dipengaruhi oleh efisiensi pencampuran, pelumasan, dan pengeringan<sup>[10]</sup>.

### II.3.3 Pelumasan

Kemampuan gaya gesek partikel serbuk yang besar pada saat di kompaksi akan mengurangi mampu alir partikel dan tekanan kompaksi menjadi lebih besar. Selain itu gaya gesek antar partikel dengan dinding juga akan mempersulit mampu tekan serbuk. Untuk mengatasi hal ini digunakan solusi pelumasan (*lubricant*) yang tepat sehingga bakalan lebih mudah ditekan atau dikompaksi dan juga mempermudah pengeluarannya.

Tujuan utama dari pelumasan pada proses metalurgi serbuk adalah untuk mengurangi gaya gesek antar dinding cetakan dan antar serbuk. Komposisi pelumasan yang digunakan berkisar 1-2% wt. Bila digunakan secara berlebihan maka akan mengurangi nilai *apparent density* dan kekuatan bakalan. Jenis pelumas yang biasa digunakan adalah yang berbasis stearate, baik Al, Zn, Ca, Li, Mg dan lainnya. Penggunaan pelumas jenis ini dikarenakan memiliki titik lebur yang rendah sehingga cepat menguap pada saat di *sintering*. Berikut ini adalah karakteristik dari beberapa pelumas pada metalurgi serbuk.

**Tabel 2.4.** Karakteristik dari beberapa pelumas yang sering dipakai pada aplikasi metalurgi serbuk<sup>[8]</sup>

Nama umum	Oksida	Jumlah oksida, %	Temperatur pelunakan, °C	Titik lebur, °C	Berat jenis, gr/cm <sup>3</sup>
<i>Zinc stearate</i>	ZnO	14	100-120	130	1.09
<i>Calcium stearate</i>	CaO	9	115-120	160	1.03
<i>Lithium stearate</i>	LiO	5	195-200	220	1.01

### II.3.4 Kompaksi

Pada proses metalurgi serbuk, proses kompaksi dilakukan dengan tujuan untuk memberi bentuk dan memberikan kekuatan kepada serbuk dalam suatu cetakan sehingga serbuk (murni, paduan, atau campuran) bisa lebih mudah untuk dilakukan proses berikutnya<sup>[4]</sup>. Proses kompaksi bersumber pada tekanan eksternal untuk membentuk serbuk sehingga memiliki kepadatan yang tinggi. Hal ini menunjukkan tekanan yang diberikan, perilaku mekanik dan kecepatan penekanan merupakan parameter yang berpengaruh terhadap kepadatan serbuk.

Proses kompaksi dapat dilakukan melalui penekanan satu arah (*single end compaction*) atau penekanan dua arah (*double end punch*) baik secara *cold compacting* maupun *hot pressing*. Pada penekanan satu arah, penekan (*punch*) bagian atas bergerak ke bawah. Sedangkan pada penekanan dua arah, dua penekan, bagian atas dan bawah bergerak secara bersamaan dengan arah yang berlawanan. Untuk mendapatkan berat jenis bakalan yang homogen maka perbandingan tinggi dan diameter cetakan (L/D) juga perlu diperhatikan<sup>[10]</sup>.

Pada saat proses kompaksi dilakukan, serbuk didalam cetakan mengalami beberapa tahapan perilaku, diantaranya adalah<sup>[10]</sup> :

#### 1. Penataan ulang partikel serbuk (*Rearrangement*)

Pada saat mulai penekanan, serbuk mengalami penyesuaian letak pada tempat-tempat yang lebih luas atau dengan kata lain belum ada deformasi pada serbuk tersebut. Pergerakan dan pengaturan kembali partikel-partikel serbuk akibat adanya penekanan yang menyebabkan partikel serbuk tersusun lebih rata. Penyusunan partikel ini dibatasi oleh adanya gesekan antara partikel itu sendiri, atau antar partikel dengan permukaan cetakan.

2. Deformasi elastis partikel serbuk

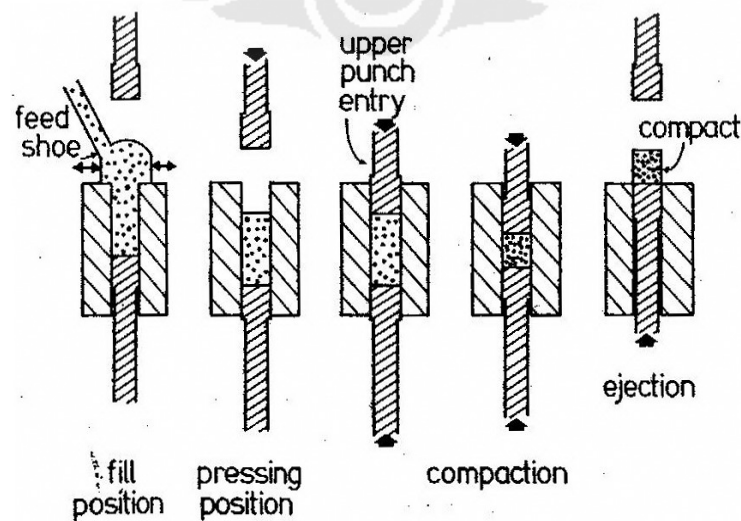
Serbuk-serbuk mulai bersentuhan, dan jika penekanan dihentikan, maka serbuk akan kembali ke bentuk semula. Hal ini karena respon dari material yang memiliki sifat elastis saat diberikan tekanan dibawah yield stress-nya.

3. Deformasi plastis partikel serbuk

Proses pemadatan (*densification*) terjadi pada tahap ini selama kompaksi berlangsung. Prinsipnya, semakin tinggi tekanan yang diberikan maka derajat deformasi plastis dan pemadatan akan meningkat. Faktor-faktor yang menentukan deformasi plastis, antara lain kekerasan dan perpindahan tegangan antar partikel yang berdekatan<sup>[10]</sup>.

4. Penghancuran partikel serbuk

Pada tahap ini serbuk mengalami mechanical interlocking, dan mekanisme ini disebut cold weld yang merupakan ikatan antar dua permukaan butiran logam yang bersih yang ditimbulkan oleh gaya kohesi, tanpa ada peleburan ataupun pengaruh panas. Pada umumnya permukaan serbuk akan teroksidasi, namun dibawah permukaan oksida terdapat permukaan yang bersih. Oleh karena itu, diperlukan pemecahan lapisan oksida sebelum terjadi cold weld. Pada waktu serbuk ditekan, berat jenis serbuk naik, porositas menurun karena rongga berkurang. Ketika serbuk mengalami penekanan, serbuk mengalami distribusi berat jenis yang tidak merata, dibagian dekat dengan penekan, berat jenis serbuk lebih besar, sedangkan di bagian tengah berat jenisnya lebih kecil.



Gambar 2.10. Tahapan proses kompaksi serbuk<sup>[8]</sup>

#### II.3.4.1 Sifat Fisik

Sifat fisik suatu bakalan sangat dipengaruhi oleh hasil kompaksi. Sifat-sifat itu adalah berat jenis bakalan (*green compact*) dan porositas. Berat jenis bakalan adalah berat jenis partikel serbuk hasil kompaksi yang berhubungan dengan kemampuan partikel serbuk untuk saling mengisi ruang kosong antar partikel serbuk. Berat jenis bakalan akan sangat menentukan karakteristik material. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi densitas bakalan adalah:

- a. Tekanan kompaksi yang optimal.
- b. Distribusi ukuran partikel yang bervariasi dan merata.
- c. Kekuatan dan kekerasan dari partikel yang relatif rendah.
- d. Kecepatan penekanan yang relatif lambat.

Untuk mengurangi terjadinya ketidakhomogenan berat jenis, maka solusi yang dapat dilakukan yaitu:

- a. Memberi pelumas atau *penetrant oil* untuk mengurangi gesekan antara partikel dengan partikel atau partikel dengan dinding cetakan.
- b. Mengatur perbandingan dimensi cetakan, yaitu L/D harus optimal, dimana L = tinggi, dan D = lebar rongga cetakan. Nilai L/D sebaiknya kecil sehingga distribusi serbuk menjadi merata dan homogen.
- c. Rasio penekanan yang tinggi agar distribusi serbuk lebih baik.
- d. Menggunakan *double press* (penekanan dua arah) sehingga serbuk lebih homogen berat jenisnya.
- e. Melakukan penekanan secara bertahap dimulai dari tekanan yang rendah kemudian ditingkatkan tekanannya secara bertahap sampai titik yang optimal.

Sifat fisik lainnya yang mempengaruhi hasil kompaksi adalah porositas. Porositas adalah ketidakmampuan partikel serbuk untuk mengisi ruang-ruang antar partikel sehingga meninggalkan ruang kosong yang akan menjadi pori yang terisolasi. Pori tersebut terisolasi karena tidak berhubungan dengan permukaan luar bakalan. Porositas yang terisolasi akan membesar dalam sinter karena adanya tekanan gas yang terperangkap. Pada saat proses kompaksi, pori yang berisi udara akan digantikan oleh massa partikel padat bila udara dapat dikeluarkan ke permukaan bakalan. Namun bila udara tidak dapat dikeluarkan, maka jumlah pori tidak akan berkurang. Kecepatan penekanan kompaksi yang tinggi dan distribusi



ukuran partikel yang tidak merata juga akan menyebabkan timbulnya porositas yang terisolasi.

#### II.3.4.2 Sifat Mekanik

Sifat mekanik dari bakalan antara lain kekuatan bakalan (*green strength*), kekerasan, dan ketahanan aus. Sifat ini dihasilkan dari mekanisme *mechanical interlocking*, yaitu kesempurnaan pengikatan antar partikel serbuk selama proses kompaksi berlangsung. Kekuatan mekanik bakalan akan meningkat bila:

- a. Partikel serbuk yang digunakan memiliki ukuran halus dengan tujuan meningkatkan *green density*.
- b. Memiliki luas permukaan yang kasar sehingga terjadi *mechanical interlocking*.
- c. Menghilangkan kontaminasi pada permukaan akibat udara luar sehingga tidak terjadi oksida. Permukaan yang bebas dari oksida akan meningkatkan *interparticles bonding*.
- d. Menggunakan tekanan kompaksi secara optimal untuk meningkatkan berat jenis bakalan.
- e. Menggunakan pelumas dengan kadar yang tidak berlebihan, agar tidak terjadi penurunan berat jenis bakalan yang diikuti dengan penurunan kekuatan bakalan.

#### II.3.5 Proses Sinter

Proses sinter merupakan proses pemanasan yang dilakukan untuk membentuk ikatan partikel dan susunan struktur yang koheren melalui mekanisme perpindahan massa yang terjadi dalam skala atomik<sup>[12]</sup>. Ikatan yang terjadi dalam proses sintering akan meningkatkan sifat mekanis seperti kekuatan, kekerasan, dan lain-lain<sup>[4]</sup>. Proses sinter dilakukan didalam dapur tertutup untuk mencegah pengaruh dari lingkungan di sekitar dapur yang dapat bereaksi dengan bakalan. Pada umumnya, perubahan yang terjadi jika serbuk hasil kompaksi disinter adalah sebagai berikut<sup>[4]</sup> :

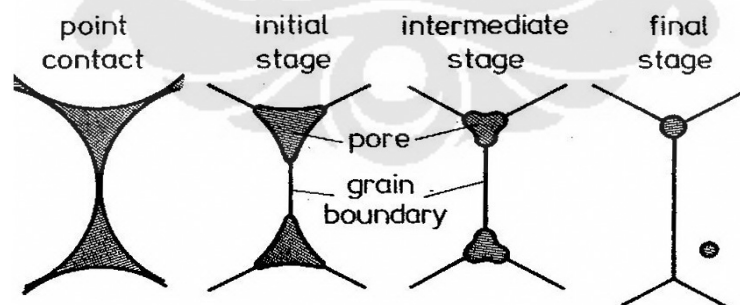
- a. Partikel mulai berikatan, sehingga akan meningkatkan kekuatan mekanis.

- b. Jika temperatur sinter ditingkatkan dan waktu sinter diperpanjang maka kekuatan mekanis akan meningkat secara berkelanjutan.
- c. Peningkatan temperatur dan waktu sinter akan mengurangi jumlah porositas dan meningkatkan densitas.
- d. Terjadi pertumbuhan butir sehingga hasil ukuran butir akan lebih besar daripada ukuran butir sebelum disinter.
- e. Pori akan menjadi lebih halus dan bentuknya menjadi lebih bulat selama proses sinter berlangsung.
- f. Apabila kondisi atmosfer dapur baik, udara yang terperangkap dalam butir akan keluar dan partikel oksida berkurang.

Fokus utama sinterisasi adalah difusi yang mengontrol suatu energi aktivasi yang perlu untuk menggerakkan atom-atom. Teori yang paling tepat untuk kasus sinter fasa tunggal adalah dengan difusi bentuk padat (*Solid State*). Namun teori ini aplikasinya sangat sedikit karena banyak proses sinter menggunakan *multiple phase* dalam bentuk cair (*Liquid State*).

### II.3.5.1 Tahapan Proses Sinter

Ada empat tahapan yang terjadi dalam proses sinter, yaitu: *point contact*, *initial contact*, *intermediate contact* dan *final stage*<sup>[8]</sup>.



**Gambar 2.11.** Tahapan-tahapan yang terjadi selama proses sinter<sup>[8]</sup>

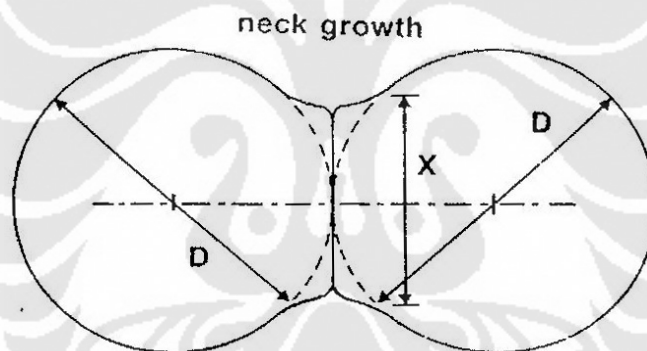
#### 1. *Point contact*

Pada tahap ini partikel lepas mulai membentuk kontak titik untuk antar partikel lainnya pada orientasi acak. Ikatan yang terjadi masih lemah dan belum terjadi perubahan dimensi bakalan. Semakin tinggi berat jenis bakalan maka

bidang kontak yang terjadi antar partikel juga semakin banyak sehingga ikatan yang terjadi dalam proses sinter pun semakin besar. Pengotor yang menempel pada batas kontak mengurangi jumlah bidang kontak sehingga kekuatan produk sinter juga menurun.

## 2. *Initial stage*

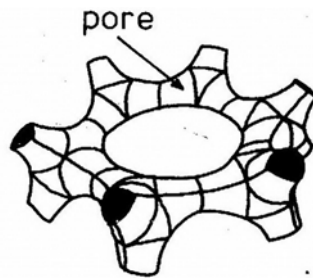
Pada tahap ini, daerah kontak antar partikel serbuk mulai tumbuh dalam bentuk leher. Pertumbuhan leher antar partikel ini sangat tergantung dengan mekanisme perpindahan massa<sup>[8]</sup>. Tahap ini berakhir saat resiko ukuran leher  $X/D$  mencapai  $0,3$ <sup>[12]</sup>. Pada tahap ini pori-pori mulai terpisah karena titik kontak membentuk batas butir. Selain itu, pada tahap ini juga terjadi penyusutan (*shrinkage*), pengurangan luas permukaan, dan pemadatan (*densification*)<sup>[12]</sup>.



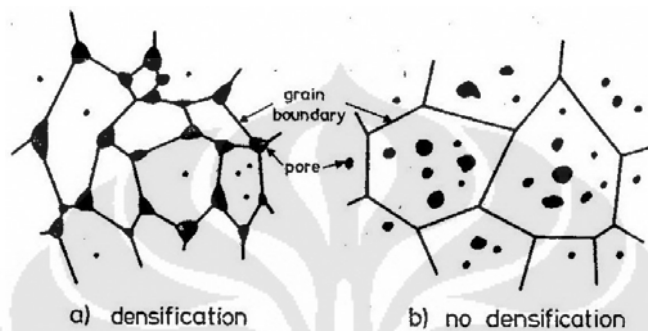
**Gambar 2.12.** Tahap pertumbuhan leher dengan rasio  $X/D$ <sup>[8]</sup>

## 3. *Intermediate stage*

Tahap ini merupakan penentuan terhadap sifat mekanis bakal sinter. Pada tahap ini terjadi pertumbuhan butir dan struktur pori menjadi halus. Geometri batas butir dan pori yang terjadi pada tahap ini tergantung pada laju sinter. Pada mulanya pori terletak pada bagian batas butir yang memberikan struktur pori. Sedangkan pemadatan (*densification*) yang terjadi pada tahap ini diikuti oleh difusi volume dan difusi batas butir<sup>[8]</sup>. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan sinter serta semakin kecil partikel serbuk, maka ikatan dan densifikasi yang terjadi juga semakin tinggi<sup>[12]</sup>.



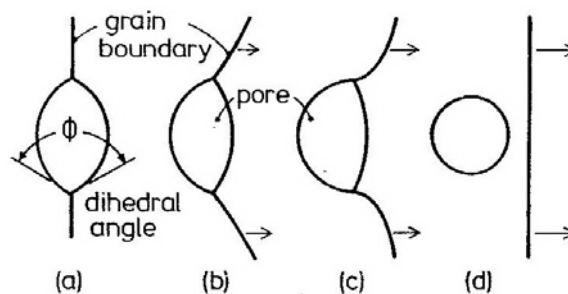
**Gambar 2.13.** Struktur pori pada tahap intermediate<sup>[8]</sup>



**Gambar 2.14.** Densifikasi pada proses sinter<sup>[8]</sup>

#### 4. Final stage

Pada tahap ini, prosesnya berjalan lambat. Pori-pori yang bulat menyusut dengan adanya mekanisme difusi *bulk*. Setelah batas butir meluncur, pori akan berdifusi kebatas butir hingga mengalami penyusutan, dimana proses ini berlangsung lambat. Dengan pemanasan yang lama, pengurangan ukuran pori akan menyebabkan ukuran pori rata-rata meningkat sedangkan jumlah pori akan berkurang. Jika pori memiliki gas yang terperangkap, maka kelarutan gas dalam matriks akan mempengaruhi laju pengurangan pori<sup>[8]</sup>.



**Gambar 2.15.** Pemisahan pori dan pembulatan pori pada tahap akhir sinter : (a) pori pada batas butir pada sudut dihedral kesetimbangan padat-uap; (b) dan (c) pertumbuhan butir dengan *pore drag*; (d) pemisahan pori<sup>[8]</sup>

### II.3.5.2 Solid State Sintering

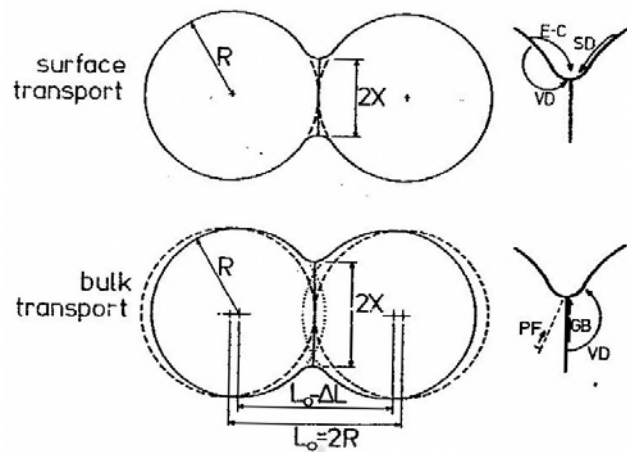
*Solid State Sintering* merupakan jenis proses sintering dimana proses pemanasan (sinter) yang dilakukan hanya melibatkan fasa padat tidak terjadi pencairan dari partikel (tidak melibatkan fasa cair). Dalam proses sinter ini terjadi perpindahan massa. Mekanisme perpindahan massa yang terjadi menentukan jumlah massa yang mengalir akibat adanya *driving force* dari proses sinter. *Driving force* pada proses sinter ini adalah pengurangan energi bebas pada sistem yang mengacu pada penghilangan dari area permukaan yang bersentuhan. Pada proses sinter ini, *driving force* dan mekanisme sinter mesti dibedakan. *Driving force* adalah tegangan yang ada pada permukaan material atau serbuk akibat proses kompaksi yang memicu terjadinya perpindahan massa. Besarnya energi permukaan adalah invers dari diameter partikel, sehingga semakin kecil ukuran partikel semakin besar pula *driving force*-nya. Sedangkan mekanisme sintering adalah bagaimana cara perpindahan massa itu terjadi. Untuk logam biasanya mekanisme sinter terjadi melalui proses difusi pada permukaan, batas butir atau jalur kisi. Mekanisme perpindahan massa ini terdiri dari dua tahap, yaitu<sup>[12]</sup>:

- Perpindahan permukaan (*surface transport*)

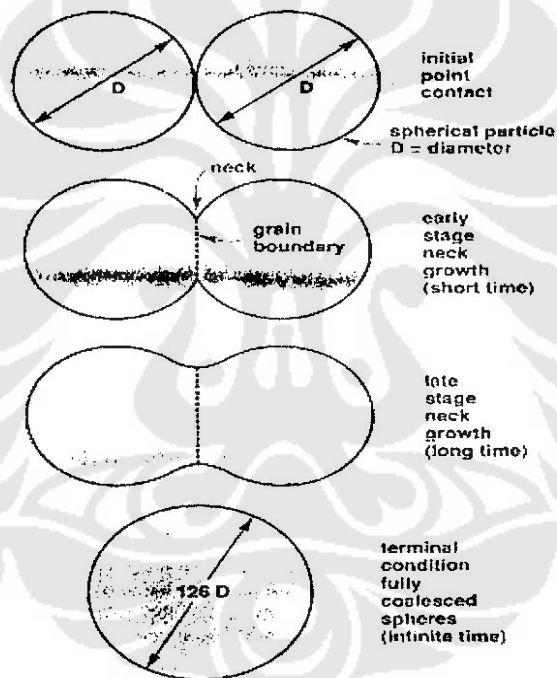
Dalam tahap ini akan menghasilkan pertumbuhan leher tanpa adanya perubahan jarak partikel (tidak ada penyusutan dan densifikasi) karena massa mengalir dan berakhir pada permukaan partikel. Difusi permukaan dan penguapan-kondensasi merupakan dua kontribusi yang sangat penting selama perpindahan permukaan pada waktu sinter.

- Perpindahan *bulk* (*bulk transport*)

Dalam tahap ini melibatkan difusi volume, difusi batas butir, aliran plastis, dan aliran rekat. Aliran plastis umumnya penting hanya selama waktu pemanasan, terutama untuk serbuk yang dikompaksi, dimana berat jenis dislokasi awal tinggi. Difusi batas butir penting untuk densifikasi material kristalin. Pada umumnya, proses perpindahan *bulk* akan lebih aktif pada tahapan akhir sintering.



Gambar 2.16. Mekanisme perpindahan massa<sup>[12]</sup>



Gambar 2.17. Dua partikel serbuk berbentuk bulat yang membentuk ikatan antar partikel saat proses sinter: mulai dari kontak, pertumbuhan leher, dan bersatu menjadi partikel besar<sup>[13]</sup>

### II.3.5.3 Liquid State Sintering

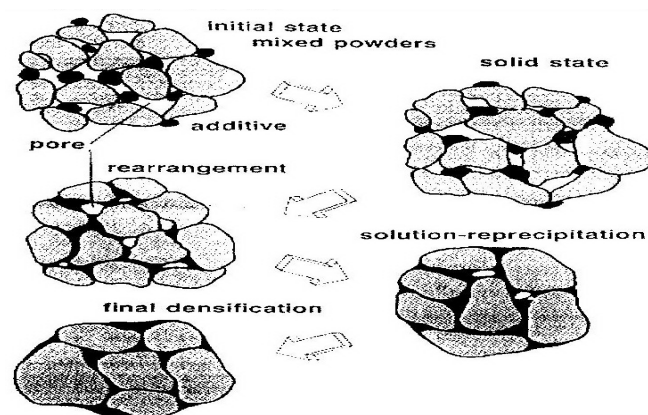
*Liquid state sintering* merupakan proses pemanasan (sinter) yang melibatkan fasa padat dan fasa cair. Proses sinter yang dilakukan untuk campuran dua jenis serbuk atau lebih pada temperatur tertentu dimana temperaturnya telah mencapai salah satu temperatur lebur serbuk yang disinter maka akan melibatkan fasa padat dan cair<sup>[12]</sup>.

Proses sintering ini mensyaratkan tiga hal agar *liquid state sintering* dapat efektif, yaitu<sup>[12]</sup> :

- a. Proses pembasahan (*wetting*) fasa padat oleh fasa cair secara menyeluruh.
- b. Volume dari fasa cairnya mencukupi.
- c. Kelarutan dari fasa padat pada fasa cairnya yang mencukupi.

Proses pembasahan pada fasa padat adalah syarat utama yang harus dimiliki, hal ini karena proses pembasahan ini akan menghasilkan tegangan permukaan yang akan membantu pada proses densifikasi/pemadatan, dan juga penghilangan pori.

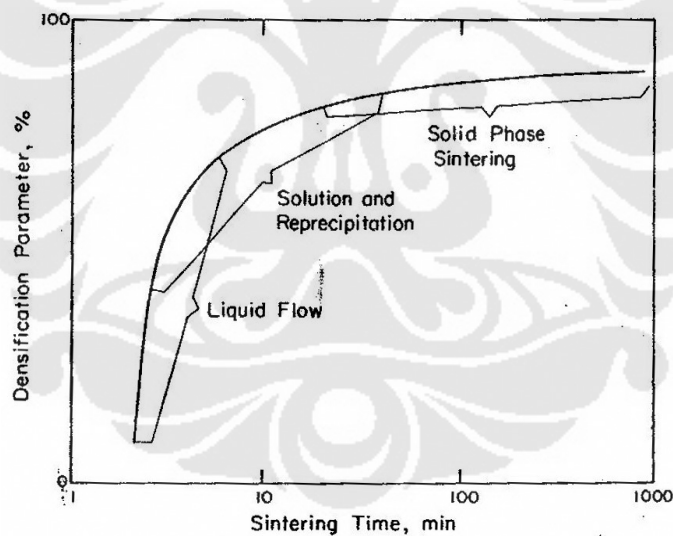
Mekanisme *liquid phase sintering* ini hampir sama dengan *solid phase sintering*<sup>[12]</sup>. Pada saat fasa cair terbentuk proses yang terjadi adalah pengaturan kembali fasa cair (*rearrangement*), pembasahan (*wetting*), aliran fasa cair (*liquid flow*), dan kombinasi dari penataan ulang. Pembasahan dan aliran fasa cair akan mempengaruhi perubahan volume dari bakalan. Setelah itu dengan bertambahnya waktu sinter proses pelarutan dan pengendapan ulang (*solution-reprecipitation*) terjadi, sehingga terjadi perpindahan massa. Proses ini tidak mengubah jumlah fasa padat maupun cair, tapi proses ini akan mempengaruhi proses densifikasi dan juga pengkasaran partikel, namun umumnya pengkasaran butir dihindari karena akan menurunkan sifat mekanis. Kemudian mekanismenya dilanjutkan pada proses densifikasi akhir (*final densification*) dimana seluruh pori terisi oleh fasa cair dengan jumlah fasa cair setidaknya 35 % volume cairan, lalu besarnya densifikasi akhir dipengaruhi dari kecepatan pemanasan dan juga ukuran partikel awal<sup>[8]</sup>.



**Gambar 2.18.** Skema proses densifikasi pada *liquid phase sintering*<sup>[12]</sup>

Pada proses *liquid phase sintering*<sup>[8]</sup> jumlah fasa cair yang terlalu banyak juga dihindari, hal ini dikarenakan kurang tegarnya bakalan selama sintering, sehingga tidak ada kontrol bentuk dan ukuran dari bakalan. Berat jenis bakalan, dan juga ukuran partikel sangat mempengaruhi proses perilaku logam pada saat densifikasi, dimana ukuran partikel yang besar dan juga berat jenis yang tinggi akan bertindak menstabilkan/mengimbangi perilaku densifikasi agar mendapatkan hasil yang bagus.

Melalui *liquid phase sintering* terjadi proses transfer material dari *high activity region* (bagian partikel yang lancip) ke *low activity region*, sehingga akan terjadi penghalusan partikel. Sudut dihedral (sudut antara fasa cair dengan batas butir padat-padat) sangat penting, bila sudut tersebut kecil maka mengindikasikan energi cair-padat yang relatif rendah, dan hal ini akan menghambat penggabungan dari partikel serbuk<sup>[8]</sup>.



Gambar 2.19. Tahapan *liquid phase sintering*<sup>[8]</sup>

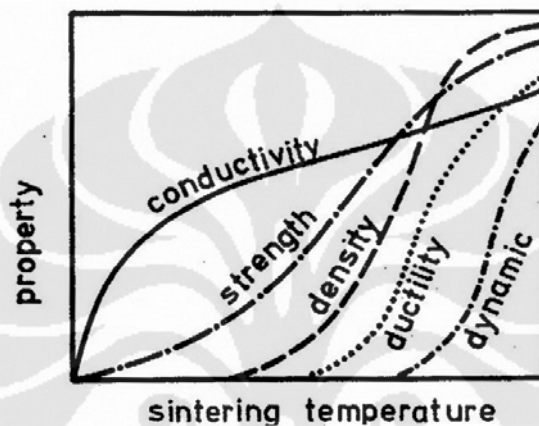
#### II.3.5.4 Temperatur Sinter

Proses perpindahan massa dipengaruhi oleh temperatur sinter. Dengan meningkatnya temperatur sinter maka sifat mekanis bakalan yang telah dipanasi (sinter) akan meningkat pula seperti kekuatan, kekerasan, ketangguhan, keuletan, umur fatik, kekuatan impak, dan konduktivitas listrik. Namun, peningkatan temperatur juga menimbulkan kerugian seperti penyusutan ukuran partikel



(*shrinkage*) keakuratan dimensi berkurang, terjadinya pertumbuhan butir. Biaya energi proses dan desain dapur lebih mahal<sup>[8]</sup>.

Untuk memperoleh hasil sintering yang baik, maka temperatur sinter yang digunakan harus sesuai karena akan mempengaruhi kinetika dan proses homogenisasi, yang pada akhirnya akan menentukan perubahan dimensi yang terjadi selama sintering. Untuk pembuatan aluminium busa temperatur sinter yang digunakan adalah sebesar 670-680°C.



Gambar 2.20. Pengaruh temperature sinter terhadap sifat mekanik<sup>[8]</sup>

#### II.3.5.5 Waktu Sinter

Peningkatan waktu sinter tidak memberikan pengaruh yang besar seperti pengaruh yang dihasilkan temperatur sinter. Peningkatan waktu sinter memberikan pengaruh sifat mekanis yang hampir sama dengan kenaikan temperatur sinter. Semakin tinggi waktu tahan sinter, temperatur sinter, dan *green density* maka densitas sinter juga akan semakin tinggi pula. Namun, kerugian waktu tahan sinter yang semakin lama yaitu menyebabkan persen penyusutan, pertumbuhan butir, dan biaya proses yang semakin besar<sup>[8]</sup>.

#### II.3.5.6 Atmosfer Sinter

Penggunaan atmosfer sinter adalah bertujuan untuk mengontrol reaksi-reaksi kimia antara bakalan dengan lingkungannya. Gas-gas yang tidak diinginkan dalam atmosfer sinter tidak hanya dapat bereaksi pada permukaan luar bakalan saja, tetapi juga dapat berpenetrasi ke struktur pori dan bereaksi kedalam

permukaan bakalan. Ada enam jenis atmosfer yang dapat digunakan untuk melindungi bakalan yaitu hidrogen, amoniak, gas inert, nitrogen, vakum, dan gas alam. Atmosfer vakum sering digunakan sebagai atmosfer sinter karena prosesnya bersih dan kontrol atmosfer mudah<sup>[8]</sup>.

Pengontrolan atmosfer memang sangat penting saat proses sinter untuk memperoleh hasil sinter yang optimal. Namun, kadangkala tidak hanya atmosfer saja yang menyebabkan reaksi-reaksi kimia, serbuk yang telah dikompaksi biasanya juga membawa kontaminasi-kontaminasi seperti oksida, dan gas yang terperangkap sehingga saat dipanasi (sinter) terjadi perubahan komposisi atmosfer<sup>[8]</sup>.

