

## BAB II

### DASAR TEORI

#### II.1 KOMPOSIT MATRIKS LOGAM ALUMINIUM GRAFIT

Komposit merupakan gabungan dari dua material atau lebih yang terdiri dari komponen matriks dan penguat (*reinforcement*), dimana antara matriks dan penguat akan membentuk lapisan antarmuka (*interface*) yang terjadi akibat reaksi dengan *wetting agent*. Material komposit dikembangkan untuk menciptakan material yang memiliki *properties* yang lebih baik dari material konvensional dimana *properties* dari material komposit merupakan hasil penggabungan dari sifat-sifat unggul material dasar penyusunnya (matriks dan penguat), misalnya pada komposit aluminium grafit, matriks aluminium memiliki *ductility* yang cukup tinggi, yakni dapat mencapai hingga 40% elongasi[2], sedangkan penguat yang berupa grafit bersifat *brittle*. Dengan menggabungkan kedua material tersebut, maka akan didapatkan material baru yang memiliki sifat diantara keduanya, yakni material yang *ductile* namun memiliki kekuatan yang cukup tinggi.

Komponen penyusun utama material komposit yaitu matriks dan penguat (*reinforced*). Matriks adalah material pengikat dari sebuah komposit yang berfungsi sebagai media transfer beban ke penguat, menahan penyebaran retak dan melindungi penguat dari lingkungan. Sedangkan penguat (*reinforced*) berfungsi memberikan kontribusi kekuatan pada material tersebut. Beberapa bentuk penguat (*reinforced*) dari material komposit antara lain:

1. Serat (*fiber*)
2. Partikel
3. *Laminate* (lapisan)
4. Serpihan (*flakes*)
5. Rambut (*whiskers*)

Pada umumnya, sifat-sifat dari komposit apabila dibandingkan dengan komponen-komponen penyusunnya memiliki sifat-sifat yang lebih baik,

diantaranya ketangguhan dan kekuatan yang lebih baik, lebih ringan (*lightweight*), memiliki ketahanan terhadap korosi dan aus yang lebih baik dan memiliki umur fatik yang lebih lama.

Berdasarkan matriks penyusunnya, komposit dapat diklasifikasikan ke dalam 3 jenis, yaitu:

1. *Metal Matrix Composite* (MMC), dengan matrix yang digunakan adalah jenis logam.
2. *Polymer Matrix Composite* (PMC), dengan matrix yang digunakan adalah jenis polimer.
3. *Ceramic Matrix Composite* (CMC), dengan matrix yang digunakan adalah jenis keramik.

Komposit matriks logam aluminium grafit termasuk dalam klasifikasi komposit MMC (*Metal Matrix Composite*) dengan penguat grafit berbentuk partikel. Mekanisme penguatan yang terjadi pada komposit ini ialah *particulate dispersion strengthening*. Partikel-partikel grafit yang bersifat getas serta terbentuknya fasa baru yang memiliki kekerasan yang tinggi akan menghambat pergerakan dislokasi sehingga kekuatan material akan meningkat.

Komposit matriks aluminium grafit dikembangkan pertama kali dengan menggunakan karbon *fiber* yang kuat dan kaku pada era 1960-an. Karbon *fiber* memiliki modulus elastisitas hingga berkisar 966 GPa ( $140 \times 10^6$  psi) dan nilai koefisien ekspansi *thermal* yang negatif, yakni menurun hingga  $-1,62 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ( $-0,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ). Meskipun demikian, kombinasi karbon dan aluminium sulit dilakukan pada proses pembuatan material komposit. Hal ini disebabkan karena reaksi yang merusak antara karbon dan aluminium, pembasahan karbon yang buruk oleh leburan aluminium, dan oksidasi karbon. Tiga proses yang sekarang digunakan untuk pembuatan komersial komposit matriks aluminium grafit ialah *liquid metal infiltration of fiber tows*, *vacuum vapor deposition of the matrix on spread tows*, dan *hot press bonding of spread tows sandwich between sheets of aluminum*[3].

Material komposit matriks aluminium grafit dapat digunakan untuk aplikasi tribologi karena memiliki keunggulan-keunggulan, diantaranya ialah:

- ▶ Sifat anti gesek (*antifriction*) yang baik

- ▶ Ketahanan aus yang baik
- ▶ Karakteristik anti serangan tiba-tiba (*antiseizure*)
- ▶ Sifat konduktivitas panas yang tinggi
- ▶ Koefisien ekspansi *thermal* yang rendah
- ▶ Sifat kemampuan untuk di-*machining* yang baik

Selain untuk aplikasi tribologi, material komposit matriks aluminium grafit juga digunakan pada pembuatan struktur pesawat luar angkasa yang memiliki tingkat ketelitian yang tinggi, stabilitas dimensi yang baik, dan distorsi akibat *thermal* yang rendah[3].

### II.1.1 *Metal Matrix Composite*

*Metal Matrix Composite* merupakan kombinasi dari dua material atau lebih dimana logam sebagai matriksnya dengan penguat keramik yang berupa fiber atau partikel. Karakteristik yang dimiliki MMC dibandingkan dengan logam monolitik (material tunggal) antara lain:

- Kekuatan tinggi (ratio *strength-density* tinggi)
- Modulus elastis tinggi (ratio *stiffness-density* tinggi)
- Ketahanan fatik lebih baik
- Memiliki sifat yang baik pada temperatur tertentu, yaitu:
  - kekuatan lebih tinggi
  - laju creep rendah
- Sifat ketangguhan dan ketahanan beban kejut tinggi
- Ketahanan aus baik
- Sifat permukaan yang baik
- Koefisien termal ekspansi rendah
- Ketahanan ruangan vakum yang baik

Variasi dari sifat yang dimiliki MMC dapat dipengaruhi faktor-faktor dibawah ini, yaitu:

- ▶ Sifat, bentuk, dan susunan geometrik dari *reinforcement*
- ▶ Volum fraksi *reinforcement*
- ▶ Sifat dari matriks (termasuk pengaruh dari *porosity*)

- ▶ Sifat pada *interface* antara matriks dan *reinforcement*
- ▶ *Residual stress*
- ▶ Kemungkinan terjadinya degradasi *reinforcement* pada temperatur tinggi yang menyebabkan terjadinya reaksi kimia dan kerusakan karena proses

Logam yang biasa digunakan sebagai matriks adalah aluminium dan titanium. Aluminium banyak digunakan sebagai matriks pada material MMC. Keunggulan utama dari logam ini adalah densitas yang rendah sehingga komponen yang dihasilkan akan lebih ringan. Selain itu, aluminium merupakan logam yang tergolong mudah dalam fabrikasinya. Untuk meningkatkan kekuatannya agar bersaing dengan material lain (misalnya baja), maka ditambahkan penguat (dari bahan keramik) sehingga rasio kekuatan dan modulus dari material akan meningkat. Material yang biasa digunakan sebagai penguat biasanya dari golongan keramik, antara lain: fiber alumina, silikon karbide *whiskers*, dan partikel grafit. Pada material komposit, adanya penguat dapat meningkatkan karakteristik dari matriks, diantaranya ketahanan aus, koefisien gesek maupun konduktivitas termal. Berdasarkan jenis penguatnya *Metal Matrix Composite* dapat terbagi atas 2 kelompok, yaitu:

#### 1. *Reinforced Continuous*

Penguat dari jenis *continuous* ini berupa *fiber*, dimana material komposit dengan jenis penguat ini digunakan apabila komponen yang akan dibuat mementingkan kekuatan tarik yang lebih baik. Pada penguat jenis *continuous*, kekuatan tarik akan berpusat pada fiber-fiber panjang. *Reinforced* dengan *continuous-aligned-fiber* memiliki sifat anisotropi. Kekuatan dan kekakuannya akan lebih baik pada arah fiber dibandingkan pada arah tegak lurus (*transversal*).

#### 2. *Reinforced Discontinuous*

Penguat dari jenis *discontinuous* dapat berupa *fiber*, *whiskers*, *particulate* atau serpihan (*flake*). Komponen untuk aplikasi yang pembebanannya diterima merata di seluruh material MMC sebaiknya menggunakan penguat berserat pendek atau *discontinuous* karena beban akan disalurkan ke semua penguat melalui matriks sehingga penyebarannya akan merata dan tidak terpusat seperti pada material

MMC berserat *continuous*. Dengan penguat jenis ini, memungkinkan untuk membuat suatu material komposit secara metalurgi serbuk. Dimana serbuk logam sebagai matriks dicampur dengan serbuk penguat berbentuk partikulat seperti grafit.

## II.2 INTERFACE DAN KEMAMPUBASAHAN (*WETTABILITY*)

*Interface* adalah suatu fasa atau media yang terdapat pada komposit yang berfungsi untuk mentransfer beban dari fiber-matriks-fiber. Beberapa jenis ikatan yang dapat terjadi pada *interfacial bonding* antara lain:

### 1. Mechanical Bonding

Mekanisme penguncian (*interlocking* atau *keying*) antara 2 permukaan yaitu fiber dan matriks. Permukaan yang kasar dapat menyebabkan *interlocking* yang terjadi semakin banyak dan *mechanical bonding* menjadi efektif. *Bonding* menjadi efektif jika beban yang diberikan paralel terhadap *interface*. Bila beban yang diberikan tegak lurus terhadap *interface*, *mechanical bonding* tidak efektif.

### 2. Electrostatic Bonding

Proses tarik menarik antara permukaan yang berbeda tingkat kelistrikkannya (*positive & negative charge*) dan terjadi pada skala atomik. Efektivitas terhadap jenis ikatan ini dapat menurun jika ada kontaminasi permukaan dan kehadiran gas yang terperangkap.

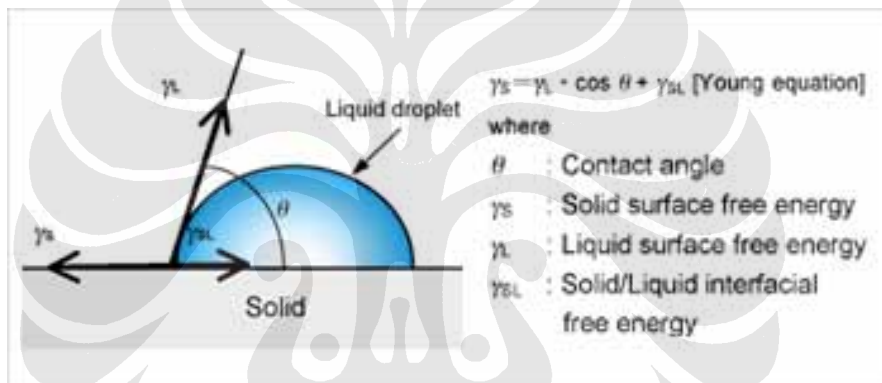
### 3. Chemical Bonding

Dibentuk oleh adanya grup-grup yang bersifat kimiawi pada permukaan fiber dan matriks. Kekuatan ikatan ditentukan oleh jumlah ikatan kimiawi menurut luas dan tipe ikatan kimia itu sendiri.

Pembasahan (*wettability*) merupakan kontak antara fasa *liquid* dan permukaan fasa *solid*, dihasilkan dari interaksi antarmolekul ketika keduanya terbawa secara bersamaan. Banyaknya pembasahan tergantung dari energi (tegangan permukaan) antarmuka yang terlibat, seperti misalnya total energi yang diminimalkan. Derajat pembasahan dijelaskan dengan sudut kontak (*contact angle*), sudut dimana antarmuka fasa *liquid-vapor* bertemu dengan antarmuka fasa *solid-liquid*. Apabila pembasahan sangat baik, maka sudut kontak kecil, dan cairan akan menyebar

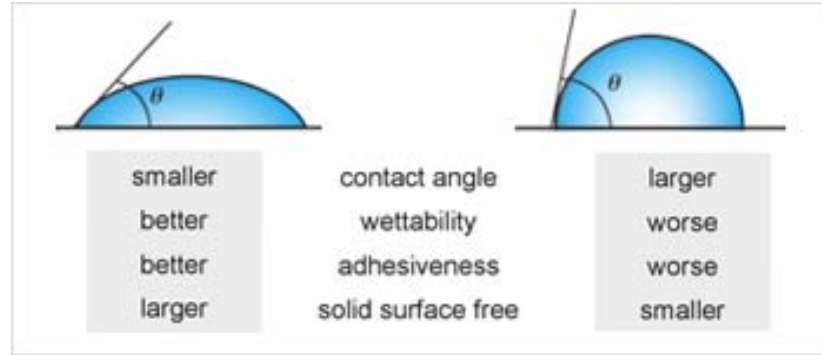
lebih luas menutupi daerah permukaan. Apabila pembasahan tidak baik, maka cairan akan membentuk tetesan yang *compact* pada permukaan.

Sudut kontak dengan besar  $\geq 90^\circ$  memiliki karakteristik permukaan yang tidak membasahi (*non wettable*), sedangkan untuk sudut kontak dengan besar  $\leq 90^\circ$  bersifat membasahi (*wettable*). Dalam konteks air, membasahi permukaan dapat diistilahkan dengan *hydrophilic* dan tidak membasahi permukaan disebut dengan *hydrophobic*. Permukaan *superhydrophobic* memiliki sudut kontak  $\geq 150^\circ$ , menunjukkan hampir tidak terjadi kontak antara tetesan *liquid* dan permukaan. Pembasahan juga penting dalam ikatan atau daya lekat (*adherence*) dari dua material.



**Gambar 2.1.** Gaya-gaya yang dihasilkan pada peristiwa pembasahan[4].

Gambar 2.1 memperlihatkan skema mengenai gaya-gaya yang terjadi pada peristiwa pembasahan. Dengan menggunakan rumus persamaan Young, maka nilai sudut kontak ( $\theta \leq 90^\circ$ ) akan menghasilkan nilai  $\cos \theta$  semakin besar (mendekati 1), sehingga nilai tegangan permukaan ( $\gamma$ ) *liquid-vapour* dijumlah dengan nilai tegangan permukaan ( $\gamma$ ) *solid-liquid* akan bernilai sama dengan nilai tegangan permukaan ( $\gamma$ ) *solid-vapour*, atau dengan kata lain sudut kontak ( $\theta \leq 90^\circ$ ) maka terjadi pembasahan antara permukaan fasa *liquid* dan permukaan fasa *solid*.



**Gambar 2.2.** Perbandingan sifat fisik dari perbedaan sudut kontak[4].

Gambar 2.2 memperlihatkan perbandingan sifat fisik yang dihasilkan dari perbedaan sudut kontak. Sudut kontak dengan besar  $\leq 90^\circ$  memiliki sifat fisik yang lebih baik dibandingkan dengan sudut kontak dengan besar  $\geq 90^\circ$ .

Kemampuan pembasahan yang baik berarti bahwa cairan akan mengalir pada penguat dan akan menutupi seluruh bagian topografi permukaan baik yang berupa benjolan maupun cekungan dari permukaan kasar penguat. Pembasahan hanya akan terjadi jika viskositas matriks tidak terlalu tinggi dan jika pembasahan menurunkan energi bebas sistem. Dengan demikian matriks dan penguat akan bertemu dalam suatu kontak sehingga terbentuk ikatan antar muka yang kuat.

## II.3 MATERIAL

### II.3.1 Aluminium

Pada komposit aluminium grafit yang diproses dengan metode metalurgi serbuk, logam aluminium berperan sebagai matriks yang memiliki fungsi sebagai media transfer beban ke penguat dan melindungi penguat dari lingkungan. Logam aluminium yang digunakan sebagai matriks memiliki *ductility* yang cukup tinggi. Aluminium serbuk dan paduannya memiliki sifat mampu tekan (*compressibility*) yang cukup tinggi, dengan *green density* sekitar 90% dari densitas teorinya[5]. Selain itu, aluminium banyak diproduksi karena mudah diperoleh, harga yang relatif murah serta memiliki sifat-sifat fisik dan mekanik yang menguntungkan (tabel 2.1). Produk metalurgi serbuk dengan matriks aluminium menempati urutan kedua setelah besi-baja dalam hal volume produksi.

**Tabel 2.1. Sifat-sifat Logam Aluminium Murni**

<b>Sifat Fisik</b>	<b>Satuan SI</b>	<b>Nilai</b>
Densitas (T = 20°C)	gram/cm <sup>3</sup>	2,7
Nomor Atom	-	13
Berat Atom	gram/mol	26,97
Warna	-	Putih keperakan
Struktur Kristal	-	FCC
Titik Lebur	°C	660,4
Titik Didih	°C	2467
Jari-jari Atom	nm	0,143
Jari-jari Ionik	nm	0,053
Nomor Valensi	-	+3
<b>Sifat Mekanis</b>		
Modulus Elastisitas	GPa	71
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0,35
Kekerasan	VHN	19
Kekuatan Luluh	MPa	25
Ketangguhan	MPa√m	33
<b>Sifat Thermal</b>		
Konduktivitas Panas	W/mK	237
Kapasitas Panas	J/Kg°C	917
<b>Sifat-sifat Lain</b>		
Ketahanan Korosi	-	Sangat Baik
<i>Machinability</i>	-	Baik
<i>Formability</i>	-	Baik

*Sumber: ASM Specially Handbook. Aluminum & Aluminum Alloys. Ohio: 1993.  
Callister, William D, Jr. Materials Science and Engineering An Introduction, 6<sup>th</sup> Edition.  
John Wiley & Sons, Inc. Singapura: 2003.*

Aluminium serbuk yang umumnya dihasilkan dari proses atomisasi memiliki karakteristik seperti pada tabel 2.2. Nilai berat jenis dibawah ini merupakan fungsi dari distribusi ukuran partikel.



**Tabel 2.2.** Nilai Berat Jenis untuk Aluminium Serbuk Hasil Proses Atomisasi

Sifat	Satuan SI	Nilai
<i>Apparent density</i>	g/cm <sup>3</sup>	0,8 – 1,3
<i>Tap density</i>	g/cm <sup>3</sup>	1,2 – 1,5
Kandungan oksigen	wt%	0,1 – 1,0

Sumber: ASM Handbook Volume 7. Powder Metallurgy Technologies and Applications. USA: ASM International. 1990.

### II.3.2 Grafit

Grafit pada komposit matriks logam aluminium grafit berfungsi sebagai penguat dan akan meningkatkan ketahanan aus dan memperkecil gesekan. Grafit yang ditambahkan dalam pembuatan material *bearing* juga berperan sebagai pelumasan (*self lubricating*). Material dengan kandungan grafit dibawah 0,3% dikategorikan sebagai *bearing* grafit berkandungan rendah. Sedangkan pada material *bearing* grafit menengah, kadar grafit berkisar 0,5% - 1,8%. Untuk *bearing* grafit berkandungan tinggi, kadar grafit antara 3% - 5% [6].

**Tabel 2.3.** Sifat-sifat Grafit

Sifat Fisik	Satuan SI	Nilai
Densitas	gram/cm <sup>3</sup>	2,25
Nomor Atom	-	6
Berat Atom	amu	12,011
Struktur Kristal	-	Hex.
Jari-jari Atom	nm	0,071
Jari-jari Ionik	nm	0,016
Nomor Valensi	-	+4
Bentuk Alotropik	-	Kristalin
Titik Lebur	°C	3500
Titik Didih	°C	4830
<b>Sifat Thermal</b>		
Konduktivitas Panas	kal/gram°C	0,057

Tahanan Listrik	Ohm	$1,357 \times 10^6$
-----------------	-----	---------------------

Sumber: Anggrainy, Ricca. "Pengaruh Temperatur Sinter terhadap Karakteristik Komposit Matriks Logam Aluminium Grafit Produk Metalurgi Serbuk". Depok. 2006.

Penguatan oleh grafit ini dapat tercapai apabila grafit sebagai penguat dapat dibasahi dengan baik oleh matriks aluminium. Pembasahan yang baik ini dapat dibantu oleh material lain yang berfungsi sebagai *wetting agent*, yaitu tembaga. Jika grafit tidak dibasahi dengan baik maka konsentrasi *wetting agent* tidak dapat mengkompensasi fraksi grafit, maka hal ini akan menurunkan densitas, kekerasan, dan ketahanan aus. Hal ini disebabkan akan timbulnya ruang kosong antara grafit dan tembaga yang tidak dibasahi sehingga menimbulkan porositas.

### II.3.3 Tembaga

Pada proses pembuatan komposit matriks logam aluminium grafit dengan proses metalurgi serbuk, serbuk tembaga berfungsi sebagai *wetting agent*. Tabel 2.4 memperlihatkan sifat-sifat yang dimiliki oleh tembaga.

**Tabel 2.4.** Sifat-sifat Tembaga

Sifat Fisik	Satuan SI	Nilai
Densitas	gram/cm <sup>3</sup>	8,96
Berat Atom	gram/cm <sup>3</sup>	63,5
Diameter Atom	nm	0,256
Struktur Kristal	-	FCC
Titik Lebur	°C	1083
Titik Didih	°C	2578
<b>Sifat Mekanik</b>		
Modulus Elastisitas	GPa	145
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0,34
Kekuatan Luluh	MPa	120
Elongasi	%	45
<b>Sifat Thermal</b>		
Konduktivitas Panas	W/°C	403

Koefisien Muai Panas	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	16,6
Kapasitas Panas	$\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$	386

Sumber: Isminarto, Catur. "Pengaruh Temperatur Sinter terhadap Karakteristik Bearing Cu-Sn-Zn-C Grafit Produk Metalurgi Serbuk". Depok. 2005.

#### II.4 PROSES METALURGI SERBUK

Metalurgi serbuk mengacu pada proses dimana serbuk logam dicampur (*mixed*) dan dikompaksi di dalam cetakan dibawah tekanan hingga mencapai ~80% densitas teori dan kemudian dilakukan proses sinter pada temperatur tinggi dibawah titik leburnya (~0,8 titik lebur). Proses sinter akan menyebabkan penggabungan antar partikel-partikel serbuk melalui difusi transport atom dan meningkatkan densitas (hampir mendekati nilai dari densitas teori)[7].

Teknik pemrosesan dengan metalurgi serbuk memiliki keuntungan pada produk yang ingin dihasilkan, diantaranya sebagai berikut:

- *Part* (bagian-bagian) yang memiliki titik lebur tinggi dan permesinan yang sulit, seperti komponen-komponen *tungsten*, *WC cutting tools*.
- Kemampuan untuk membuat komponen dengan tingkat kerumitan yang tinggi dan toleransi dimensi yang baik dengan kualitas tinggi.
- Material dengan struktur butir yang halus
- *Alloy* dan komposit yang sulit dicampur dengan peleburan
- Magnet kuat yang mempersyaratkan susunan partikel-partikel berukuran kecil
- Penggunaan bahan baku yang efisien
- Mengurangi biaya permesinan
- Dapat mengontrol besarnya densitas dan porositas sesuai dengan yang diinginkan
- Dapat meminimalkan terjadinya reaksi-reaksi antarmuka yang tidak diinginkan karena preparasi sampel dilakukan pada kondisi temperatur rendah.

Namun selain memiliki kelebihan, proses metalurgi serbuk juga memiliki beberapa kekurangan diantaranya ialah:

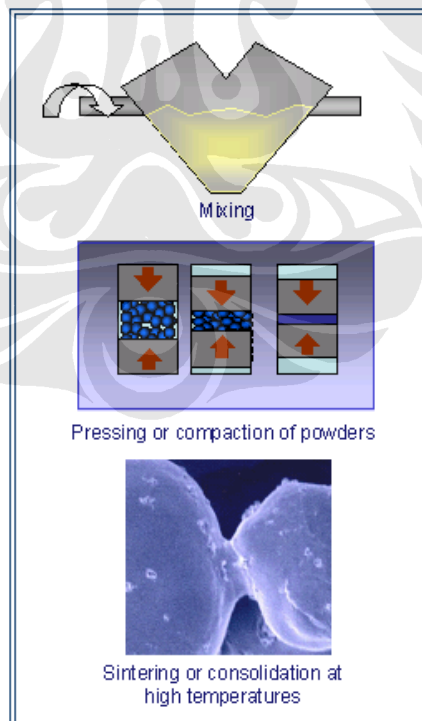
- ▶ Sulit untuk menghasilkan produk secara massal

- ▶ Sulit untuk mendapatkan distribusi partikel yang merata pada produk
- ▶ Membutuhkan kebersihan proses dengan tingkat sangat tinggi
- ▶ Terbentuknya inklusi di dalam produk yang dapat memberikan efek beracun
- ▶ Desain komponen harus dibuat sedemikian serupa sehingga dapat dengan mudah dikeluarkan dari cetaknya

Beberapa tahapan dalam proses metalurgi serbuk, yakni:

1. Karakteristik serbuk meliputi ukuran dan distribusi ukuran serbuk, bentuk serbuk, serta komposisi kimia serbuk.
2. *Mixing* atau *blending* (pencampuran serbuk)
3. Kompaksi (penekanan)
4. *Sintering* (pemanasan)

Tahapan-tahapan di atas akan mempengaruhi sifat mekanik dan sangat erat kaitannya dengan mikrostruktur dari produk yang dihasilkan.



**Gambar 2.3.** Tahapan proses metalurgi serbuk[8].

Dalam pembuatan komposit aluminium grafit, apabila menggunakan proses peleburan (pembuatan dari fasa cair), maka masalah yang timbul ialah tidak adanya *wettability* antara logam aluminium dan grafit. Pembuatan material *bearing* dengan metode metalurgi serbuk memberikan keuntungan tersendiri karena dapat menghasilkan *self lubricating bearing*, yakni bantalan yang tidak memerlukan perawatan/pemberian pelumas pada pemakaiannya. Hal ini dikarenakan *bearing* tersebut telah memiliki sendiri penampungan pelumas pada pori-pori yang terbentuk akibat proses metalurgi serbuk, sedangkan pelumas dapat dimasukkan secara impregnasi ke dalam pori-pori *bearing* tersebut.

#### **II.4.1 Karakteristik serbuk**

Karakteristik serbuk awal dapat mempengaruhi sifat serbuk dari logam yang akan dihasilkan dan juga tingkah laku serbuk logam selama pemrosesan. Karakteristik dasar serbuk tersebut meliputi ukuran serbuk, distribusi ukuran serbuk, bentuk serbuk, berat jenis serbuk, mampu alir (*flowability*), dan mampu tekan (*compressibility*).

##### **II.4.1.1 Ukuran dan distribusi ukuran partikel serbuk**

Ukuran partikel dapat didefinisikan sebagai ukuran linear partikel oleh analisa ayak[9]. Ukuran partikel akan menentukan besarnya densitas dan porositas, serta sifat mekanis material serbuk hasil kompaksi (bakalan). Semakin kecil (halus) ukuran partikel serbuk, maka densitas bakalan (*green density*) akan semakin besar. Serbuk logam yang sesuai untuk proses metalurgi serbuk umumnya memiliki ukuran dengan kisaran antara 0,1 – 1000  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} \cong 0,0004 \text{ inch}$ ). Pada umumnya ukuran partikel serbuk yang berbentuk bulat dapat ditentukan berdasarkan ukuran diameternya. Akan tetapi untuk partikel serbuk yang berbentuk tidak beraturan (*irregular*) sangat sulit menentukannya. Terdapat beberapa teknik pengukuran yang dapat dilakukan untuk menentukan ukuran partikel serbuk, yakni dengan menggunakan mikroskop, pengayakan (*screening*), teknik sedimentasi, *light scattering*, konduktivitas listrik, *light blocking*, dan sinar-X[10].

Beberapa pengaruh ukuran partikel serbuk terhadap karakteristik serbuk, antara lain[11]:

- Ukuran partikel yang halus sangat diperlukan untuk kompaksi serbuk yang keras atau getas seperti *tungsten* (W) dan alumina ( $Al_2O_3$ ) karena dengan semakin tingginya gesekan antarpartikel akan membantu meningkatkan kekuatan adhesi bakalan untuk memudahkan dalam proses penanganan selanjutnya.
- Serbuk-serbuk yang halus mempunyai luas permukaan kontak antarpartikel lebih banyak sehingga akan meningkatkan mekanisme ikatan antarpartikel secara difusi saat proses sinter, tetapi sangat sulit memperoleh densitas kompaksi yang seragam dengan luas bagian yang besar.
- Serbuk-serbuk yang kasar memiliki kepadatan yang seragam saat dilakukan kompaksi, tetapi luas permukaan kontak antarpartikel menjadi kecil yang mengakibatkan proses difusi pada saat dilakukan *sintering* kurang baik sehingga menyebabkan terjadinya banyak pori dan menurunkan sifat mekanik produk metalurgi serbuk.

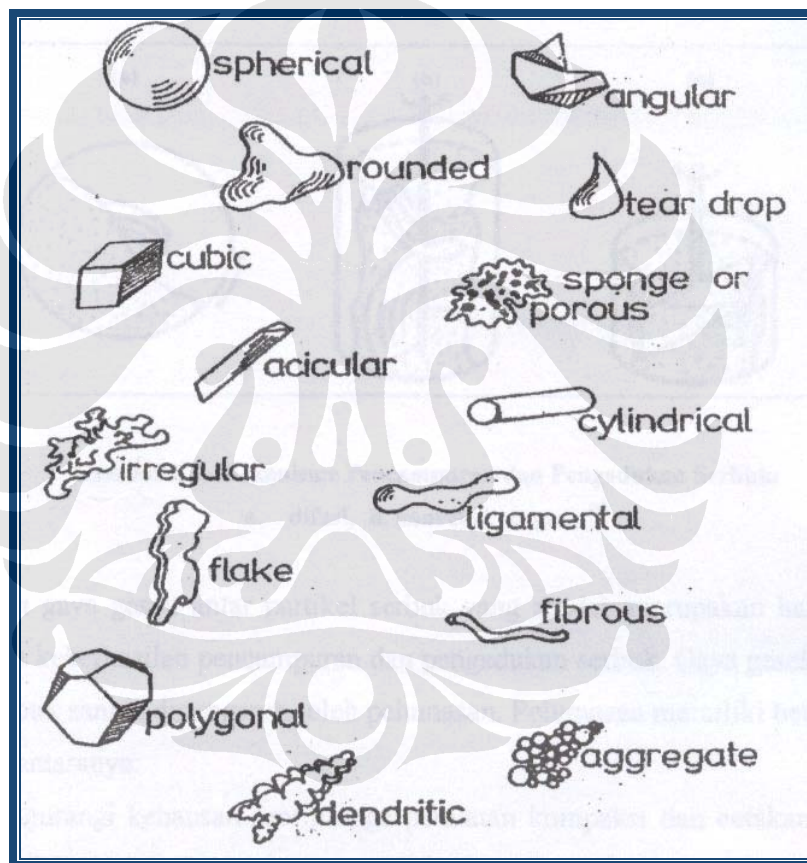
Distribusi ukuran partikel serbuk menyatakan distribusi atau sebaran serbuk untuk ukuran tertentu yang bertujuan untuk menampilkan hasil pengukuran kerapatan maksimum suatu partikel. Distribusi ukuran partikel serbuk ini sangat menentukan kemampuan partikel dalam mengisi ruang kosong antarpartikel untuk mencapai volume terpadat yang pada akhirnya akan menentukan besarnya densitas dan porositas, serta kekuatan dari bakalan.

#### **II.4.1.2 Bentuk partikel serbuk**

Bentuk partikel serbuk merupakan hal penting yang mempengaruhi sifat massa serbuk, seperti efisiensi pepadatan (*packing efficiency*), mampu alir (*flowability*), dan mampu tekan (*compressibility*). Bentuk partikel dapat memberikan informasi mengenai proses fabrikasi serbuk dan membantu menjelaskan karakteristik proses. Berdasarkan standar ISO 3252, bentuk partikel serbuk diklasifikasikan sebagai berikut[11]:

1. *Acicular* : berbentuk jarum

2. *Angular* : berbentuk polihedral kasar dengan tepi tajam
3. *Dendritic* : berbentuk kristalin dan bercabang
4. *Fibrous* : berbentuk serabut yang beraturan atau tidak beraturan
5. *Flaky* : berbentuk serpihan
6. *Granular* : berbentuk tidak beraturan dan hampir bulat
7. *Irregular* : berbentuk tidak beraturan dan tidak memiliki simetri
8. *Nodular* : berbentuk bulat dan tidak beraturan
9. *Spheroidal* : berbentuk bulat



**Gambar 2.4.** Bentuk partikel serbuk[10].

Bentuk partikel serbuk akan mempengaruhi luas permukaan serbuk dan gesekan antarpartikel serbuk. Hal ini akan mempengaruhi perpindahan serbuk ketika dilakukan penekanan pada saat proses kompaksi. Peningkatan luas permukaan partikel (semakin kecil ukuran partikel, semakin tidak beraturan

bentuk partikel, semakin kasar permukaan partikel) akan meningkatkan reaktivitas kimia serbuk. Hal tersebut juga akan meningkatkan penyerapan gas dan uap air dari lingkungan sehingga akan terbentuk oksida-oksida pada permukaan partikel yang dapat mengganggu proses kompaksi dan sinter[11].

#### II.4.1.3 Berat jenis serbuk

Berat jenis serbuk biasa dinyatakan dalam satuan  $\text{gram/cm}^3$ . Secara harfiah, berat jenis serbuk didefinisikan sebagai tingkat kerapatan dari serbuk. Dalam proses metalurgi serbuk terdapat beberapa istilah mengenai berat jenis serbuk, yakni:

- ✘ *Apparent density* atau *bulk density* didefinisikan sebagai berat per satuan volume dari serbuk dalam keadaan (relatif) bebas tanpa agitasi[10].
- ✘ *Tap density* didefinisikan sebagai berat jenis tertinggi yang dicapai dengan virasi tanpa aplikasi tekanan luar[10].
- ✘ *Green density* didefinisikan sebagai berat jenis serbuk setelah serbuk mengalami penekanan kompaksi untuk proses pemanasan (*sintering*)[9].
- ✘ *Theoretical density* didefinisikan sebagai berat jenis sesungguhnya dari material serbuk ketika material serbuk tersebut ditekan hingga menghasilkan serbuk tanpa pori[9].

Kekuatan bakalan (*green strength*) dihasilkan dari ikatan antarpartikel yang terjadi saat serbuk dilakukan proses kompaksi. Kekuatan bakalan dapat ditingkatkan dengan cara[11]:

- Menggunakan serbuk yang berukuran halus
- Menggunakan serbuk dengan bentuk partikel yang tidak beraturan dan permukaan yang kasar
- Meningkatkan tekanan kompaksi
- Mengurangi kontaminasi permukaan partikel dengan udara
- Mengurangi jumlah pelumas atau zat aditif pada serbuk

Berat jenis bakalan yang dihasilkan dari proses kompaksi terkadang tidak homogen sehingga dilakukan beberapa cara yang dapat mengurangi terjadinya ketidakhomogenan tersebut, diantaranya ialah[9]:



- ▶ Memberi pelumas untuk mengurangi gesekan
- ▶ Mengatur perbandingan dimensi cetakan antara tinggi dengan lebar rongga cetakan ( $L/D$ ), semakin besar ( $L/D$ ) maka distribusi akan semakin besar. Oleh karena itu, perbandingan  $L/D$  sebaiknya kecil sehingga distribusi serbuk akan 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 dimulai dari tekanan terendah kemudian ditingkatkan secara bertahap sampai titik optimum

#### **II.4.1.4 Mampu alir serbuk (*flowability*)**

Mampu alir serbuk (*flowability*) merupakan karakteristik yang menggambarkan sifat alir serbuk dan kemampuan serbuk untuk memenuhi ruang cetakan[9]. Karakteristik serbuk seperti berat jenis (*apparent density*) seringkali dihubungkan dengan gesekan antarpartikel. Pada umumnya faktor-faktor yang mengurangi gesekan antarpartikel atau meningkatkan berat jenis (*apparent density*), seperti partikel bulat dan halus, akan meningkatkan mampu alir serbuk[11].

#### **II.4.1.5 Mampu tekan serbuk (*compressibility*)**

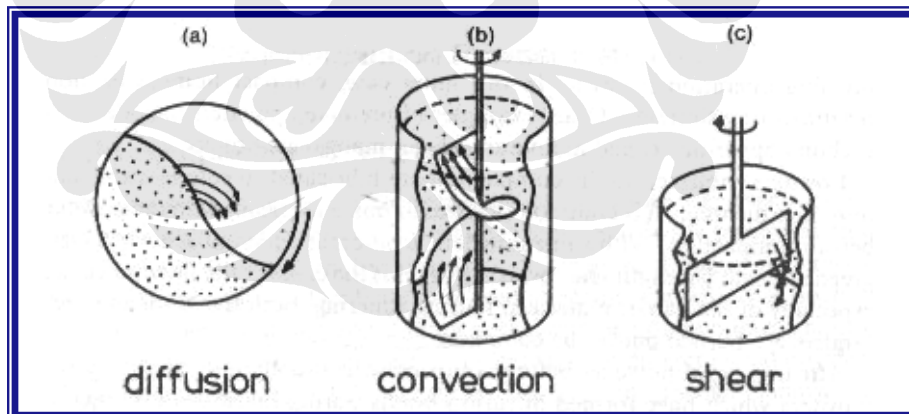
Mampu tekan serbuk (*compressibility*) merupakan perbandingan volume serbuk mula-mula dengan volume benda yang ditekan yang nilainya berbeda-beda tergantung distribusi ukuran serbuk dan bentuk butirnya[9]. Besarnya jumlah pemadatan yang dapat diterima suatu serbuk dengan memberikan tekanan terhadap serbuk merupakan mampu tekan serbuk. Besarnya mampu tekan serbuk dapat dipengaruhi oleh efek gesekan antarpartikel. Serbuk yang memiliki bentuk lebih teratur, lebih halus, dan sedikit porositas antarpartikel akan memiliki mampu tekan dan *green density* yang lebih tinggi dibandingkan serbuk yang kasar.

#### II.4.1.6 Pencampuran dan pengadukan partikel serbuk

Pencampuran dan pengadukan partikel serbuk didefinisikan sebagai proses bercampurnya serbuk secara sempurna dengan masing-masing besaran komposisi guna menghasilkan serbuk yang homogen[12]. Dalam pencampuran dan pengadukan serbuk, variabel yang berpengaruh adalah jenis material, ukuran partikel, jenis pengadukan, ukuran pengaduk, dan waktu pengadukan. Nilai gaya gesek antarpartikel serbuk merupakan hal yang menentukan keberhasilan pencampuran dan pengadukan serbuk. Gaya gesek antarpartikel serbuk dipengaruhi oleh efisiensi pencampuran, pelumasan, dan pengeringan[9].

Mekanisme yang terjadi selama proses pencampuran serbuk tergantung dari metode pencampuran (*mixing*) yang digunakan, yaitu[9]:

- ▶ Difusi : terjadinya pencampuran karena gerak antarpartikel 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 2.5.** Mekanisme pencampuran dan pengadukan partikel serbuk[10].

Beberapa dampak negatif apabila menggunakan pengadukan dan pencampuran terhadap serbuk, antara lain[9]:

- ▶ Partikel logam akan lebih sulit dikompaksi

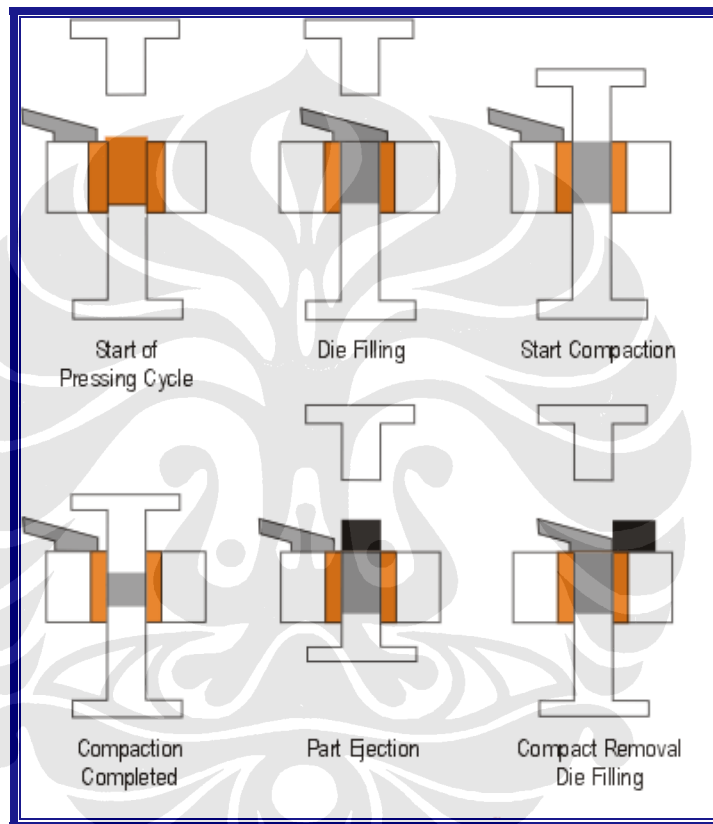
- ▶ Kontaminasi terhadap serbuk mungkin terjadi selama pengadukan dan pencampuran
- ▶ Desain alat pencampur yang buruk dapat mengakibatkan segregasi partikel

#### II.4.2 Kompaksi

Kompaksi berkaitan erat dengan tekanan yang diberikan dari luar untuk mendeformasi serbuk menjadi massa yang memiliki densitas tinggi, selain memberikan bentuk dan mengontrol ukuran serbuk. Artinya tekanan yang diberikan pada serbuk, perilaku mekanik, dan laju penekanan merupakan parameter proses utama yang menentukan hasil kepadatan serbuk. Peningkatan penekanan akan memberikan hasil *packing* yang lebih baik dan penurunan porositas. Ketika tekanan kompaksi dinaikkan, jumlah partikel yang mengalami deformasi plastis akan meningkat[13]. Pada tekanan rendah, aliran plastis dipusatkan pada kontak partikel. Ketika tekanan dinaikkan, aliran plastis yang homogen terjadi seluruhnya. Dengan penekanan yang cukup, seluruh partikel akan mengalami *work (strain) hardening* ketika jumlah porositas berkurang[10].

Kompaksi dapat dilakukan melalui *cold compaction* maupun *hot pressing* baik dengan proses penekanan satu arah (*single end compaction*) ataupun penekanan dua arah (*double end punch*). Pada penekanan satu arah, penekan (*punch*) bagian atas bergerak ke bawah, sedangkan pada penekanan dua arah terdapat dua buah *punch*, yakni *punch* atas dan *punch* bawah yang bergerak secara bersamaan dengan arah yang berlawanan. Untuk mendapatkan densitas bakalan yang homogen maka perbandingan tinggi diameter dan cetakan ( $L/D$ ) juga perlu diperhatikan. Semakin rendah nilai  $L/D$  maka semakin homogen densitas yang didapat[9]. Kontur gradien kehomogenan densitas yang dihasilkan oleh proses penekanan satu arah (*single end compaction*) tentunya akan berbeda bila dibandingkan dengan bakalan hasil kompaksi dengan menggunakan penekanan *double action*. Dimana untuk bakalan hasil kompaksi dengan penekanan *double action*, kehomogenan densitas cenderung merata di setiap bagian.

Pada akhirnya pilihan dari proses kompaksi bergantung pada kompleksitas *part* yang akan dibuat. Tahapan kompaksi memiliki pengaruh utama dalam pembentukan, dimensi, dan densitas dari *part*. Walaupun demikian, proses kompaksi tidak cukup menyediakan karakteristik yang diinginkan, dalam hal ini proses sinter memegang peranan penting dalam menentukan sifat dari material[10].



**Gambar 2.6.** Proses kompaksi serbuk dengan metode *single end punch*[14].

Kekuatan bakalan serbuk hasil kompaksi (*green strength*) terjadi karena adanya ikatan antarpartikel dan deformasi plastis yang terjadi saat kompaksi serbuk. Kekuatan bakalan umumnya dapat ditingkatkan dengan cara[11]:

- ✘ Menggunakan serbuk yang halus
- ✘ Menggunakan serbuk dengan bentuk partikel yang tidak beraturan dan permukaan yang kasar

- ✘ Meningkatkan *green density* dengan meningkatkan tekanan kompaksi
- ✘ Mengurangi kontaminasi permukaan partikel
- ✘ Mengurangi jumlah pelumas atau zat aditif pada serbuk

#### II.4.2.1 Perilaku serbuk saat kompaksi

Berikut ialah tahapan perilaku serbuk ketika dilakukan proses kompaksi, yakni[9]:

1. Penataulangan partikel serbuk (*rearrangement*)

Pada saat dimulai penekanan, serbuk mulai mengalami penyesuaian letak pada tempat-tempat yang lebih luas atau dengan kata lain belum terjadi deformasi pada partikel serbuk tersebut. Pergerakan dan pengaturan kembali partikel-partikel serbuk akibat adanya penekanan menyebabkan partikel serbuk tersusun lebih rata. Gerakan penyusunan kembali partikel ini dibatasi oleh adanya gaya gesek antarpartikel, atau antara partikel dengan permukaan cetakan, permukaan penekan (*punch*) dan inti. Pergerakan partikel cenderung terjadi di dalam massa serbuk pada tekanan yang relatif rendah sehingga kecepatan penekanan yang rendah akan memberikan kesempatan pada partikel untuk membentuk susunan yang terpadat[15].

2. Deformasi elastis partikel serbuk

Pada tahap ini serbuk mulai bersentuhan dan apabila penekanan dihentikan, maka serbuk akan kembali ke bentuk semula. Umumnya deformasi elastis dapat dilihat dengan dimensi bakalan yang sedikit membesar saat dikeluarkan dari cetakan. Kecenderungan deformasi elastis meningkat dengan menurunnya nilai modulus elastisitas[16].

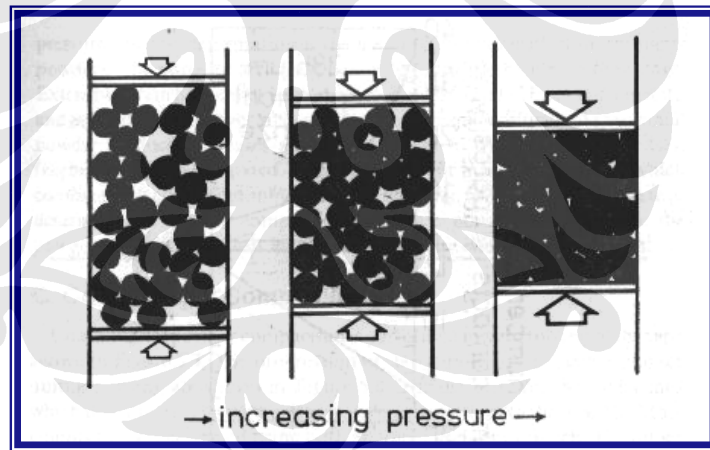
3. Deformasi plastis partikel serbuk

Deformasi plastis merupakan bagian terpenting dari mekanisme pemadatan (*densification*) selama proses kompaksi berlangsung. Semakin tinggi tekanan kompaksi yang diberikan akan menyebabkan semakin meningkatnya derajat deformasi plastis dan pemadatan yang terjadi. Ada beberapa faktor yang menentukan deformasi plastis, antara lain kekerasan dan perpindahan tegangan antarpartikel yang berdekatan[9]. Peningkatan

nilai kekerasan dapat terjadi saat deformasi plastis dan terjadi pula perpindahan tegangan antarpartikel yang berdekatan.

#### 4. Penghancuran partikel serbuk

Setelah serbuk mengalami deformasi plastis, serbuk mengalami *mechanical interlocking* (antarbutir saling mengunci). Mekanisme ini disebut ikatan *cold weld* yang merupakan ikatan antara dua permukaan butiran logam yang bersih yang ditimbulkan oleh gaya kohesi, tidak ada peleburan atau pengaruh panas. Pada umumnya permukaan serbuk akan teroksidasi, namun di bawah permukaan oksida terdapat permukaan yang bersih. Oleh karena itu, diperlukan pemecahan lapisan oksida sebelum terjadi *cold weld*. Ketika serbuk dilakukan penekanan, berat jenis serbuk naik, porositas menurun karena rongga berkurang. Selain itu, serbuk mengalami distribusi berat jenis yang tidak merata, pada bagian atas (dekat *punch*) berat jenis serbuk lebih besar dibandingkan pada bagian tengah[9].

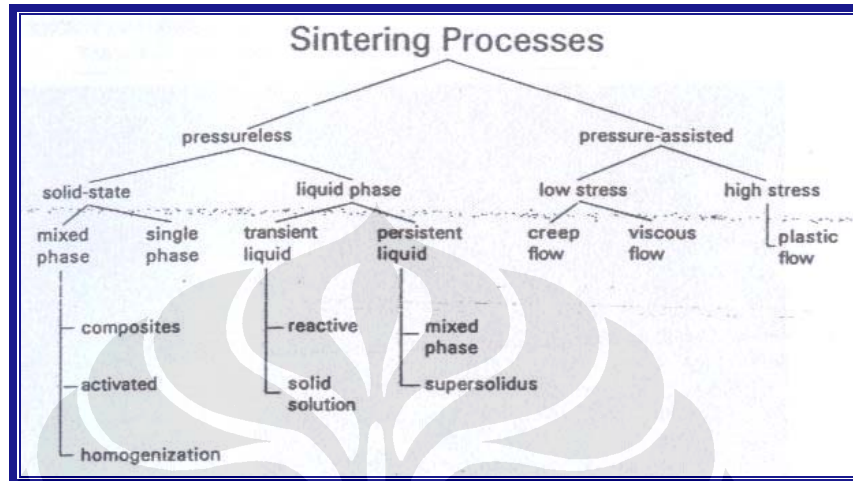


**Gambar 2.7.** Perilaku serbuk ketika kompaksi[10].

#### II.4.3 Proses sinter

Proses sinter merupakan metode untuk membuat produk dari bahan serbuk, dengan memanaskan material (di bawah titik leburnya) sehingga partikel-partikel tersebut berikatan satu sama lain[17]. Proses sinter dalam metalurgi serbuk memegang peranan yang cukup penting dalam menentukan sifat akhir dari produk yang akan dihasilkan. Proses sinter sendiri diartikan sebagai perlakuan panas

untuk mengikat partikel-partikel menjadi koheren, menghasilkan struktur padat melalui transport massa yang biasa terjadi dalam skala atom. Ikatan yang terbentuk akan meningkatkan kekuatan dan menurunkan energi dari sistem[5].



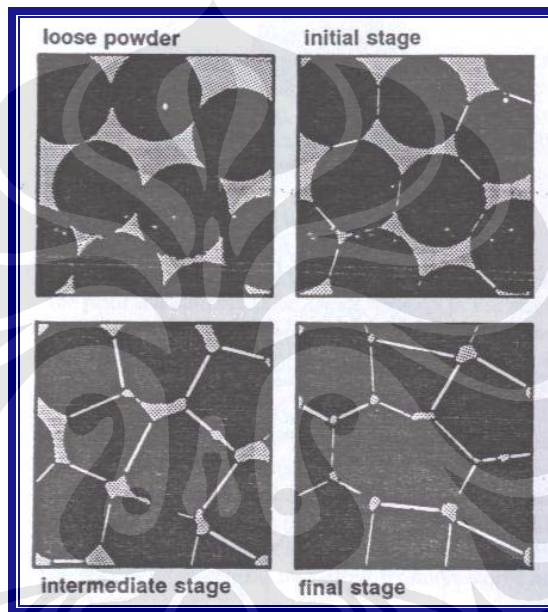
**Gambar 2.8.** Jenis-jenis proses sinter[5].

Pada gambar 2.8 dapat terlihat bahwa proses sinter dapat dilakukan dengan memberikan tekanan maupun tanpa tekanan (*pressureless*). Proses sinter tanpa tekanan dibagi lagi menjadi *solid state sintering* dan *liquid phase sintering*. Keberadaan dari cairan (*liquid*) pada siklus proses sinter dapat mempercepat transport massa, pepadatan, dan pengkasaran butir. Kebanyakan dari proses sinter yang dilakukan ialah tanpa pemberian tekanan (*pressureless sintering*). *Pressure-assisted sintering* merupakan teknik baru, pemberian tekanan selama proses sinter sangat berguna untuk memproses material yang tidak reaktif daripada menggunakan siklus proses sinter konvensional, contohnya material komposit dan intermetalik temperatur tinggi. Apabila tekanan yang diberikan rendah, menghasilkan pepadatan yang dikontrol oleh *diffusional creep*. Kemungkinan lain, pepadatan pada tekanan tinggi dipercepat apabila tegangan efektif melebihi kekuatan luluh material. Tekanan yang diberikan biasanya hidrostatik (*hot isostatic pressing*) atau uniaksial (*forging* dan *hot pressing*).

### II.4.3.1 Tahapan proses sinter

Pada proses sinter terdapat beberapa tahapan yang dialami oleh partikel-partikel serbuk, yakni[10]:

1. *Point contact*
2. *Initial stage*
3. *Intermediate stage*
4. *Final stage*



**Gambar 2.9.** Partikel serbuk pada berbagai tahapan proses sinter[5].

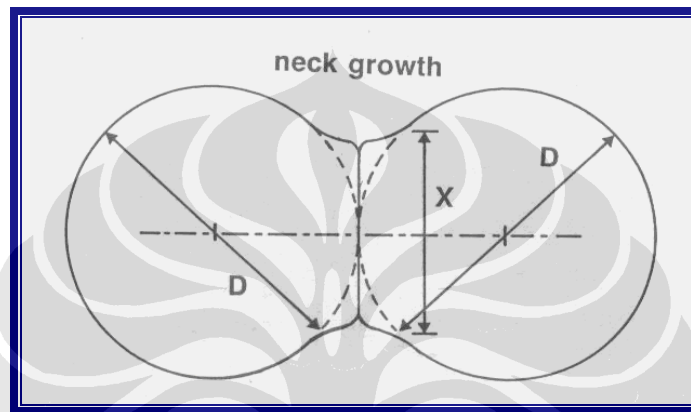
1. *Point contact* (ikatan awal antarpartikel)

Pada tahap ini, partikel lepas membentuk titik kontak antarpartikel lainnya pada orientasi acak. Kekuatan ikatan kontak yang terjadi masih lemah dan belum terjadi perubahan dimensi bakalan. Semakin tinggi berat jenis bakalan maka bidang kontak yang terjadi antarpartikel juga semakin banyak sehingga ikatan yang terjadi pada proses sinter pun semakin besar. Pengotor yang menempel pada batas kontak mengurangi jumlah bidang kontak sehingga kekuatan produk sinter menjadi turun.

2. *Initial stage*



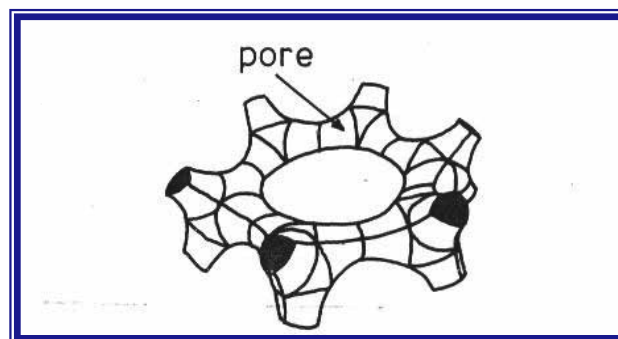
Pada tahap awal ini terjadi perpindahan massa yang menyebabkan terjadinya pertumbuhan leher antarpartikel[11]. Tahap ini berakhir saat rasio ukuran leher ( $X/D$ ) mencapai 0,3[5]. Pada tahap ini pula, pori mulai terpisah karena titik kontak membentuk batas butir. Selain itu, terjadi pula penyusutan (*shrinkage*), pengurangan luas permukaan, dan pepadatan.



**Gambar 2.10.** Tahap pertumbuhan leher dengan rasio  $X/D$ [5].

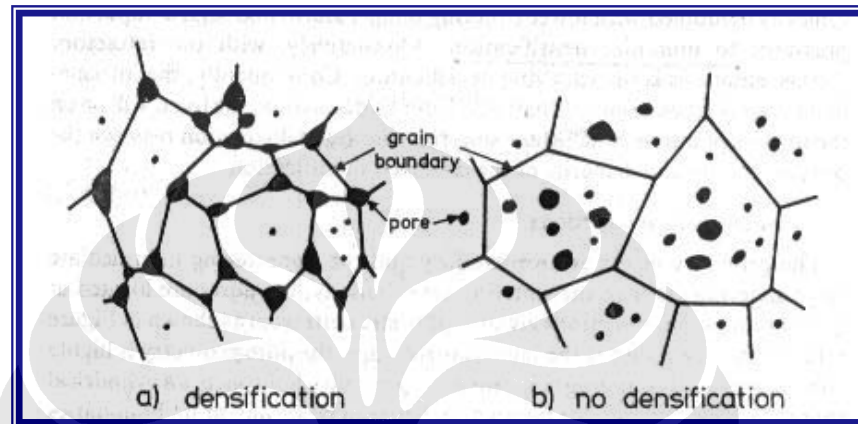
### 3. *Intermediate stage*

Tahap ini merupakan penentuan terhadap sifat mekanik bakalan 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 proses sinter. Mulanya, pori terletak pada bagian batas butir yang memberikan struktur pori[10].



**Gambar 2.11.** Struktur pori pada *intermediate stage*[10].

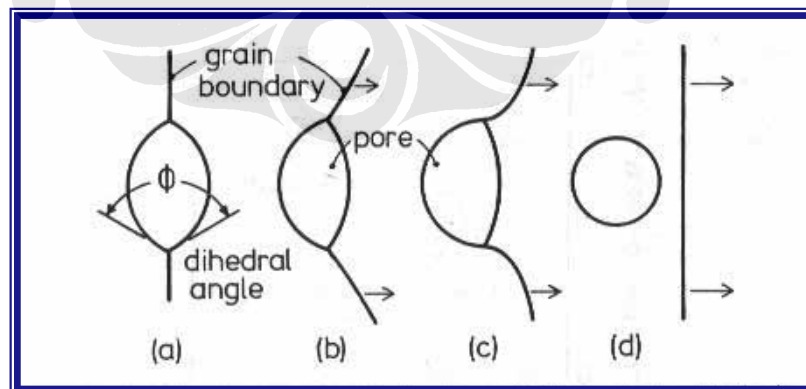
Sedangkan pemadatan (*densification*) yang terjadi pada tahap ini diikuti oleh difusi volume dan difusi batas butir[10]. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan sinter serta semakin kecil partikel serbuk, maka ikatan dan pemadatan yang terjadi juga semakin tinggi[18].



**Gambar 2.12.** Pemadatan pada proses sinter[10].

#### 4. *Final stage*

Pada tahapan ini proses berjalan lambat. Pori-pori yang bulat menyusut dengan adanya mekanisme difusi ruah (*bulk diffusion*). Pemisahan pori pada tahap akhir ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2.13.** Pemisahan dan pembulatan pori pada *final stage*[10].

Untuk pori yang berada di batas butir, sudut dihedral yang kecil menyebabkan gaya menjadi besar. Setelah batas butir meluncur, pori akan berdifusi ke batas butir sehingga mengalami penyusutan, dimana proses ini berlangsung lambat. Dengan waktu pemanasan yang berlangsung lama, pengkasaran 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[10].

Tabel 2.5 memperlihatkan perubahan luas permukaan, pepadatan, dan pengkasaran butir yang dialami oleh tiap-tiap tahapan pada proses sinter.

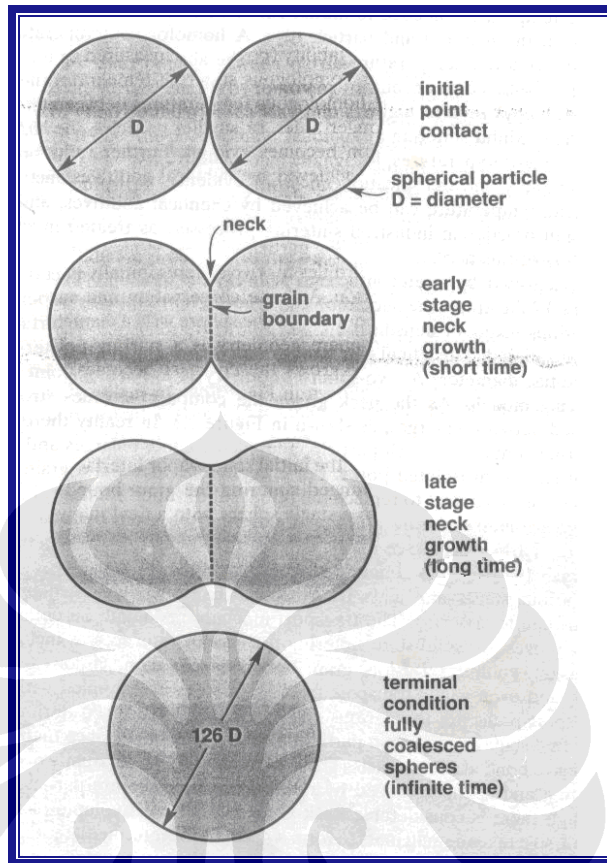
**Tabel 2.5.** Berbagai Tahapan pada Proses Sinter

<i>Stage</i>	<i>Process</i>	<i>Surface Area Loss</i>	<i>Densification</i>	<i>Coarsening</i>
<i>Adhesion</i>	<i>Contact formation</i>	<i>Minimal unless compacted at high pressures</i>	<i>None</i>	<i>None</i>
<i>Initial</i>	<i>Neck growth</i>	<i>Significant, up to 50% loss</i>	<i>Small at first</i>	<i>Minimal</i>
<i>Intermediate</i>	<i>Pore rounding and elongation</i>	<i>Near total loss of open porosity</i>	<i>Significant</i>	<i>Increase in grain size and pore size</i>
<i>Final</i>	<i>Pore closure, final densification</i>	<i>Negligible further loss</i>	<i>Slow and relatively minimal</i>	<i>Extensive grain and pore growth</i>

*Sumber: German, Randall M. Sintering Theory and Practice. John Willey and Sons, Inc. New York: 1996.*

#### II.4.3.2 *Solid state sintering*

*Solid state sintering* merupakan pemanasan yang dilakukan dengan melibatkan fasa padat, tanpa melibatkan fasa cair. Proses sinter membentuk ikatan padat antara partikel-partikel ketika pemanasan berlangsung. Ikatan-ikatan tersebut mengurangi energi permukaan dengan memindahkan kembali permukaan bebas, dengan eliminasi kedua dari luas batas butir melalui pertumbuhan butir. Dengan bertambahnya pemanasan, memungkinkan pengurangan volume pori, menuju *compact shrinkage*, walaupun pada proses sinter perubahan dimensi tidak diinginkan. Dengan demikian terdapat dua bentuk proses sinter dalam industri, yakni proses sinter yang berfokus pada pemadatan, dan yang berfokus pada kekuatan tanpa perlu melibatkan perubahan dimensi. Material struktural seperti silicon nitride, alumina, cemented carbides, steels, dan silicon carbide diproses *full density* dengan proses sinter pada temperatur relatif tinggi. Sedangkan struktur seperti kapasitor, *bearings*, *filters*, elektroda baterai, penyerap bunyi, *permeators*, *ionizers*, *casting cores*, dan alat mekanik dilakukan proses sinter di bawah kondisi dimana pemadatan diminimalkan[5].



**Gambar 2.14.** Perilaku partikel serbuk saat proses *solid state sintering*[5].

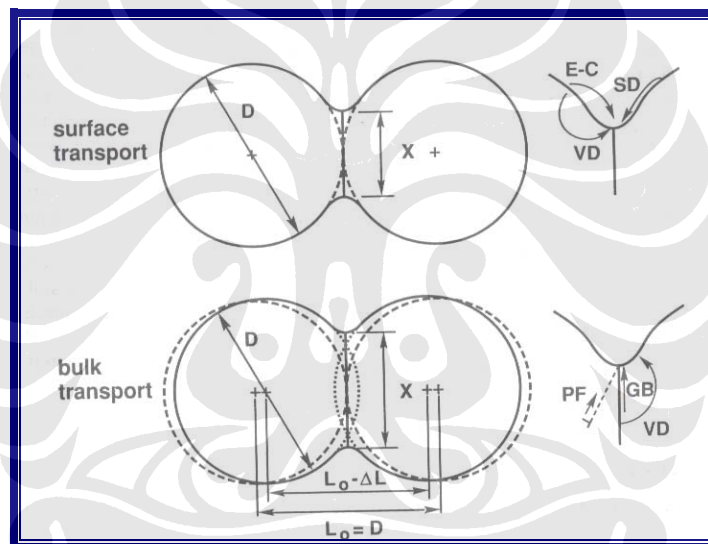
Mekanisme perpindahan merupakan pergerakan massa sebagai respon dari gaya penggerak (*driving force*). Mekanisme perpindahan sangat bergantung pada jenis material, ukuran partikel, tahapan proses sinter, temperatur, dan lain-lain[7]. Mekanisme perpindahan massa yang terjadi pada proses sinter terdiri dari dua tahap, yaitu[5,7]:

1. Transport permukaan (*surface transport*)

Tahap ini meliputi:

- ▶ Pertumbuhan leher tanpa perubahan kedudukan partikel tanpa pemadatan
- ▶ Merupakan hasil aliran massa yang berasal dan berakhir pada permukaan partikel
- ▶ Tidak ada perubahan dimensi (dimensi relatif konstan)

- ▶ Difusi permukaan dan penguapan-pengembunan adalah kontributor penting selama transport permukaan.
2. Transport ruah (*bulk transport*)
- Tahap ini meliputi:
- ▶ Meliputi difusi volume, difusi batas butir, aliran plastis dan viskos (khusus padatan amorf).
  - ▶ Terjadi perubahan *density*
  - ▶ Pergerakan dislokasi teramati pada beberapa kasus
  - ▶ Lebih aktif pada tahap sinter akhir (temperatur sinter yang lebih tinggi)



**Gambar 2.15.** Mekanisme transport massa[10].

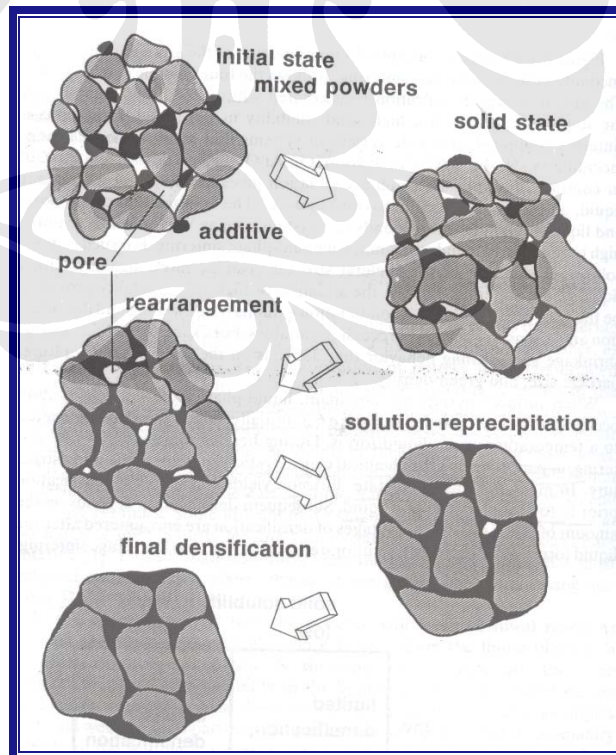
Proses sinter dilakukan di dalam dapur yang tertutup untuk mencegah pengaruh dari udara di sekeliling dapur. Pada umumnya perubahan yang terjadi dalam serbuk hasil kompaksi yang dilakukan proses sinter ialah sebagai berikut[11]:

- ✘ Partikel mulai saling berikatan sehingga meningkatkan konduktivitas listrik dan panas, serta kekuatan mekanis.
- ✘ Apabila temperatur dan waktu sinter diperpanjang maka kekuatan mekanis akan meningkat secara berkelanjutan.

- ✘ Peningkatan temperatur dan waktu sinter akan mengurangi jumlah porositas yang ada.
- ✘ Terjadi pertumbuhan butir sehingga hasil ukuran butir akan lebih besar daripada ukuran butir sebelum dilakukan proses sinter.
- ✘ Apabila kondisi atmosfer dapur baik, udara yang terperangkap dalam butir akan keluar dan partikel oksida berkurang.

#### II.4.3.3 *Liquid phase sintering*

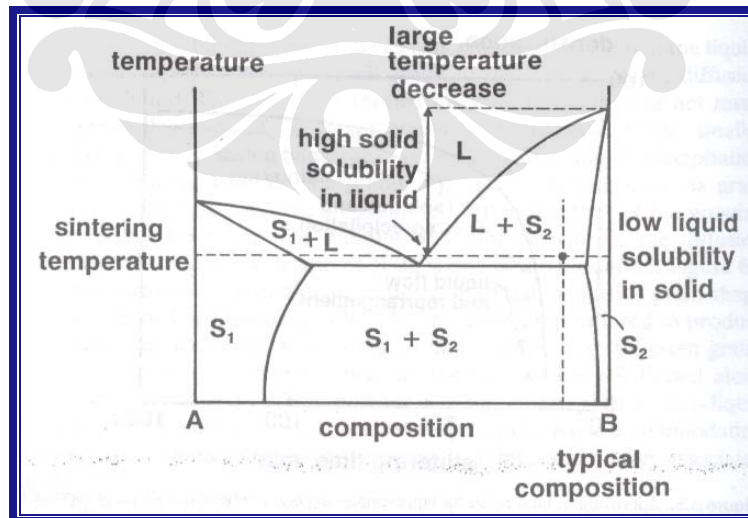
*Liquid phase sintering* merupakan proses sinter yang dilakukan pada temperatur tertentu dengan melibatkan fasa cair[10]. Syarat material logam yang dapat dilakukan proses *liquid phase sintering* adalah cairan logam harus dapat membentuk lapisan di sekeliling fasa padatan dan cairan logam harus memiliki kelarutan terhadap fasa padat, contohnya ialah Fe-Cu, Cu-Sn, W-Cu, dan lain-lain[7]. Gambar 2.16 menunjukkan tahapan yang terjadi pada proses *liquid phase sintering*.



**Gambar 2.16.** Perilaku partikel serbuk saat proses *liquid state sintering*[5].

Tiga tahapan yang terjadi setelah fasa cair terbentuk adalah pengaturan kembali fasa cair (*rearrangement*), diikuti kelarutan-pengendapan kembali (*solution reprecipitation*) dimana terjadi perpindahan massa, kemudian pemadatan akhir (*final densification*), seluruh pori terisi oleh fasa cair dengan jumlah fasa cair minimal 26% volume cairan[18].

Pada proses *liquid phase sintering*, terdapat dua kelarutan yang harus diperhatikan, yaitu kelarutan cairan dalam padatan dan kelarutan padatan dalam cairan. Kelarutan cairan dalam padatan yang tinggi tidak disukai karena mendorong fasa cair masuk ke dalam fasa padat. Selanjutnya terbentuk kelarutan yang tidak setimbang sehingga timbul porositas dan terjadi pengembangan selama proses sinter. Peristiwa timbulnya porositas ini sering disebut dengan istilah *swelling*. Sedangkan kelarutan padatan dalam cairan yang semakin besar sangat diinginkan karena mendorong fasa padat masuk ke dalam fasa cair sehingga mengisi porositas yang berada di dalam matriks. Peristiwa terisinya porositas ini disebut dengan istilah pemadatan. Kelarutan partikel padat tergantung pada ukuran partikel dimana semakin kecil ukuran partikel, maka kelarutan akan semakin tinggi. Kelarutan yang baik bermanfaat bagi pembasahan, kelarutan-pengendapan kembali, pengkasaran butir, dan perubahan dimensi selama proses sinter.

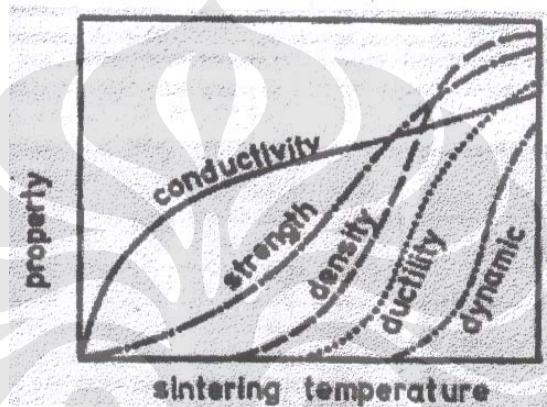


**Gambar 2.17.** Diagram fasa kelarutan dua fasa[5].



#### II.4.3.4 Temperatur sinter

Salah satu faktor yang mempengaruhi perpindahan massa pada proses sinter ialah temperatur. Dengan semakin meningkatnya temperatur sinter, maka sifat mekanis bakalan yang telah dilakukan proses sinter akan semakin meningkat pula (gambar 2.18). Sifat mekanis tersebut antara lain ialah kekerasan, kekuatan, ketahanan aus, umur fatik, kekuatan impak, ketangguhan, keuletan, dan konduktivitas listrik.



**Gambar 2.18.** Pengaruh temperatur sinter terhadap sifat mekanik[10].

Hal ini disebabkan karena dengan semakin meningkatnya temperatur sinter, maka akan mendorong terjadinya *interdiffusion* dari serbuk hasil kompaksi (*green compact*) dan meningkatkan kepadatan produk hasil proses sinter[18]. Akan tetapi, peningkatan temperatur sinter yang lebih tinggi dapat menimbulkan kerugian, seperti penyusutan (*shrinkage*), keakuratan dimensi berkurang, terjadinya pertumbuhan butir, biaya energi proses dan desain dapur lebih mahal.

Untuk material komposit, temperatur sinter yang digunakan adalah temperatur sinter dari matriks. Kisaran temperatur sinter untuk material komposit aluminium grafit adalah 595-625°C[12].

#### II.4.3.5 Waktu tahan sinter

Peningkatan waktu tahan sinter memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik yang hampir sama dengan kenaikan temperatur sinter, tetapi tidak sebesar pengaruh yang dihasilkan oleh peningkatan temperatur sinter. Semakin

tinggi waktu tahan sinter, temperatur sinter, dan *green density* maka densitas produk hasil proses sinter akan semakin tinggi pula. Namun, kerugian akibat meningkatnya waktu tahan sinter ialah meningkatnya persentase penyusutan, pertumbuhan butir, dan juga meningkatnya biaya proses[10].

Untuk material komposit, waktu tahan sinter yang digunakan adalah waktu tahan sinter dari matriks. Kisaran waktu tahan sinter untuk material komposit aluminium grafit adalah 10-30 menit[12].

#### **II.4.3.6 Atmosfer sinter**

Penggunaan atmosfer sinter bertujuan untuk mengontrol reaksi-reaksi kimia yang terjadi antara bakalan dengan lingkungannya[19]. Di samping itu, penggunaan atmosfer sinter juga bertujuan untuk mengontrol atau melindungi logam dari oksidasi selama proses sinter berlangsung[10]. 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 ke dalam permukaan bakalan[19]. Atmosfer yang mengandung unsur pereduksi biasanya digunakan pada proses sinter dengan tujuan memisahkan oksida-oksida yang terbentuk, serta mendorong terjadinya proses sinter dengan cara membersihkan dan sangat aktif pada permukaan partikel serbuk[14].

Terdapat enam jenis atmosfer yang dapat digunakan untuk melindungi bakalan, yakni hidrogen, amoniak, gas inert, nitrogen, vakum, dan gas alam. Sebagai contoh, atmosfer vakum sering digunakan sebagai atmosfer sinter karena prosesnya bersih dan kontrol atmosfer mudah. Atmosfer hidrogen juga disukai karena kemampuannya untuk mereduksi oksida dan menghasilkan atmosfer dekarburisasi untuk logam *ferrous*. Gas-gas inert seperti argon dan helium juga digunakan karena tidak bereaksi dengan bakalan[10].

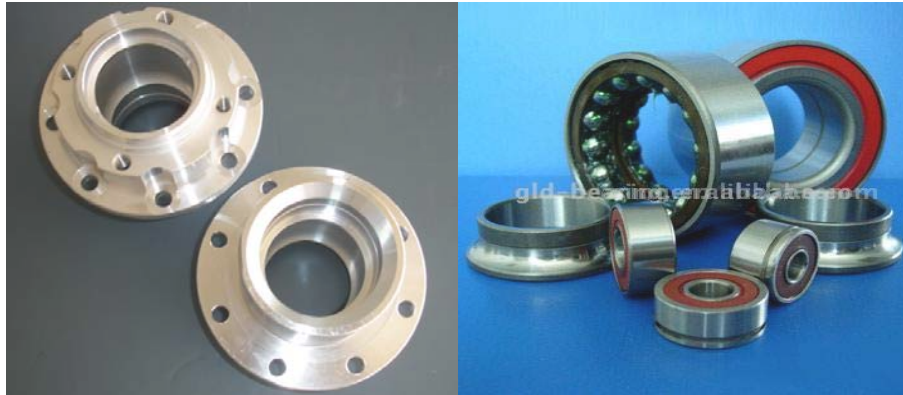
Pengontrolan atmosfer merupakan hal yang cukup penting selama proses sinter berlangsung. Namun bukan hanya atmosfer yang dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia, tetapi juga serbuk yang telah dikompaksi biasanya terkontaminasi oleh oksida-oksida, karbon, dan gas-gas yang terperangkap, sehingga ketika dilakukan pemanasan terjadi perubahan komposisi atmosfer sinter[10].

## II.5 APLIKASI KOMPOSIT MATRIKS LOGAM ALUMINIUM GRAFIT SEBAGAI MATERIAL *BEARING*

Komposit matriks logam aluminium produk metalurgi serbuk saat ini semakin berkembang penggunaannya. Aplikasi penggunaan komponen-komponen aluminium produk metalurgi serbuk semakin meningkat jumlahnya, seperti pada penggunaan di industri otomotif, industri pesawat luar angkasa, *power tools*, *appliances*, dan komponen-komponen struktural. Komposit matriks logam aluminium grafit saat ini mulai dikembangkan untuk aplikasi material *bearing* dimana umumnya material *bearing* yang digunakan ialah *bronze* (Cu-Sn) atau *iron graphite*.

Sifat utama yang dipersyaratkan untuk material *bearing* adalah ketahanan aus dan kekerasan material yang tinggi. Biasanya material aluminium paduan digunakan sebagai *bearing* pada mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) dan *roll neck* pada *steel mill*. Selain itu, *bearing* aluminium *alloy* juga digunakan pada *heavy tooling*, seperti *boring mills*, *presses*, *lathes*, *milling machines*, *grinding mills*, dan sebagai *hydraulic pump bushings*. *Aircraft landing gear assemblies*, *power shovels*, dan *track rollers* memanfaatkan aluminium *bearing* untuk menahan beban kejutan yang tinggi. *Rolling mill bearing* dibuat dengan mengecor paduan aluminium untuk meningkatkan kemampuan pembebanan dan kecepatan.

Paduan aluminium mempersyaratkan pelumasan yang cukup, permukaan akhir produk yang baik, dan kekerasan sekitar 85 HRB[20]. Besarnya porositas pada *bearing* yang terbuat dari aluminium mencapai 10% hingga 35% dari total volume[21]. Sedangkan kelemahannya adalah buruknya sifat *compatibility* dan kurangnya *embeddability*. Pada penggunaan di industri otomotif biasanya untuk memperbaiki kelemahan sifat-sifat tersebut digunakan *thin-lead babbitt* atau elektrodeposisi *lead-tin overlay*.



**Gambar 2.19.** Aluminium *bearing* pada komponen otomotif[22,23].

Material *bearing* aluminium *alloy* yang digunakan memiliki sifat-sifat yang dipersyaratkan untuk aplikasi material *bearing*, diantaranya[24]:

- ✘ Biaya operasi yang rendah
- ✘ Umur pakai yang panjang
- ✘ Ketahanan korosi yang tinggi terhadap zat pelumas
- ✘ *High mechanical compatibility* dengan baja
- ✘ Konduktivitas panas yang tinggi
- ✘ Kekuatan tekan dan fatik yang baik
- ✘ Berat yang ringan
- ✘ *Conformability* dan *embeddability*
- ✘ Kemampuan digunakan pada kecepatan tinggi
- ✘ Desain *monometallic* (padat)

Dalam mendesain *bearing*, ada 3 hal yang harus diperhatikan untuk memaksimalkan kinerja dari *bearing*, yaitu lingkungan operasi dari *bearing*, pelumasan yang sesuai, dan pemilihan material yang tepat. Syarat pertama untuk menentukan desain *bearing* adalah mengetahui kondisi penggunaannya, diantaranya[25]:

- ▶ Beban yang akan diterima
- ▶ Kecepatan pembebanan
- ▶ *Oscillating motion*
- ▶ Tingkat korosifitas lingkungan
- ▶ Pelumasan

- ▶ Temperatur kerja
- ▶ Frekuensi operasi
- ▶ Perbedaan kekerasan antara *bearing* dan shaft

*Cast* atau *wrought* aluminium *bearing* memiliki kemampuan membawa beban yang tinggi dan dapat menahan kecepatan yang sangat tinggi. Biasanya digunakan pada mesin sebagai *heavy-duty bearing* di bawah pembebanan sebesar 10.000 psi, dan kecepatan pada permukaan mencapai 84 m/s. Pada skala laboratorium, *bearing* telah diuji pada ribuan jam dengan operasi pembebanan hingga 12.000 psi. Dengan persiapan kelayakan *shaft*, pelumasan yang modern, dan filtrasi pelumas yang sangat baik, mampu menahan beban dan kecepatan hingga level yang sangat tinggi.

Pada material *bearing*, pelumasan merupakan hal yang tak kalah penting karena pelumasan yang baik akan meningkatkan nilai ketahanan aus dari material. Pada komposit matriks logam aluminium grafit, proses pembuatan material *bearing* digunakan dengan metode metalurgi serbuk dengan tujuan untuk mendapatkan material berpori. Selain itu, *bearing* dengan material komposit matriks logam aluminium grafit merupakan jenis *self lubricating bearing* karena adanya unsur grafit yang dapat bersifat sebagai pelumas. Pada saat operasi, pelumas dapat disimpan pada pori dan dapat membasahi permukaan *bearing* dengan adanya gaya kapilaritas yang bertujuan mengurangi friksi dari *bearing* tersebut. Sehingga *bearing* dapat digunakan pada jangka waktu yang lama tanpa diperlukan penambahan pelumas dan sangat efektif apabila digunakan untuk komponen yang digunakan pada bagian yang sulit dijangkau. Untuk meningkatkan sifat *self lubricating* dapat ditambahkan 1% hingga 3,5% grafit[21].