

BAB II

DASAR TEORI

2.1 KOMPOSIT

2.1.1 Definisi Komposit

Komposit merupakan material yang dihasilkan dari penggabungan secara makroskopis dua atau lebih material yang berbeda dan memiliki antar muka (*interface*) diantaranya keduanya. Material komposit dikembangkan untuk menciptakan material yang memiliki sifat yang lebih baik dari material konvensional dimana sifat dari material komposit merupakan hasil penggabungan sifat-sifat unggul material dasar penyusunnya (matriks dan penguat)[1]. Penggunaan komposit saat ini sangat luas dengan pada aplikasi struktural, electrical, thermal, dan tribological. 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 adalah[1] :

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

Sifat-sifat dari komposit secara umum bila 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 dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu[4]:

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

2.1.2 *Metal Matrix Composite*

Material jenis *Metal Matrix Composite* dikembangkan pertama kali untuk material aplikasi pada pesawat, diikuti aplikasi pada industri lainnya. Ekspansi material MMC untuk aplikasi pada industri mengalami perkembangan untuk menurunkan biaya atau harga dari komponen dan meningkatkan karakteristik sesuai dengan yang diinginkan[5,6]. *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[4,7]:

- 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[6]. 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[4]:

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*, *partikulat* 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.

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.

2.1.3 Interface dan Kemampuan Pembasahan (*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[4].

2. Electrostatic Bonding

Proses tarik menarik antara permukaan yang berbeda tingkat kelistrikkannya (*positive & negative charge*) dan terjadi pada skala atomic. Efektivitas terhadap jenis ikatan ini dapat menurun jika ada kontaminasi permukaan dan kehadiran gas yang terperangkap[4].

3. Chemical Bonding

Dibentuk oleh adanya group – group yang bersifat kimiawi pada permukaan fiber dan matriks. Kekuatan ikatan ditentukan oleh jumlah ikatan kimiawi menurut luas dan tipe ikatan kimia itu sendiri[4].

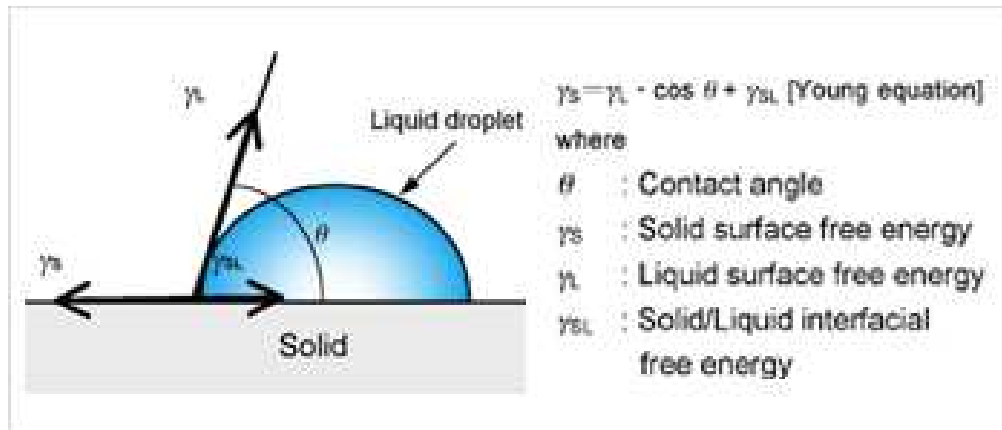
Wettability adalah kemampuan matriks untuk membasahi penguatnya, dalam hal ini adalah kemampuan aluminium dalam membasahi grafit. Kemampuan pembasahan yang baik merupakan syarat utama untuk mendapatkan ikatan yang baik antara penguat yang berbentuk partikulat dengan matriksnya[8]. Kemampuan pembasahan ini dapat dilihat dari besarnya sudut kontak antara fasa *liquid* dan permukaan fasa *solid* yang besarnya tergantung dari tegangan permukaan (energi bebas permukaan) antarmuka yang terlibat. Sudut kontak yang dimaksud adalah sudut kontak antara fasa *liquid-vapour* bertemu dengan antarmuka fasa *solid-liquid*. Apabila sudut kontak kecil, maka pembasahan dikatakan sangat baik karena cairan akan menyebar lebih luas menutupi permukaan. Namun, jika sudut kontak besar maka kemampuan pembasahannya jelek. Pada sudut kontak lebih dari atau sama dengan 90° maka permukaan dapat dikatakan bersifat *non-wettable* (tidak membasahi sama sekali). Pada sudut kontak kurang dari 90° maka dapat dikatakan permukaan bersifat *wettable*[8].



Gambar 2.1. Perbandingan sifat fisik yang dihasilkan dari perbedaan sudut kontak[8].

Wettability atau biasa juga disebut dengan kemampuan pembasahan dapat dijelaskan dengan persamaan dibawah ini, yaitu:

- Young Equation



Gambar 2.2. Skematis Young Equation[8].

Mengacu pada penjumlahan vektor dari gambar diatas :

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{\gamma_S - \gamma_{SL}}{\gamma_L}$$

Dimana *wetting* sempurna akan terjadi apabila $\theta = 0^\circ$ dan apabila $\theta = 180^\circ$ maka tidak terbasahi[8]. Seperti diketahui bahwa aluminium dan grafit memiliki kemampuan pembasahan yang buruk, maka dalam aplikasi pembuatan suatu komponen, salah satu cara untuk meningkatkan *wettability* yang baik antara matriks dan penguatnya adalah dengan menambahkan *wetting agent*.

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 pembasahan menurunkan energi bebas sistem. Dengan demikian matriks dan penguat akan bertemu dalam suatu kontak sehingga terbentuk ikatan antar muka yang kuat.

2.2 MATERIAL

2.2.1 Aluminium

Pada pembuatan komposit, serbuk aluminium yang berfungsi sebagai matriks banyak digunakan karena memiliki karakteristik yang menguntungkan sehingga membuat aluminium banyak digunakan pada aplikasi di dunia otomotif, seperti densitas yang rendah, memiliki ketahanan korosi yang baik, dan thermal ekspansi yang rendah. Selain itu, aluminium banyak diproduksi karena mudah

diperoleh, harga yang relatif murah serta memiliki sifat-sifat fisik dan mekanik yang menguntungkan[9,10]. Produk metalurgi serbuk dengan matriks aluminium menempati urutan kedua setelah besi-baja dalam hal volume produksi[6]. Salah satunya adalah untuk aplikasi *bearing*, yaitu *self lubricating bearing*. Tabel 2.1 dan 2.2 dibawah ini merupakan sifat fisik dan mekanik yang dimiliki aluminium.

Tabel 2.1. Sifat fisik aluminium

Sifat fisik	Satuan SI	Nilai
Densitas, 20°C	g/cm ³	2,7
Berat atom	g/mol	26,97
Titik lebur	°C	660,4
Titik didih	°C	2467
Jari-jari atom	nm	0,143
Jari-jari ionik	nm	0,053
Nomor valensi	-	+3
Nomor atom	-	13
Warna	-	Putih keperakan
Struktur kristal	-	FCC

Sumber: ASM Specially Handbook. Aluminum & Aluminum Alloys. Ohio: 1993.

Callister, William D, Jr. Materials Science and Engineering An Introduction, 6th Edition. John Wiley & Sons, Inc. Singapura: 2003.

Tabel 2.2. Sifat mekanik dan thermal aluminium

Sifat mekanik	Satuan SI	Nilai
Modulus elastisitas	GPa	71
Kekerasan	VHN	19
Kekuatan luluh	MPa	25
Ketangguhan	MPa√m	33
Rasio poisson	-	0,35
Kapasitas panas	J/Kg °C	917
Konduktivitas panas	W/m ^o K	237
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*, 6th Edition. John Wiley & Sons, Inc. Singapura: 2003.

Sedangkan serbuk aluminium yang umumnya dihasilkan dari proses atomisasi memiliki karakteristik seperti pada tabel 2.3 berikut. Nilai berat jenis dibawah ini merupakan fungsi distribusi ukuran partikel.

Tabel 2.3. Karakteristik serbuk aluminium

Sifat	Satuan SI	Nilai
<i>Apparent density</i>	g/cm ³	0,8 – 1,3
<i>Tap density</i>	g/cm ³	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.

2.2.2 Grafit

Grafit pada matriks aluminium akan berfungsi sebagai penguat dan akan meningkatkan ketahanan aus dan friksi dari komposit aluminium grafit. Grafit yang ditambahkan dalam pembuatan *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 berkisar 0,5% - 1,8%. Untuk *bearing* grafit berkandungan tinggi, kadar grafit antara 3% - 5% [11]. Sifat fisik dapat dilihat pada tabel 2.4 dan 2.5 berikut ini [12]:

Tabel 2.4. Sifat fisik grafit

Sifat fisik	Satuan SI	Nilai
Densitas, 20°C	g/cm ³	2,25
Berat atom	g/mol	12,011
Titik lebur	°C	3500

Titik didih	°C	4830
Jari-jari atom	nm	0,071
Jari-jari ionik	nm	0,016
Nomor valensi	-	+4
Nomor atom	-	6
Warna	-	Hitam
Struktur kristal	-	Hexagonal

Sumber: Steven. H, Michael. "Pengaruh %Vf Grafit Terhadap Karakterisasi Komposit Matriks Logam Al/C Grafit Produk Metalurgi Serbuk". Depok. 2006.

Tabel 2.5. Sifat mekanik dan thermal grafit

Sifat mekanik	Satuan SI	Nilai
Modulus elastisitas	Gpa	8-15
Kekuatan tekan	Mpa	20-200
Porositas	%	0.7-53
Tahanan listrik	Ohm	1,375 x 10 ⁶
Konduktivitas panas	kal/gr°C	0,057
Ketahanan korosi	-	Sangat baik
<i>Machinability</i>	-	Baik
<i>Formability</i>	-	Baik

Sumber: Steven. H, Michael. "Pengaruh %Vf Grafit Terhadap Karakterisasi Komposit Matriks Logam Al/C Grafit Produk Metalurgi Serbuk". Depok. 2006.
www.azom.com

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.

2.2.3 Tembaga (Cu)

Pada proses pembuatan MMC secara metalurgi serbuk, serbuk tembaga berfungsi sebagai *wetting agent*. Berikut ini diberikan sifat-sifat fisik dan *thermal* yang dimiliki oleh tembaga dalam tabel 2.6 dan 2.7 dibawah ini.

Tabel 2.6. Sifat fisik tembaga

Sifat fisik	Satuan SI	Nilai
Densitas, 20°C	g/cm ³	8,96
Berat atom	g/mol	63,5
Titik lebur	°C	1083
Titik didih	°C	2578
Diameter atom	Nm	0,256
Nomor valensi	-	+2
Warna	-	Merah bata
Struktur kristal	-	FCC

Sumber: Callister, William D, Jr. *Materials Science and Engineering An Introduction*, 6th Edition. John Wiley & Sons, Inc. Singapura: 2003.
Windi. J, Mario. "Pengaruh Penambahan Fraksi Berat Grafit Terhadap Sifat Mekanik Bronze Bearing Cu-Sn-Zn-C Grafit". Depok. 2005.

Tabel 2.7. Sifat mekanik dan thermal tembaga

Sifat mekanik	Satuan SI	Nilai
Modulus elastisitas	GPa	145
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0,34
Kekuatan luluh	MPa	120
Elongasi	%	45
Konduktivitas panas	W/°C	403
Koefisien Muai Panas	10 ⁻⁶ /°C	16,6
Kapasitas Panas	J/Kg°C	386

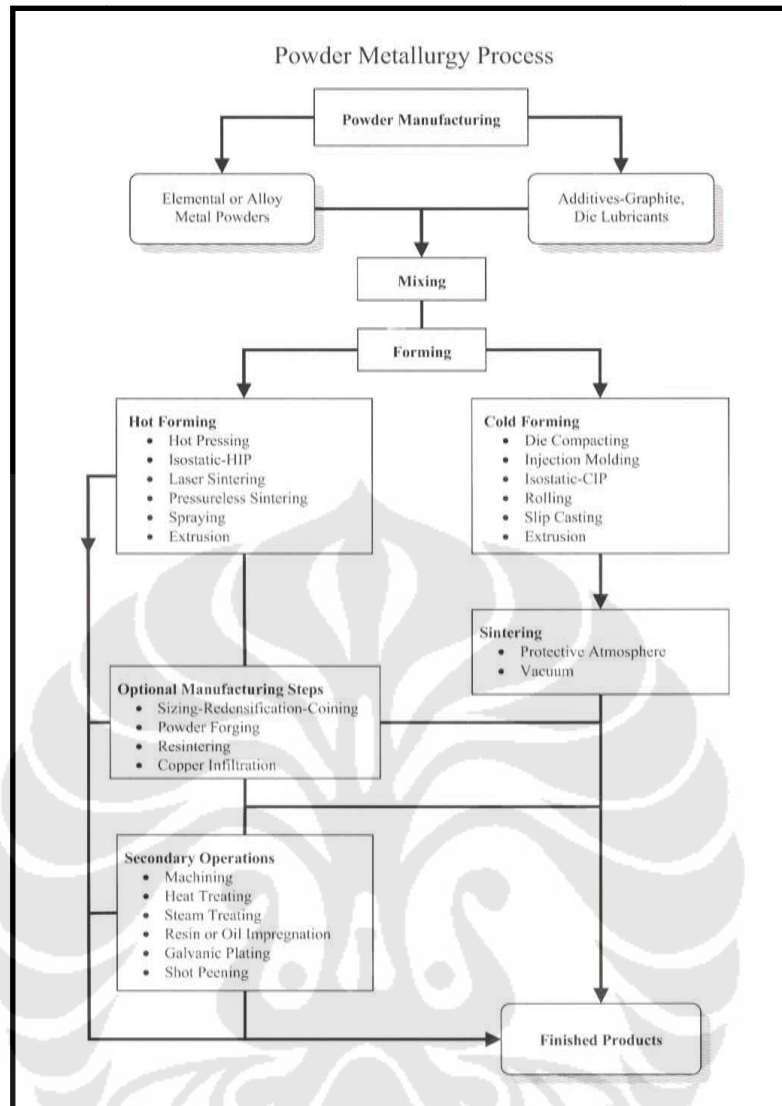
Sumber: Callister, William D, Jr. *Materials Science and Engineering An Introduction*, 6th Edition. John Wiley & Sons, Inc. Singapura: 2003.
Windi. J, Mario. "Pengaruh Penambahan Fraksi Berat Grafit Terhadap Sifat Mekanik Bronze Bearing Cu-Sn-Zn-C Grafit". Depok. 2005.

2.3 PROSES METALURGI SERBUK

Metalurgi serbuk merupakan salah satu pilihan cara pembuatan untuk menghasilkan suatu komponen. Dalam pembuatan komposit aluminium grafit, apabila menggunakan proses pembuatan dari fasa cair, masalah yang terjadi adalah tidak adanya *wettability* antara grafit dan aluminium cair itu sendiri. Metalurgi serbuk merupakan suatu bidang ilmu yang mempelajari mengenai proses yang berkaitan dengan serbuk logam meliputi pembuatan (fabrikasi) dari serbuk logam itu sendiri, karakteristik serbuk, hingga konversi serbuk logam menjadi suatu komponen produk. Proses metalurgi serbuk ini melibatkan proses hukum dasar panas (sinter serbuk), pengerjaan bentuk serbuk, sifat dan struktur serbuk menjadi serbuk akhir[13]. Dari proses ini, densitas yang didapatkan mencapai 90% dari densitas teoritis. Keuntungan dari penggunaan proses ini adalah karena menghasilkan komponen rumit dengan batas toleransi dimensi tertentu. Pembuatan *bearing* dengan metode ini memberikan keuntungan tersendiri karena dapat menghasilkan *self-lubricating bearing* yaitu bantalan yang tidak memerlukan perawatan/pemberian pelumas pada pemakainannya karena telah memiliki sendiri penampungan pelumas pada pori-pori yang terbentuk saat proses metalurgi serbuk[2].

Ada beberapa tahapan dalam proses metalurgi serbuk antara lain:

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)



Gambar 2.3. Skematis Proses Metalurgi Serbuk[14].

Proses pembuatan *bearing* dengan menggunakan metode metalurgi serbuk memiliki keunggulan yaitu dapat mengontrol jumlah pori pada *bearing*. Selain itu, keunggulan proses metalurgi serbuk dibanding proses lainnya seperti pengecoran (*casting*) adalah kemampuannya untuk memfabrikasi komponen-komponen yang rumit dengan toleransi dimensi yang baik dan kualitas yang tinggi, konsumsi energi yang rendah, serta penggunaan bahan baku yang efisien[3]. Selain itu, dengan metalurgi serbuk, maka dapat dihindari segregasi dan *machining* yang biasa menjadi masalah dalam *casting*. Semua tahapan diatas akan mempengaruhi sifat mekanik, yang sangat erat hubungannya dengan struktur mikro metalurgi serbuk.

Berikut adalah beberapa keunggulan dan kerugian dari proses metalurgi serbuk[2,4,13]:

1. Keunggulan:

- ✓ Kemampuan untuk membuat komponen dengan tingkat kerumitan yang tinggi dan toleransi dimensi yang baik dan kualitas yang tinggi.
- ✓ Konsumsi energi yang rendah
- ✓ Penggunaan bahan baku yang efisien
- ✓ Biaya produksi murah dan ekonomis
- ✓ Proses pencampuran (*blending*) lebih mudah dibanding pengecoran
- ✓ Dapat meminimalisasi terjadinya reaksi-reaksi antar muka yang tidak diinginkan karena preparasi sample dilakukan pada kondisi temperatur rendah
- ✓ Meminimalisasi biaya machining
- ✓ Dapat memperhalus (*refine*) mikrostruktur daripada dengan metode konvensional ingot metallurgy
- ✓ Besarnya densitas dan porositas dapat dikontrol sesuai dengan yang diinginkan
- ✓ Dapat dilakukan proses kedua (*secondary process*) seperti: perlakuan panas dan pembentukan pada kondisi panas atau dingin, guna meningkatkan sifat-sifat mekanisnya

2. Kerugian

- ✗ Sulit untuk menghasilkan produksi secara massal
- ✗ Sulit untuk mendapatkan distribusi partikel yang merata pada produk
- ✗ Membutuhkan kebersihan proses dengan tingkat sangat tinggi
- ✗ Terbentuknya inklusi di dalam produk yang memberikan efek beracun
- ✗ Desain komponen harus dibuat sedemikian rupa sehingga dapat dengan mudah dikeluarkan daritakannya

Proses metalurgi serbuk untuk komponen dari aluminium dapat digunakan untuk berbagai industri terutama otomotif karena memiliki beberapa kelebihan-

kelebihan bila dibandingkan dengan material lain yaitu lebih ringan (*weight saving*), serta memiliki sifat konduktifitas sangat baik, dan mudah dibentuk[15].

2.3.1 Karakteristik Serbuk

Selain komposisi kimia yang menentukan sifat akhir komponen, sifat serbuk awal dari logam yang akan diproses juga mempengaruhi sifat produk akhir yang dihasilkan[15]. Hal yang penting untuk menentukan sifat mekanis dari bakalan hasil kompaksi serbuk-serbuk diantaranya penanganan serbuk (termasuk transportasi serbuk yang mungkin menyebabkan segregasi) dan karakteristik-karakteristik lainnya yang meliputi ukuran serbuk, berat jenis serbuk, mampu alir (*flowability*), dan mampu tekan (*compressability*) tersebut[16]. Sesuatu dapat dikatakan serbuk apabila merupakan suatu padatan yang memiliki ukuran dimensi lebih kecil dari pada 1 mm[13].

2.3.1.1 Ukuran dan Distribusi Partikel Serbuk

Ukuran partikel serbuk logam berpengaruh dapat didefinisikan sebagai ukuran linier partikel oleh analisa ayak[17]. Ukuran partikel biasanya dilambangkan dengan ukuran mikron (μm)[13]. Ukuran partikel akan berpengaruh terhadap porositas dan densitas bakalan serta sifat mekanisnya. Ukuran partikel juga akan menentukan stabilitas dimensi, pelepasan gas yang terperangkap dan karakteristik selama pencampuran. Semakin halus ukuran partikel, maka akan semakin besar berat jenis bakalan (*green density*) tersebut. Sedangkan distribusi ukuran partikel adalah pengelompokan besar partikel dalam berbagai ukuran yang bertujuan untuk menampilkan hasil pengukuran kerapatan maksimum suatu partikel. Data ukurannya digunakan untuk melukiskan hasil pengukuran dan asumsi bentuk partikel[17]. Distribusi partikel ini sangat berpengaruh terhadap kemampuan saling isi partikel untuk mendapatkan volume terpadat[12].

Serbuk logam untuk proses pembuatan metalurgi serbuk umumnya memiliki ukuran range 0,1 – 1000 μm . Pengaruh ukuran partikel serbuk terhadap karakteristik serbuk[16] :

1. Ukuran partikel serbuk yang halus umumnya lebih digunakan untuk proses kompaksi serbuk yang keras atau getas seperti tungsten dan alumina, karena dengan meningkatnya gesekan akan membantu meningkatkan kekuatan *adhesi* bakalan sehingga memudahkan proses penanganan berikutnya.
2. Serbuk-serbuk yang halus memiliki luas permukaan kontak antar partikel yang lebih banyak sehingga luasnya permukaan kontak ini akan meningkatkan mekanisme ikatan antar partikel secara difusi saat proses sinter. Namun, sulit untuk memperoleh berat jenis kompaksi yang seragam dengan luas area yang besar.
3. Dengan partikel serbuk yang kasar, maka dapat lebih mudah didapatkan berat jenis yang lebih seragam pada saat kompaksi, akan tetapi sifat hasil sinternya kurang baik dibandingkan dengan partikel yang lebih halus karena rendahnya luas kontak antar partikel yang menyebabkan sedikitnya difusi yang terjadi dan akhirnya menyebabkan banyaknya pori yang setelah sintering sehingga menurunkan sifat mekanik produk.

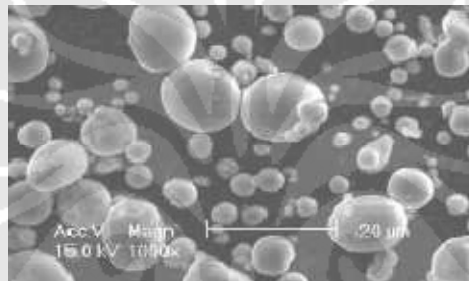
2.3.1.2 Bentuk Partikel Serbuk

Bentuk partikel serbuk merupakan faktor penting terhadap sifat massa serbuk, seperti efisiensi pemadatan, mampu alir dan mampu tekan. Bentuk partikel yang besar mempengaruhi besarnya kontak antar partikel sehingga besarnya gaya gesekan antar partikel dihubungkan dengan luas permukaan partikel serbuk[16]. Bentuk partikel memberikan informasi cara pembuatan serbuk dan menerangkan karakteristik prosesnya. Bentuk partikel serbuk juga berpengaruh terhadap kontak antar partikel serbuk dan perpindahan serbuk saat dikompaksi, yang pada akhirnya akan mempengaruhi perpindahan massa pada proses sinter. Dengan meningkatnya luas permukaan partikel akan meningkatkan pula reaktivitas serbuk. Hal ini akan meningkatkan penyarapan gas dan uap air dari lingkungan yang akan membentuk oksida-oksida pada permukaan partikel setelah kompaksi dan sinter.

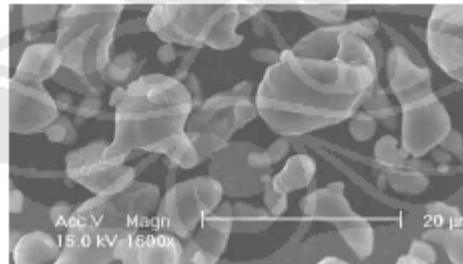
Bentuk serbuk aluminium yang dihasilkan tergantung dari cara fabrikasi serbuk itu sendiri. Berdasarkan standar ISO 3252, bentuk serbuk dapat diklasifikasikan sebagai berikut[16]:

1. *Spherical* : berbentuk bulat
2. *Angular* : berbentuk polihedral kasar dengan tepi tajam
3. *Acicular* : berbentuk jarum
4. *Irregular* : berbentuk tidak beraturan atau tidak mempunyai simetri
5. *Flake* : berbentuk serpihan
6. *Fibrous* : berbentuk serabut yang beraturan atau tidak beraturan
7. *Dendritic* : berbentuk kristalin dan bercabang
8. *Granular* : berbentuk tidak beraturan dan hampir bulat
9. *Nodular* : berbentuk bulat dan tidak beraturan

Perbedaan morfologi serbuk aluminium dengan pembuatan secara atomisasi gas dan udara dapat dilihat dari gambar dibawah ini.



Gambar 2.4. Serbuk aluminium berbentuk *spherical* hasil atomisasi gas (inert)[15].



Gambar 2.5. Serbuk aluminium berbentuk *irregular* hasil atomisasi udara[15].

2.3.1.3 Berat Jenis Serbuk

Berat jenis serbuk secara harfiah didefinisikan sebagai tingkat kerapatan dari serbuk. Pada metode metalurgi serbuk terdapat beberapa terminologi mengenai pengertian berat jenis, yaitu[13,18]:

1. *Apparent density* atau *bulk density* didefinisikan sebagai berat per satuan volume dari serbuk dalam keadaan (relatif) bebas tanpa agitasi.

2. *Tap density* didefinisikan sebagai berat jenis tertinggi yang dicapai dengan vibrasi tanpa aplikasi tekanan luar.
3. *Green density* didefinisikan sebagai berat jenis serbuk setelah serbuk mengalami penekanan kompaksi untuk proses pemanasan (*sintering*).
4. *Theoretical density* didefinisikan sebagai berat jenis sesungguhnya dari material serbuk ketika material serbuk tersebut ditekan hingga menghasilkan serbuk tanpa pori.

Karakteristik serbuk merupakan salah satu karakter yang paling penting karena menentukan volume aktual yang diisi sejumlah massa serbuk sehingga ukuran kompaksi dan besarnya tekanan dapat diperhitungkan. *Apparent density* tergantung pada densitas logam, kondisi permukaan, pola pengaturan serbuk, bentuk dan ukuran cetakan, gaya elektrostatis, dan sifat serbuk itu sendiri[12].

2.3.1.4 Mampu Alir Serbuk (*Flowability*)

Mampu alir serbuk merupakan karakteristik serbuk yang menggambarkan sifat alir dan kemampuan serbuk untuk dapat memenuhi ruang cetakan dan beberapa faktor yang mempengaruhi mampu alir serbuk adalah bentuk serbuk, berat jenis serbuk, distribusi ukuran partikel dan kelembaban serbuk[17]. Karakteristik serbuk seperti berat jenis serbuk seringkali dihubungkan dengan gesekan antar partikel. Faktor-faktor yang mengurangi gesekan antar partikel atau meningkatkan berat jenis serbuk (seperti partikel bulat dan halus) akan mampu meningkatkan mampu alir serbuk[13,16].

2.3.1.5 Mampu Tekan (*Compressibility*)

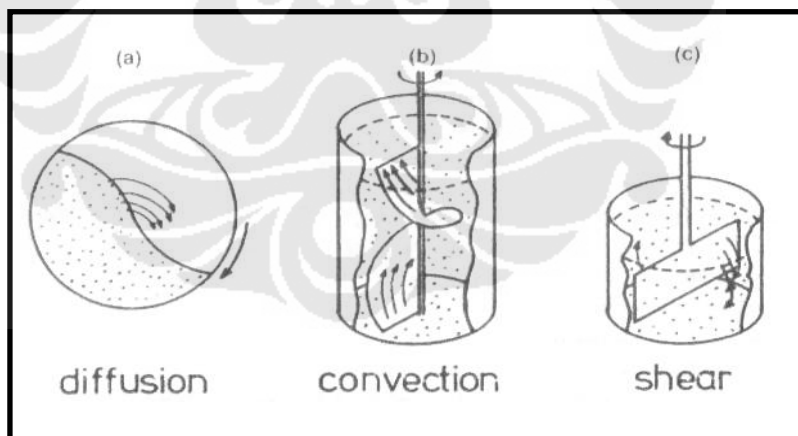
Mampu tekan merupakan perbandingan volume serbuk mula-mula dengan volume benda yang ditekan yang nilainya berbeda-beda tergantung distribusi ukuran serbuk dan bentuk butirnya[17]. Mampu tekan menunjukkan bahwa densitas merupakan fungsi dari tekanan yang diberikan. Serbuk yang halus akan memiliki mampu tekan yang lebih tinggi daripada serbuk yang kasar. Mampu tekan serbuk juga dipengaruhi oleh efek gesekan antar partikel.

2.3.2 Pencampuran dan Pengadukan Partikel Serbuk

Pencampuran dan pengadukan serbuk dilakukan untuk menghasilkan serbuk yang homogen[2]. Pada tahap pencampuran inilah masing-masing komposisi dari serbuk ditambahkan. Dalam pencampuran dan pengadukan serbuk, variabel yang berpengaruh adalah jenis material, ukuran partikel, jenis pengadukan, ukuran pengaduk dan waktu pengadukan[17]. Nilai gaya gesek antar partikel serbuk merupakan hal yang menentukan keberhasilan pencampuran dan pengadukan serbuk. Gaya gesek antar partikel serbuk dipengaruhi oleh efisiensi pencampuran, pelumasan dan pengeringan.

Terdapat 3 mekanisme pencampuran serbuk, yaitu[17]:

1. Difusi : terjadinya pencampuran karena gerak antar partikel serbuk yang dihasilkan oleh perputaran drum.
2. Konveksi : terjadinya pencampuran karena ulir didalam kontainer berputar pada porosnya sehingga terjadi percampuran. Partikel yang berat akan cenderung turun ke bawah.
3. Geser : terjadinya pencampuran karena menggunakan suatu media pengaduk.



Gambar 2.6. Mekanisme pencampuran serbuk[17].

Berikut adalah beberapa dampak negatif bila menggunakan pengadukan dan pencampuran terhadap serbuk, yaitu[17]:

- Partikel logam akan lebih sulit dikompaksi.
- Kontaminasi terhadap serbuk mungkin terjadi selama pengadukan dan pencampuran.

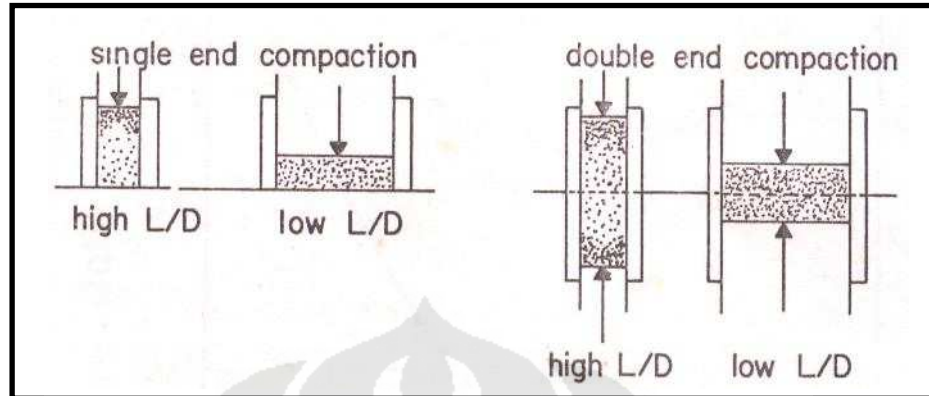
- Desain alat pencampur yang buruk dapat mengakibatkan segregasi partikel.

Nilai gaya gesek antar partikel serbuk yang rendah, merupakan hal yang menentukan keberhasilan pencampuran dan pengadukan serbuk. Gaya gesek antar partikel serbuk dipengaruhi oleh efisiensi pencampuran, pelumasan dan pengeringan. Pencampuran dan pengadukan tergantung dari aliran partikel ketika melewati partikel lainnya dalam satu campuran. Gaya gesek antar partikel serbuk yang tinggi akan membuat pencampuran dan pengadukan lebih sulit. Gaya gesek tersebut dapat diminimalkan dengan cara memperbaiki bentuk dan ukuran partikel. Selain itu, apabila kecepatan rotasi terlalu rendah maka dapat menghasilkan proses pencampuran yang tidak efisien karena gerak yang dihasilkan sedikit sehingga memungkinkan timbulnya segregasi, namun bila kecepatan rotasi terlalu cepat maka gaya sentrifugalnya dapat mencegah proses pencampuran serbuk[17]. Pelumasan yang diberikan memiliki beberapa fungsi diantaranya mengurangi gesekan antar serbuk dan antara serbuk dengan cetakan, dan mengurangi keausan *tool* sehingga cetakan dan peralatan kompaksi lebih lama waktu gunanya.

2.3.3 Kompaksi

Proses kompaksi merupakan suatu proses untuk membentuk serbuk menjadi suatu komponen dengan menggunakan cetakan tertentu. Proses kompaksi terjadi dengan menempatkan serbuk logam pada cetakan yang kemudian ditekan sehingga serbuk akan terbentuk seperti bentuk rongga cetakannya[19]. Hasil dari proses kompaksi ini disebut bakalan, dan memiliki kekuatan yang cukup untuk menjalani proses selanjutnya. Tekanan yang diberikan merupakan tekanan eksternal yang digunakan untuk memberikan bakalan dengan kepadatan yang tinggi. Parameter yang dapat menentukan kepadatan dari bakalan diantaranya adalah tekanan yang diberikan saat kompaksi, perilaku mekanik, dan kecepatan penekanan[13]. Proses kompaksi yang dilakukan adalah dengan tekanan cetakan, dengan metoda satu arah, dua arah atau yang lebih kompleks. Pada penekanan satu arah, *punch* bagian atas bergerak menekan ke bawah. Dan untuk penekanan dua arah terdapat dua buah *punch* penekan, yaitu *punch* atas dan *punch* bawah,

dimana dalam proses penekanan kedua *punch* tersebut bergerak bersamaan dengan arah berlawanan[20].



Gambar 2.7. Proses kompaksi dengan penekanan (a) satu arah, (b) dua arah[20].

Pada saat kompaksi terjadi tahapan-tahapan yang dialami serbuk, yaitu:

1. Pergerakan keseluruhan dari partikel-partikel serbuk dan penyusunan kembali (rearrangement)

Tahapan ini adalah tahapan awal yang terjadi saat kompaksi ketika penekanan mulai diberikan, yaitu mulai terjadinya penyusunan kembali partikel-partikel akibat adanya penekanan akan menyebabkan partikel tersusun lebih padat. Gerakan penyusunan partikel ini dipengaruhi oleh adanya gaya gesek yang terjadi antar partikel dan gaya gesek antara partikel dengan permukaan cetakan maupun gaya gesek antara partikel dengan permukaan cetakan maupun gaya gesek antara partikel dengan permukaan *punch* penekan ataupun dengan inti. Pergerakan partikel ini dapat terjadi karena berat jenis yang rendah dari partikel serbuk sehingga ruang gerak partikel tersebut akan semakin banyak. Dapat dikatakan juga bahwa partikel yang lebih kecil ukurannya akan dapat bergerak dengan jarak yang relatif besar, karena kemampuan untuk melalui saluran-saluran kecil antar partikel sangat baik. Partikel serbuk akan bergerak sesuai dengan arah tekanan utama yang diberikan. Pergerakan kearah samping atau sisi adalah akibat dari adanya tahanan dari partikel itu sendiri dan adanya ruang kosong atau kepadatan yang lebih rendah pada bagian tersebut. Pergerakan partikel cenderung terjadi didalam massa serbuk pada tekanan yang relatif rendah. Hal ini

memberikan kesempatan dari partikel untuk bergerak membentuk susunan yang terpadat. Apabila kecepatan penekanan terlalu tinggi, maka akan menghalangi saluran-saluran yang terbuka, inilah alasan mengapa pada kompaksi dimulai bertahap dari tekanan yang rendah.

2. Deformasi elastis partikel serbuk

Deformasi pada partikel serbuk akan menurunkan jumlah porositas bakalan dimana deformasi yang terjadi dapat berupa deformasi elastis dan plastis. Deformasi elastis terjadi ketika serbuk mulai bersentuhan dan jika penekanan dihentikan maka serbuk akan kembali ke bentuk semula. Deformasi elastis dapat terlihat ketika bakalan hasil kompaksi dikeluarkan dari cetakan yaitu akan menyebabkan bakalan membesar.

3. Deformasi plastis partikel serbuk

Deformasi plastis adalah bagian terpenting dari mekanisme pampatan (*densification*) selama kompaksi berlangsung. Pada tahap ini, semakin tinggi tekanan kompaksi yang diberikan akan menyebabkan semakin meningkatnya derajat deformasi plastis dan pampatan yang terjadi. Pada saat terjadi deformasi plastis juga terjadi perpindahan tegangan antar partikel berdekatan dan terjadi peningkatan nilai kekerasan.

4. Penghancuran partikel serbuk

Sesaat setelah serbuk mengalami deformasi plastis, serbuk mengalami *mechanical interlocking* (antar butir saling mengunci). Mekanisme ikatannya disebut dengan ikatan *cold weld*, yaitu ikatan antara dua permukaan permukaan butiran logam yang bersih yang ditimbulkan oleh gaya kohesi dari serbuk dimana tidak terjadinya peleburan atau 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*. Apabila setelah deformasi elastis terjadi kemudian tekanan terus ditingkatkan maka partikel-partikel tersebut akan hancur mejadi partikel-partikel kecil. Proses ini merupakan tahap densifikasi, yaitu bagian-bagian yang kecil dari partikel serbuk akan dengan mudah menempati posisi pori antar partikel. Pada waktu serbuk ditekan, berat jenis serbuk akan meningkat sedangkan porositasnya berkurang karena rongga berkurang. Pada waktu serbuk ditekan, serbuk

mengalami distribusi berat jenis. Di bagian atas (dekat *punch*) nilai berat jenis besar, sedangkan dibagian tengah, nilai berat jenisnya lebih kecil[21,22].

Kekuatan mekanis hasil dari bakalan ditentukan dari kesempurnaan proses pengikatan antar partikel serbuk selama proses kompaksi berlangsung. Deformasi elastis saat bakalan dikeluarkan dari cetakan sangat tidak menguntungkan, karena dengan adanya deformasi elastis yang terjadi pada bakalan, akan menyebabkan terjadinya proses pemisahan antar partikel sehingga kekuatannya rendah. Untuk memperoleh kekuatan bakalan yang cukup tinggi harus memperhatikan tekanan yang optimal, yaitu tekanan yang tinggi yang akan membuat bakalan kuat sehingga tidak menyebabkan terjadinya perpatahan saat bakalan dikeluarkan dari cetakan ataupun tidak akan hancur saat dilakukan proses selanjutnya, yaitu sintering. Namun, tekanan yang terlalu tinggi akan menyebabkan bakalan menjadi retak karena tidak kuat menerima tegangan dan kekuatan yang tinggi akibat tekanan yang berlebihan, sehingga perlu diketahui tekanan yang optimal untuk serbuk yang akan dikompaksi.

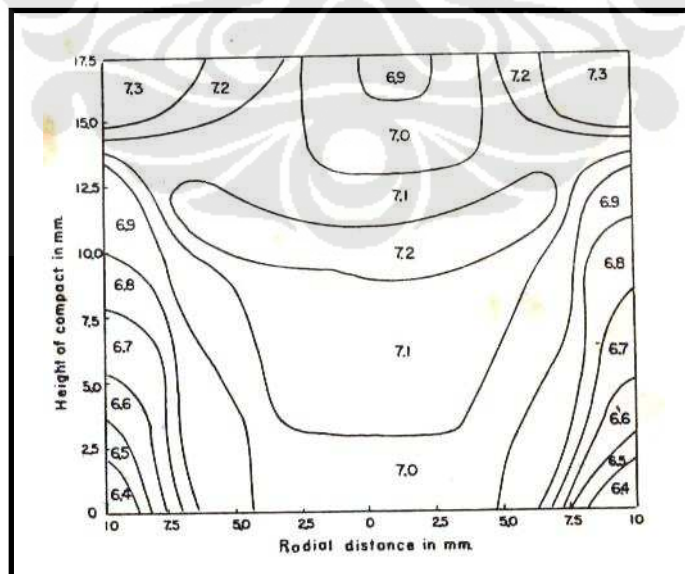
Pada tahap densifikasi saat kompaksi, ruang kosong/pori yang berisi udara akan digantikan oleh massa partikel padat. Hal ini dapat terjadi apabila udara dapat dikeluarkan ke permukaan partikel. Bila hal tersebut tidak dapat terjadi maka jumlah pori yang ada akan tetap jumlahnya. Selama proses kompaksi terdapat pori yang terisolir atau pori yang tidak berhubungan dengan permukaan luar. Porositas seperti ini akan mempersukar bagi massa padat untuk mengisi ruang kosong tersebut. Semakin besarnya tekanan kompaksi yang diberikan, maka pengaruhnya untuk porositas bakalan adalah akan semakin banyaknya udara yang terperangkap dan hal inilah yang menyebabkan pori terisolir dalam bakalan hasil kompaksi. Tetapi, secara total jumlah porositas dalam bakalan tetap menurun.

Kekuatan bakalan (*green strength*) dihasilkan dari ikatan antar partikel yang terjadi saat kompaksi serbuk. Kekuatan bakalan ini dapat ditingkatkan dengan cara[16] :

1. Menggunakan serbuk yang berukuran halus
2. Menggunakan serbuk dengan bentuk partikel yang tidak beraturan dan permukaan yang kasar
3. Meningkatkan tekanan kompaksi

4. Mengurangi kontaminasi permukaan partikel dengan udara
5. Mengurangi jumlah pelumas atau zat aditif pada serbuk

Distribusi berat jenis bakalan dipengaruhi oleh distribusi tegangan yang diterima partikel serbuk pada saat proses kompaksi berlangsung. Gesekan antar partikel serbuk menghasilkan nilai konsentrasi tegangan yang berbeda-beda pada masing-masing bagian bakalan. Gesekan tersebut akan mempengaruhi pergerakan partikel dan deformasi yang terjadi. Pada gambar 2.8 terlihat bahwa pada bagian tengah karena pengaruh gesekan hanya diakibatkan oleh adanya gesekan antar partikel serbuk tanpa adanya gesekan dinding cetakan terhadap partikel serbuk, sehingga daerah ini memiliki tegangan yang lebih tinggi daripada daerah lain. Jadi, pada bagian tengah memiliki nilai berat jenis yang tinggi dibandingkan dengan daerah yang lain. Sedangkan pada bagian pinggir (tepi), karena adanya gaya gesek yang cukup tinggi terutama diakibatkan oleh adanya gaya gesek dinding cetakan dengan partikel serbuk akan menurunkan tegangan yang terjadi pada daerah tersebut. Sehingga pada bagian pinggir (tepi) memiliki nilai berat jenis yang lebih rendah. Semakin rendah berat jenis yang dihasilkan, maka jumlah porositas yang terbentuk akan semakin banyak, hal inilah yang tidak diinginkan terjadi pada bakalan[20].



Gambar 2.8. Distribusi berat jenis[20].

Untuk mengurangi terjadinya ketidakhomogenan berat jenis, maka dapat dilakukan cara[17] :

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

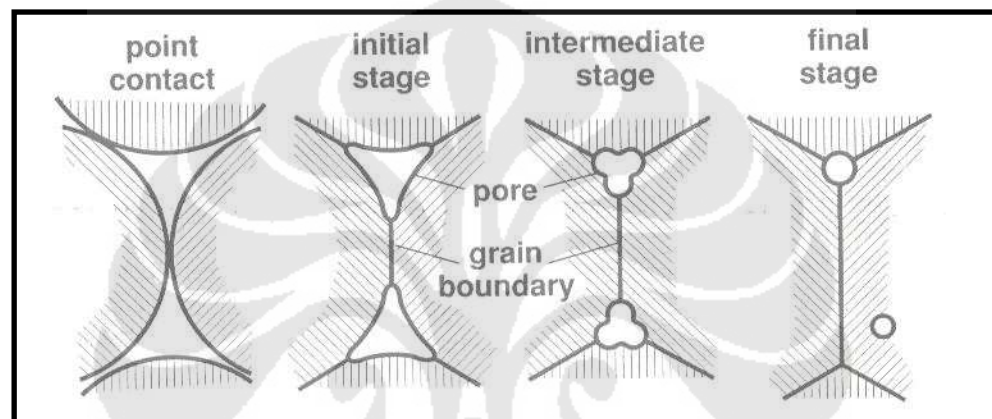
2.3.4 Sintering

Sintering adalah perlakuan panas yang mengakibatkan terjadinya mekanisme terjadinya ikatan antar partikel menjadi susunan struktur yang koheren pada temperatur dibawah temperatur lebur melalui transpor massa dalam skala atomik yang terjadi pada permukaan partikel[23]. Sintering merupakan proses densifikasi akibat penyatuan dari partikel-partikel serbuk yang akan meningkatkan sifat mekanis dari bakalan. Gaya penggerak dalam proses sinter adalah berdasarkan pendekatan termodinamis. Transisi dari bakalan setelah sinter yang berporos menjadi material yang tersinter serupa dengan terjadinya reaksi kimia. Sehingga harus ada pengurangan energi bebas dalam sistem agar reaksi berlangsung. Pengurangan energi bebas terjadi pada permukaan, jadi apabila luas permukaan kontak semakin banyak maka semakin besar energi penggerak yang diperlukan dalam proses sinter. Sintering konvensional meliputi pemanasan dari bakalan hasil kompaksi pada daerah temperatur dibawah temperatur leburnya (*solidus*) dalam atmosfer yang terlindung atau lingkungan reduksi dengan tekanan normal. Variasi lain dari proses sinter adalah pemanasan hingga daerah transisi atau fasa cair yang stabil dan dilakukannya proses penekanan panas (kompaksi dan sintering dilakukan bersamaan). Baik penekanan panas (*hot pressing*) maupun sinter fasa cair, keduanya banyak dipakai secara komersial, akan tetapi pada

penelitian ini digunakan sintering serbuk tanpa terbentuknya fasa cair atau sintering fase padat konvensional.

Dalam proses sinter yang dilakukan pada bakalan hasil kompaksi, tahapan yang terjadi adalah[21,22]:

1. Ikatan mula antar partikel (*point contact*)
2. Pertumbuhan leher (*initial stage*)
3. Penutupan dan pembulatan saluran pori (*intermediate stage*)
4. Penyusutan dan pemisahan pori (*final stage*)

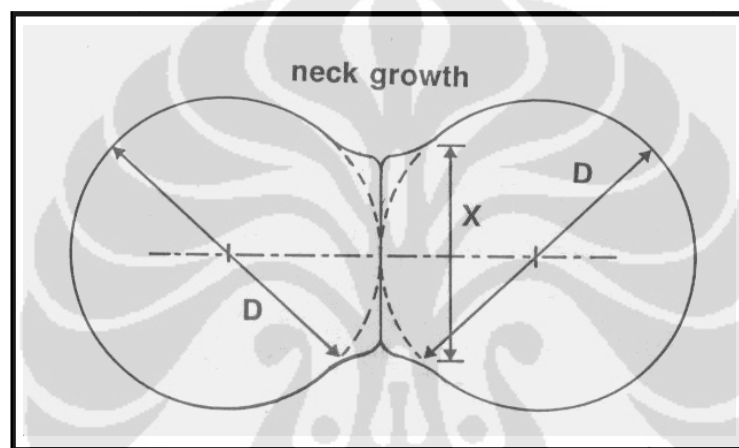


Gambar 2.9. Tahapan-tahapan sinter[24].

Ikatan mula antar partikel, yaitu proses transportasi (perpindahan) atom melalui titik kontak partikel yang bersentuhan. Dimana saat bakalan mengalami proses sinter, maka akan terjadi proses pengikatan awal. Proses ini meliputi difusi atom-atom yang mengarah pada pengembangan batas butir. Tahap ikatan mula-mula ini tidak menyebabkan terjadinya perubahan dimensi pada bakalan, semakin tinggi berat jenis bakalan yang disinter berarti semakin luas permukaan kontak antar partikel, sehingga akan lebih meningkatkan ikatan antar partikel pada saat sintering. Apabila ada unsur pengotor, maka unsur pengotor ini akan dapat menghalangi terjadinya proses pengikatan ini. Hal ini disebabkan karena elemen pengotor ini akan berkumpul pada bagian permukaan partikel, sehingga akan menghalangi luas bidang kontak antar partikel.

Pertumbuhan leher, yaitu tahapan lanjutan dari tahap pertama, daerah titik kontak antara partikel yang terbentuk dinamakan leher, dan leher itulah yang

selama proses sinter akan berkembang menjadi besar. Pertumbuhan leher tersebut terjadi karena adanya perpindahan massa pada proses sinter tersebut. Tetapi pertumbuhan leher tidak mempengaruhi jumlah porositas yang ada dan juga tidak menyebabkan terjadinya penyusutan dari bakalan. Proses pertumbuhan leher ini akan menuju ke tahap penghalusan dari saluran-saluran pori antar partikel serbuk yang berhubungan. Tahap ini berakhir saat rasio ukuran leher X/D mencapai 0,3[21]. Pada tahap ini pula, pori mulai terpisah karena titik kontak membentuk batas butir. Selain itu, pada tahap ini juga terjadi penyusutan (*shrinkage*), pengurangan luas permukaan dan pepadatan (*densification*).

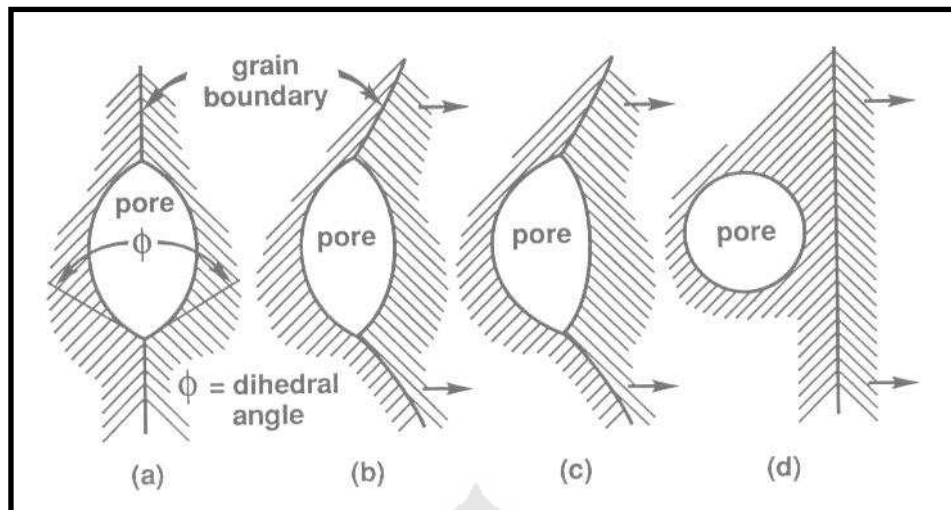


Gambar 2.10. Tahap pertumbuhan leher dengan rasio X/D [24].

Penutupan dan pembulatan saluran pori, penutupan saluran pori merupakan suatu perubahan yang utama dari pori saat sinter karena menentukan sifat mekanik bakalan hasil sinter. Pada tahap ini terjadi pertumbuhan butir dan struktur pori menjadi halus. Penutupan saluran pori yang saling berhubungan akan menyebabkan perkembangan dari pori tertutup. Hal ini merupakan perubahan yang penting secara khusus untuk pori yang saling berhubungan untuk pengangkutan cairan, seperti pada sanringan-saringan dan bantalan yang dapat melumas sendiri. Proses ini disebabkan karena adanya pertumbuhan butir. Proses pembulatan pori merupakan konsekuensi dari adanya pertumbuhan leher. Material ditransportasikan dari permukaan partikel menuju ke daerah leher tersebut, sehingga permukaan leher tersebut menjadi lebih halus. Bila transport massa yang terjadi terus melalui daerah leher, maka pori disekitar leher akan mengalami

pembulatan. Proses ini tergantung dari waktu dan temperatur yang cukup dalam proses sinter. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan sinter serta semakin kecil partikel serbuk, maka ikatan dan densifikasi yang terjadi juga semakin tinggi[14].

Penyusutan dan pengkasaran pori, merupakan *final stage* dimana pada tahapan ini proses berjalan lambat. Pori-pori yang bulat menyusut dengan adanya mekanisme difusi ruah (*bulk diffusion*). Proses ini berhubungan dengan densifikasi yang terjadi. Tahap ini akan menyebabkan terjadinya penurunan volume dari bakalan hasil sinter (*burn compact*) yang menyebabkannya menjadi lebih padat. Tahapan terjadinya proses penyusutan pori ini adalah terjadinya pergerakan gas-gas yang terdapat di dalam pori keluar ke permukaan. Dengan demikian, tahap ini akan meningkatkan berat jenis dari bakalan sinter (*burn compact*). Proses ini sangat diharapkan terjadi, karena dengan terjadinya penyusutan dari pori maka kepadatan akan meningkat, daerah ikatan partikel menjadi besar, sehingga akan meningkatkan kekuatan dari bahan tersebut. Proses pengkasaran pori terjadi karena bersatunya lubang-lubang kecil dari pori sisa dan menjadi besar dan kasar. Jumlah total dari pori adalah tetap, tetapi jumlah pori berkurang dengan diimbangi oleh pembesaran dari pori tersebut. 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 hingga mengalami penyusutan, dimana proses ini berlangsung lambat. Dengan pemanasan yang 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[15]. Pemisahan pori pada tahap akhir ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.11. Pemisahan pori dan pembulatan pori pada tahap akhir sinter (a) Pori pada batas butir, (b) dan (c) Pertumbuhan butir, (d) Pemisahan pori[24].

2.3.4.1 Mekanisme Transport Massa

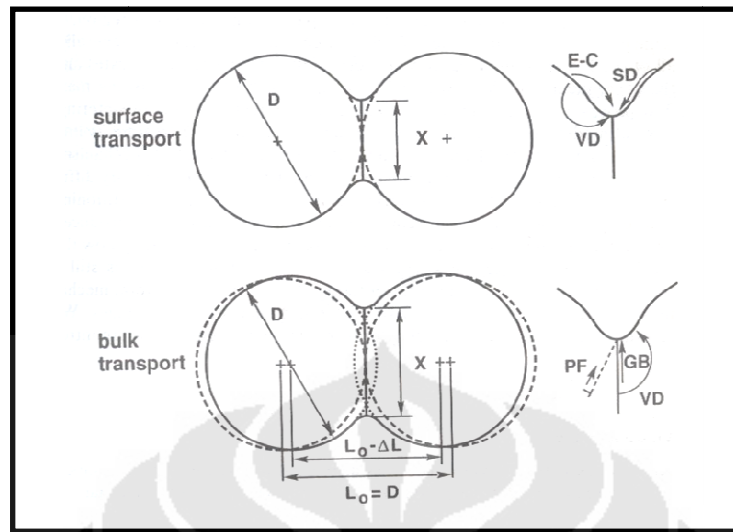
Mekanisme transport merupakan pergerakan massa sebagai respon dari gaya penggerak (*driving force*). Mekanisme ini sangat tergantung dari jenis material, ukuran partikel, tahap sintering, temperatur, dll.

Terdapat dua mekanisme transport massa yang terjadi dalam proses sinter, yaitu[24]:

1. Transport permukaan (*surface transport*) menghasilkan pertumbuhan leher tanpa terjadi perubahan jarak partikel (tidak ada penyusutan dan densifikasi) karena massa mengalir dan berakhir pada permukaan partikel. Tidak ada perubahan dimensi. Difusi permukaan dan penguapan-kondensasi merupakan kontribusi penting selama sinter transport permukaan.

2. Transport ruah (*bulk transport*) melibatkan difusi volume, difusi batas butir, aliran plastis, dan aliran rekat. Aliran plastis biasanya penting hanya selama waktu pemanasan, terutama untuk serbuk yang telah dikompaksi, di mana berat jenis dislokasi awal tinggi. Lain halnya dengan material *amorphous* seperti polimer dan gelas, yang disinter dengan aliran rekat, di mana partikel-partikelnya bersatu tergantung pada ukuran partikel dan sifat merekat material. Pembentukan aliran rekat juga memungkinkan untuk logam dengan fasa cair pada batas butir.

Difusi batas butir penting untuk densifikasi material kristalin. Umumnya, proses transport ruah aktif pada temperatur tinggi.



Gambar 2.12. Mekanisme transport massa[18].

2.3.4.2 Temperatur Sinter

Perpindahan massa secara difusi dalam proses sinter dipengaruhi oleh temperatur sinter. Karena temperatur sinter akan mempengaruhi besarnya energi penggerak pada saat sinter. Dengan semakin meningkatnya temperatur sinter maka semakin tinggi kecepatan serta perubahan-perubahan dalam proses sinter. Sehingga akan meningkatkan sifat mekanis bakalan hasil sinter. karena, dengan semakin tingginya temperatur sinter maka akan mendorong terjadinya *interdiffusion* dari serbuk hasil kompaksi (*green compact*) dan juga dapat meningkatkan kepadatan produk hasil sinter sehingga mengurangi jumlah porositas yang ada. Namun, peningkatan temperatur sinter dapat menimbulkan kerugian seperti penyusutan ukuran partikel (*shrinkage*), keakuratan dimensi berkurang, terjadinya pertumbuhan butir, biaya energi proses dan desain dapur lebih mahal[13].

Untuk material komposit, temperatur sinter yang digunakan adalah temperatur sinter dari matriks komposit tersebut. Range temperatur sinter untuk material komposit aluminium-grafit yaitu pada 595-625°C[2].

2.3.4.3 Waktu Sinter

Peningkatan waktu tahan sinter memberikan pengaruh 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 sinter akan semakin tinggi pula. Namun, kerugian akibat meningkatnya waktu tahan sinter yaitu menyebabkan peningkatan persen penyusutan, pertumbuhan butir dan juga meningkatkan biaya proses[13]. Untuk material komposit aluminium grafit ini, range waktu tahan sinter yang digunakan adalah 60 menit.

2.3.4.4 Atmosfer Sinter

Tujuan utama penggunaan atmosfer sinter adalah untuk mengontrol reaksi-reaksi kimia antar bakalan dengan lingkungannya. Selain itu, tujuan penggunaan atmosfer sinter juga untuk mengontrol atau melindungi logam dari oksidasi saat proses sinter. 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[25].

Terdapat 6 jenis atmosfer yang dapat digunakan untuk melindungi bakalan yaitu hidrogen, amoniak, gas inert, nitrogen, vakum dan gas alam. Sebagai contoh, vakum sering digunakan sebagai atmosfer sinter karena prosesnya bersih dan kontrol atmosfer mudah. Atmosfer hidrogen juga sering digunakan karena kemampuannya untuk mereduksi oksida dan menghasilkan atmosfer dekarburisasi untuk logam *ferrous*[13].

Pengontrolan atmosfer memang sangat penting saat proses sinter. Namun, tidak hanya atmosfer saja yang menyebabkan reaksi-reaksi kimia, serbuk yang telah dikompaksi biasanya juga membawa kontaminasi-kontaminasi seperti oksida-oksida, karbon dan gas-gas yang terperangkap sehingga saat dipanasi terjadi perubahan komposisi atmosfer[13].

2.4 APLIKASI KOMPOSIT ALUMINUM GRAFIT SEBAGAI MATERIAL BEARING

Penggunaan komposit aluminium MMC *reinforced* grafit yang dihasilkan melalui proses metalurgi serbuk semakin berkembang dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi diantaranya adalah pada komponen otomotif. Selain itu, komposit ini banyak dikembangkan untuk aplikasi komponen pesawat luar angkasa, alat rumah tangga dan komponen struktural lainnya. Industri otomotif merupakan industri yang banyak menggunakan komponen hasil dari proses metalurgi serbuk dengan matriks aluminium. Perkembangannya kemudian adalah penggunaan komposit ini sebagai material *bearing*. Pada umumnya, material yang digunakan untuk aplikasi ini adalah *bronze bearing* (Cu Sn) dan *iron graphite*. *Chrome steel*, SAE 52100, merupakan salah satu material yang juga digunakan untuk aplikasi bearing[26].

Bearing merupakan suatu komponen yang berfungsi untuk membantu proses pergerakan suatu komponen lainnya dengan gesekan yang sekecil mungkin. Proses pembuatan komponen dengan metode metalurgi serbuk dapat menghasilkan *sintered self-lubricating bearing* yang memiliki pori yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan pelumas (oil-reservoir). Penggunaan *self-lubricating bearing* pada awalnya digunakan pada industri otomotif pada tahun 1927 dengan menggabungkan serbuk tembaga dengan timah untuk menghasilkan *bronze bearing* berpori yang mampu menyimpan pelumas pada pori tersebut dengan memanfaatkan gaya kapilaritas[2]. *Bearing* yang terbuat dari proses metalurgi serbuk memiliki 20-25% pori, namun dengan adanya pori inilah komponen yang terbuat dari proses metalurgi serbuk ideal untuk digunakan pada aplikasi *bearing*.

Aluminium *bearing* memiliki ketahanan aus dan ketahanan fatik yang baik, ketahanan korosi dan biaya yang rendah. Material *bearing* ini sering digunakan pada *connecting rod* dan *bearing* pada combustion engine, dan pompa hydraulic gear. Aluminium alloy *bearing* hasil casting dapat dikeraskan (shaft hardened) hingga 85 Rockwell B atau sekitar 140 BHN. Contoh aluminium alloy hasil casting yang dapat digunakan untuk aplikasi *bearing* adalah 850.0-T5 yang ekuivalen dengan SAE 770 yang memiliki keuletan yang sangat baik sehingga dapat menahan beban yang tinggitanpa mengalami retak ataupun aus. Dalam

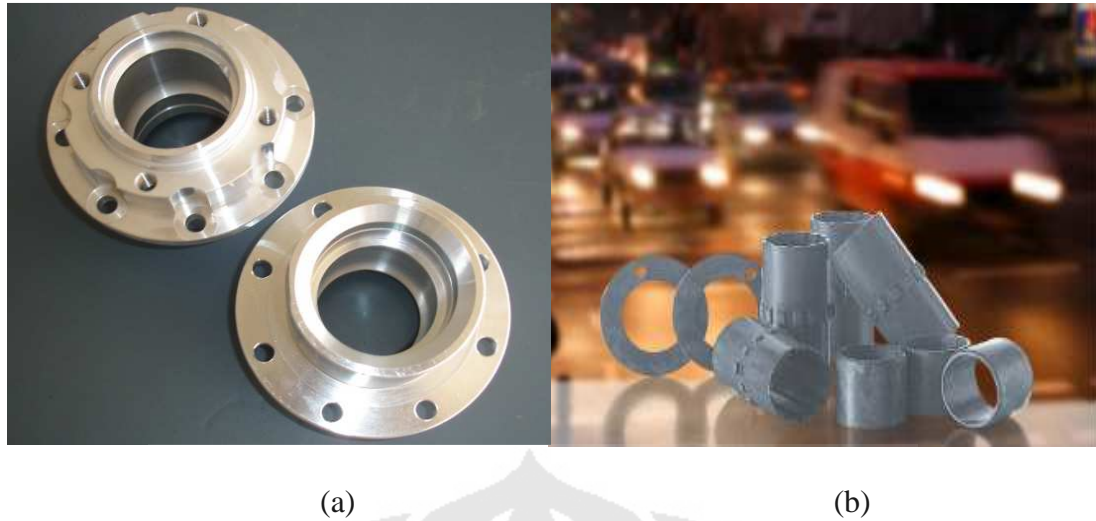
mendesain *bearing*, ada 3 hal yang harus diketahui untuk memaksimalkan performa dari *bearing*, yaitu lingkungan operasi dari *bearing*, pelumasan yang sesuai, dan pemilihan material yang tepat. Syarat pertama untuk menentukan desain *bearing* adalah mengetahui kondisi penggunaannya, diantaranya[27]:

- Beban yang akan diterima
- Kecepatan pembebanan
- Oscillting motion
- Tingkat korosifitas lingkungan
- Pelumasan
- Temperatur kerja
- Seringnya operasi
- Perbedaan kekerasan antara *bearing* dan shaft.

Syarat lainnya adalah adanya pelumasan yang sesuai, salah satu caranya adalah dengan mengembangkan *self lubricating bearing* sehingga akan mengurangi friksi pada kondisi operasi *bearing*. Umur pakai dari *bearing* bergantung dari pilihan material yang digunakan. Material untuk aplikasi *bearing* harus memiliki karakteristik diantaranya[27]:

- Koefisien friksi yang rendah antara *bearing* dan shaft material
- Ketahanan aus yang baik
- Kemampuan untuk menyerap ataupun membuang partikel pengotor
- Memiliki kekuatan tekan yang tinggi
- Kekuatan fatik yang baik
- Ketahanan korosi terhadap lingkungan operasi
- Kekuatan geser antara *bearing* dan shaft rendah
- Bersifat uniform
- Harga dan kesediaan material yang sesuai

Penggunaan *bearing* pada industri otomotif digunakan pada hampir seluruh bagian kendaraan, diantaranya pada roda (wheel) dan mesin dengan berbagai ukuran dan jenis sesuai dengan fungsinya. Perkembangan mengenai desain *bearing* ini dilakukan untuk mendapatkan *bearing* dengan performa yang lebih baik. Pada industri automobil, hal yang sangat diperhatikan adalah berat dari *bearing* tersebut[28].



Gambar 2.13. Contoh bearing, (a) Aluminium bearing; (b) Bronze bearing; (c) Ball bearing, angular contact ball bearing[28]

2.4.1 Sintered Metal Bearing

Sintered-metal self-lubricating bearing dapat dihasilkan dari teknologi metalurgi serbuk karena ekonomis, cocok untuk produksi massal dan dapat menghasilkan produk dengan kepresisian yang baik. *Sintered-metal self-lubricating bearing* banyak digunakan untuk penggunaan alat-alat rumah tangga, komponen pesawat terbang, peralatan konstruksi dan komponen otomotif[29]. Porositas pada *bearing* yang terbuat dari bronze, Fe, ataupun aluminium mencapai 10% hingga 35% dari total volume. Pada saat operasi, pelumas dapat disimpan pada pori dan dapat membasahi permukaan *bearing* dengan adanya gaya kapilaritas yang bertujuan mengurangi friksi dari *bearing* itu[29]. Sehingga *bearing* dapat digunakan pada jangka waktu yang lama tanpa diperlukan tambahan pelumas dan sangat efektif

apabila digunakan untuk komponen yang digunakan pada bagian yang sulit dijangkau untuk melakukan penambahan pelumas. Untuk meningkatkan sifat *self-lubricating* dapat ditambahkan 1% hingga 3.5% grafit. Material *Sintered-metal self-lubricating bearing* diantaranya adalah:

Bronze: pada umumnya *bronze* digunakan sebagai material untuk *bearing* dengan kandungan 90% Cu dan 10% Sn. Memiliki ketahanan aus yang baik, ulet, dan ketahanan korosinya baik. Karena sifatnya baik dan harganya yang rendah, maka material ini banyak digunakan untuk aplikasi peralatan rumah tangga dan alat pertanian.

Copper-Iron : adanya partikel Fe sebagai inklusi akan meningkatkan kekuatan tekan. Digunakan untuk aplikasi pembebanan yang tinggi.

Hardenable Copper-Iron : penambahan 1.5% carbon pada material copper-iron membuat material ini dapat dikeraskan hingga 65 Rockwell C sehingga kekuatan impaknya lebih baik.

Iron : memiliki sifat yang baik untuk digunakan sebagai *bearing* dan harga yang rendah sehingga penggunaannya luas pada aplikasi otomotif, pertanian dll. Serbuk Fe ditambahkan 10% Cu untuk meningkatkan kekuatannya.

Aluminium : memiliki toleransi dimensi yang tinggi dan yang terpenting adalah densitasnya yang rendah sehingga akan menurunkan berat dari komponen[29].

Untuk aplikasi *advance*, yaitu penggunaan pada kondisi operasi yang ekstrim, material *bearing* dapat diklasifikasikan sebagai *through-hardened materials* untuk aplikasi *ball bearings* dan *case-hardened materials* untuk aplikasi *roller bearings*. dimana kekerasan keduanya sangat tinggi mencapai 58 Rockwell C atau sekitar 600BHN[30]. Selain itu, material aluminium paduan digunakan sebagai *bearing* pada mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) dan *roll neck* pada *steel mill*. Selain itu, aluminium *bearing 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 kejut yang tinggi. *Rolling mill bearing* dibuat dengan mengecor paduan aluminium untuk meningkatkan kemampuan pembebanan dan kecepatan.

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

- ✘ 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)

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.