

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komposit

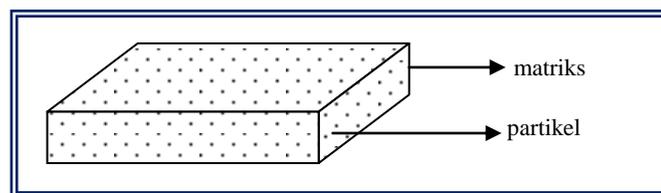
Komposit adalah material hasil kombinasi makroskopis dari dua atau lebih komponen yang berbeda, dengan tujuan untuk mendapatkan sifat-sifat fisik dan mekanik tertentu yang lebih baik daripada sifat masing-masing komponen penyusunnya. Komponen penyusun dari komposit, yaitu berupa penguat (*reinforcement*) dan pengikat (*matrix*) [3]. Kekuatan dan sifat dari komposit merupakan fungsi dari fasa penyusunnya, komposisinya serta geometri dari fasa penguat. Geometri fasa penguat disini adalah bentuk dan ukuran partikel, distribusi, dan orientasinya. Penguat merupakan material yang umumnya jauh lebih kuat dari matriks dan berfungsi memberikan kekuatan tarik. Matriks berfungsi sebagai media transfer beban ke penguat, menahan penyebaran retak dan melindungi penguat dari efek lingkungan serta kerusakan akibat benturan. Komposit dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis penguatnya, yaitu:

1. Partikulat, yang terdiri dari partikel besar dan penguatan dispersi.
2. Fiber, yang terdiri dari kontinyu dan diskontinyu (terikat dan acak).
3. Struktural, yang terdiri dari lamina dan *panel sandwich*

Berdasarkan sifat penguatannya, maka komposit dibagi menjadi dua, yaitu:

a. Komposit Isotropik

Komposit isotropik adalah komposit yang penguatannya memberikan penguatan yang sama untuk berbagai arah (dalam arah transversal maupun longitudinal) sehingga segala pengaruh tegangan atau regangan dari luar akan mempunyai nilai penguatan yang sama. Pada Gambar 2.1 di bawah ini merupakan gambar dari komposit isotropik.

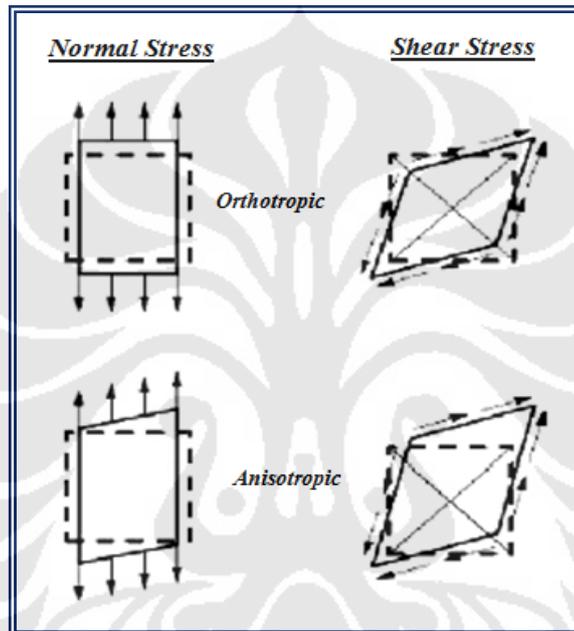


Gambar 2.1 Komposit partikulit dengan arah penguatan isotropik

Dari Gambar 2.1 di atas menerangkan bahwa pada komposit isotropik bila diberikan gaya luar akan memberikan tegangan atau penguatan yang sama ke segala arah.

b. Komposit Anisotropik

Komposit anisotropik adalah komposit yang matriksnya memberikan penguatan tidak sama terhadap arah yang berbeda, misalnya nilai penguatan untuk arah transversal tidak sama dengan penguatan arah longitudinal.



Gambar 2.2 Arah penguatan komposit

Gambar 2.2 di atas menerangkan mengenai arah penguatan komposit dan menunjukkan bahwa pada komposit anisotropik jika diberikan gaya luar yang sama, maka efek yang ditimbulkan akan mempunyai tegangan yang berbeda tiap arah penguatannya. Biasanya penguatan paling besar terjadi pada penguat arah serat.

Sedangkan berdasarkan matriksnya, komposit dibedakan menjadi 3 jenis [2], yaitu:

- a. *Metal Matrix Composite* (MMC), dengan matriksnya adalah material logam
- b. *Polymer Matrix Composite* (PMC), dengan matriksnya adalah material polimer

- c. *Ceramic Matrix Composite* (CMC), dengan matriksnya adalah material keramik

2. 1. 1 *Metal Matrix Komposit* (MMC)

Metal Matrix Composite adalah salah satu jenis komposit yang merupakan kombinasi dari dua material atau lebih dengan matriks berupa logam dan umumnya menggunakan keramik sebagai penguat. Bila ditinjau dari segi sifat mekanisnya, MMC jika dibandingkan dengan material monolitik memiliki sifat-sifat sebagai berikut [3] & [4]:

- Kekuatan tinggi (*Higher stiffness-to-density ratios*)
- Modulus elastis tinggi (*Higher strength-to-density ratios*)
- Ketahanan fatik lebih baik
- Memiliki sifat yang baik pada temperatur tertentu, yaitu kekuatan tinggi dan laju *creep* yang rendah
- Koefisien termal ekspansi lebih rendah, konduktivitas listrik dan termal tinggi
- Ketahanan aus lebih baik
- Sifat ketangguhan dan ketahanan impak serta ketahanan permukaan tinggi
- Tahan terhadap perubahan lingkungan atau temperatur secara tiba-tiba

Keunggulan MMC jika dibandingkan dengan PMC, yaitu [4]:

- Temperatur operasi lebih tinggi
- Lebih tahan terhadap api
- Memiliki kekakuan dan kekuatan yang lebih tinggi
- Tidak menyerap kelembapan
- Konduktivitas panas dan listrik lebih tinggi
- Ketahanan terhadap radiasi lebih tinggi

Berdasarkan bentuk partikel penguatnya, MMC dibagi menjadi 2, yaitu:

1. *Continuous*

Pada jenis ini, bahan yang digunakan sebagai penguat adalah fiber. Komposit dengan penguat fiber umumnya digunakan jika komponen yang hendak dibuat lebih mementingkan kekuatan tarik yang baik. Kekuatan tarik ini akan berpusat

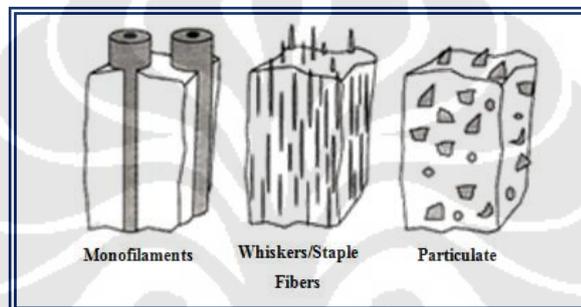
pada fiber-fiber panjang. Penguat dengan *continuous-aligned-fiber* memiliki sifat anisotropik. Kekuatan dan kekakuannya akan lebih baik jika beban searah dengan fiber dibandingkan dengan arah tegak lurus fiber.

2. *Discontinuous*

Pada jenis ini, bahan yang digunakan sebagai penguat dapat berupa [5]:

- Partikel
- Short fiber
- Fiber

Gambar 2.3 di bawah ini merupakan bentuk-bentuk dari partikel penguat jenis *discontinuous*.



Gambar 2.3. Klasifikasi MMC berdasarkan bentuk penguat [4]

Komposit dengan penguat jenis *discontinuous* digunakan untuk aplikasi yang pembebanannya diterima merata di seluruh material MMC, karena beban akan disalurkan ke semua penguat melalui matriks sehingga penyebarannya akan merata dan tidak terpusat seperti serat *continuous* [6]. Dengan penguat jenis ini, memungkinkan untuk membuat material komposit secara metalurgi serbuk.

MMC yang paling umum digunakan, yaitu [4] :

- Matriks Aluminium
 - *Continuous fibers*: boron, silikon karbida, alumina, grafit
 - *Discontinuous fibers*: alumina, alumina-silika
 - *Whiskers*: silikon karbida
 - *Particulates*: silikon karbida, boron karbida
- Matriks Magnesium
 - *Continuous fibers*: grafit, alumina
 - *Whiskers*: silikon karbida
 - *Particulates*: silikon karbida, boron karbida

- Matriks Titanium
 - *Continuous fibers*: silikon karbida, *coated boron*
 - *Particulates*: titanium karbida
- Matriks Tembaga
 - *Continuous fibers*: grafit, silikon karbida
 - *Wires*: niobium-titanium, niobium-timah
 - *Particulates*: silikon karbida, boron karbida, titanium karbida.
- Matriks *Superalloy*
 - *Wires*: tungsten

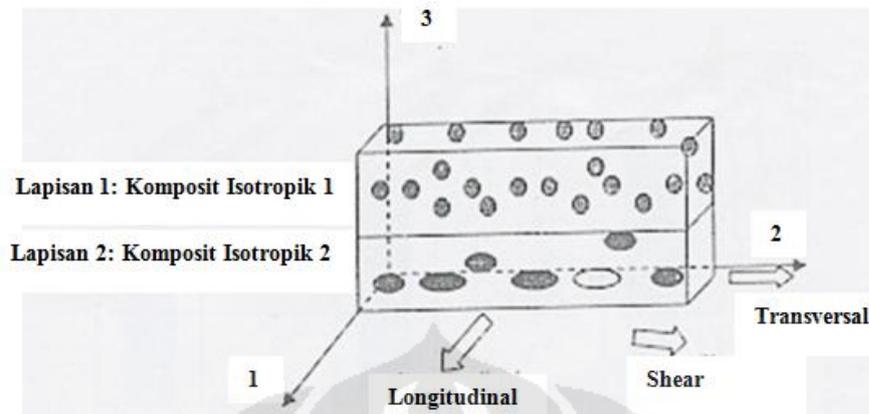
2.1.2 Komposit Laminat Hibrid

Komposit laminat adalah komposit yang terdiri dari gabungan dua atau lebih lembaran (*lamina*) atau *ply* yang membentuk elemen struktur secara integral [7]. Lamina biasanya berkaitan dengan penyusunan struktural secara *unidirectional* serat dalam matriks. Perubahan penyusunan struktur menjadi sangat penting karena penguat berfungsi sebagai media pembawa beban sedangkan matriks berfungsi sebagai media transfer beban ke penguat, menahan penyebaran retak dan melindungi penguat dari efek lingkungan serta kerusakan akibat benturan.

Salah satu jenis material komposit lamina adalah komposit hibrid, yaitu merupakan material dari gabungan 2 jenis material atau lebih sebagai penguat, karena satu material penguat saja tidak memenuhi sifat yang diharapkan [8]. Laminat hibrid adalah laminat yang tersusun atas lamina-lamina dengan kombinasi yang berbeda dari segi material (jenis penguat dan matriks) serta arah penguat [7]. Penguat komposit laminat hibrid dikontribusi oleh penguatan dua jenis atau lebih penguat yang berbeda maupun penyusunan strukturalnya.

Komposit lamina isotropik yang dibuat dari 2 lapisan komposit isotropik menunjukkan sifat *orthotropic*, yaitu sifat yang mengarah terhadap tiga bidang simetri. Tiga bidang tersebut masing-masing sejajar terhadap sumbu 1, 2 dan 3. Jika distribusi matriks pada lapisan 1 maupun lapisan 2 sama-sama homogen maka penguatan pada sumbu transversal (arah sumbu 2), sumbu longitudinal (sumbu 1) dan arah sumbu 3, akan bernilai sama sehingga bersifat isotropik

dengan penguatan kesegala arah bernilai sama [9]. Hal tersebut dapat dilihat seperti Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Komposit lamina isotropik

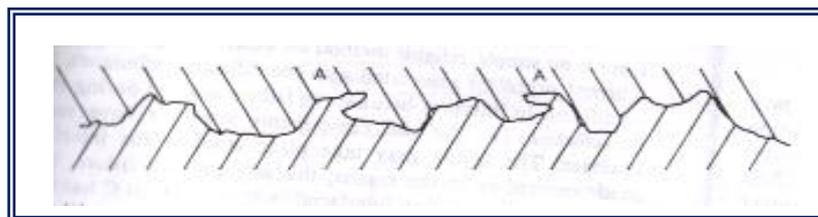
2. 2 Interface Pada Komposit

2. 2. 1 Interface dan Wettability pada Matriks dan Penguat

Interface antara matriks dan penguat dalam pembuatan komposit akan sangat berpengaruh terhadap sifat akhir dari komposit yang terbentuk, baik sifat fisik maupun mekanik. *Interface* adalah suatu fasa atau media yang terdapat pada komposit yang berfungsi untuk mentransfer beban dari penguat-matriks-penguat. Beberapa jenis ikatan yang dapat terjadi pada *interfacial bonding*:

1. Mechanical Bonding

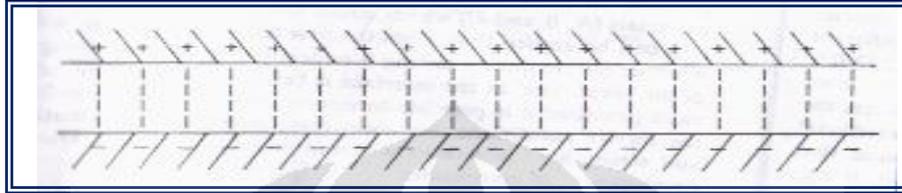
Mekanisme penguncian (*interlocking*) terjadi antara 2 permukaan, yaitu penguat dan matriks. Permukaan yang kasar dapat menyebabkan *interlocking* yang terjadi semakin banyak dan *mechanical bonding* menjadi efektif. Ikatan menjadi efektif jika beban yang diberikan paralel terhadap *interface*. Gambar 2.5 di merupakan mekanisme dari *mechanical bonding*.



Gambar 2.5. Mechanical Bonding [10]

2. *Electrostatic Bonding*

Electrostatic bonding, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6 merupakan proses tarik-menarik antara permukaan yang berbeda tingkat kelistrikannya, yaitu adanya muatan positif (+) serta muatan negatif (-) dan terjadi pada skala atomik. Efektivitas terhadap jenis ikatan ini dapat menurun jika ada kontaminasi permukaan dan kehadiran gas yang terperangkap.

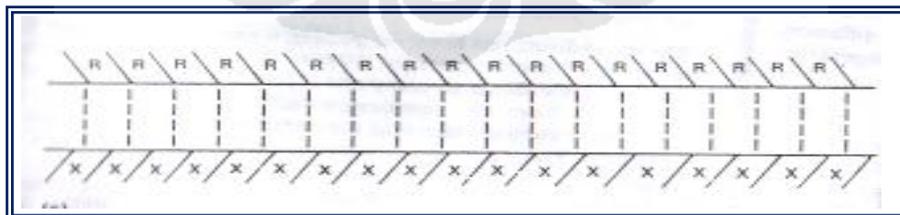


Gambar 2.6. *Electrostatic Bonding* [10]

Berdasarkan prinsip *electrical double layer* yang terbentuk dari penggabungan dua material akan menghasilkan gaya tarik-menarik yang memungkinkan material untuk beradhesi dengan baik.

3. *Chemical Bonding*

Chemical bonding, seperti pada Gambar 2.7 dibentuk oleh grup-grup yang bersifat kimia pada permukaan penguat (X) dan matriks (R). Kekuatan ikatan ditentukan oleh jumlah ikatan kimiawi menurut luas dan tipe ikatan kimia itu sendiri. Ikatan kimia ini terbentuk karena adanya *wetting agent*.

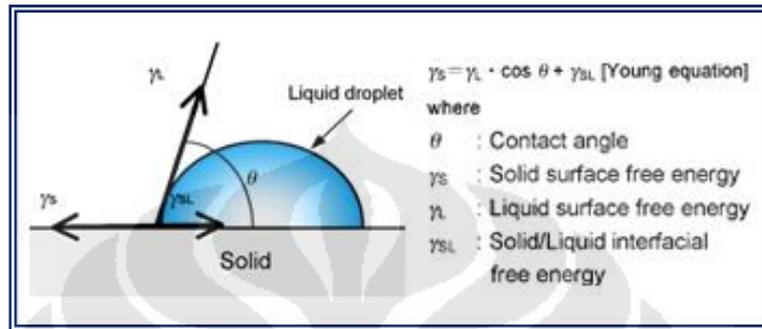


Gambar 2.7. *Chemical Bonding* [10]

Pembasahan (*wettability*) dihasilkan dari interaksi antarmolekul ketika keduanya terbawa secara bersamaan, sehingga merupakan kontak antara fasa *liquid* dan permukaan fasa *solid*. Derajat pembasahan dijelaskan dengan sudut kontak (*contact angle*), yaitu sudut antarmuka fasa *liquid-vapor* bertemu dengan

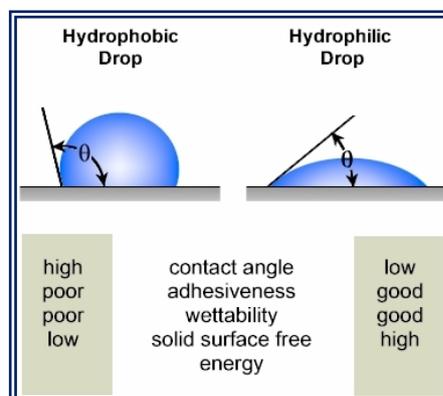
antarmuka fasa *solid-liquid*. Jika pembasahan sangat baik, maka sudut kontak kecil dan cairan akan menyebar lebih luas sehingga menutupi daerah permukaan.

Sudut kontak dengan besar $\geq 90^\circ$ memiliki karakteristik permukaan yang tidak membasahi (*not wettable*), sedangkan untuk sudut kontak dengan besar $\leq 90^\circ$ bersifat membasahi (*wettable*). Pembasahan juga penting dalam daya lekat antar material (*adherence*).



Gambar 2.8. Gaya yang dihasilkan pada peristiwa *wetting* [11]

Dari rumus persamaan Young dan dari Gambar 2.8 di atas, maka nilai sudut kontak (θ) $\leq 90^\circ$ akan menghasilkan nilai cosinus yang semakin besar (mendekati 1), sehingga nilai tegangan permukaan (γ) *liquid-vapor* dijumlah dengan nilai tegangan permukaan (γ) *solid-liquid* akan bernilai sama dengan tegangan *solid-vapor*. Hal ini berarti akan terjadi pembasahan antara permukaan fasa *liquid* dan permukaan fasa *solid* pada sudut kontak (θ) $\leq 90^\circ$. Membasahi permukaan dapat diistilahkan dengan *hydrophilic* dan tidak membasahi permukaan dapat diistilahkan dengan *hydrophobic*, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9. Gaya yang dihasilkan pada peristiwa *wetting* [12]

2. 2. 2 *Interface* dan *Wettability* Lapisan Laminat MMC Dengan Pelapisan

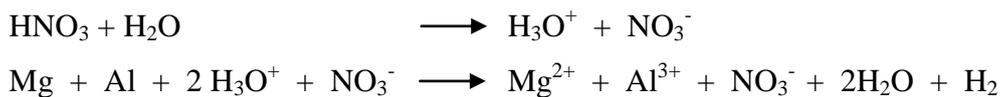
Interface sangat berpengaruh terhadap kekuatan, ketangguhan, kekakuan, ketahanan mulur dan degradasi terhadap lingkungan. *Interface* dapat berupa ikatan atom sederhana, reaksi antarmatriks, atau penguatan pada pelapisan. Pada umumnya, *interface* diusahakan tanpa ketebalan atau volume.

MMC terdiri dari komposisi logam dan nonorganik material penguat. *Interface* yang lemah akan menginisiasi terjadinya perambatan retak pada permukaan. Jika matriks lebih lemah dibandingkan tegangan antarmuka dan kekuatan partikel penguat, maka retak akan merambat pada matiksnya saja.

Perbedaan keterbasahan dan aglomerasi di dalam bahan komposit berbasis serbuk dapat menurunkan sifat mekanik bahan yang akan dihasilkan, karena ikatan antarmuka yang terbentuk antara matriks dan penguat tidak begitu sempurna. Permukaan partikel penguat dapat direkayasa dengan metoda *electroless plating*, yaitu pelapisan dengan mendeposisikan logam pada sebuah substrat pada media larutan polar sebagai agen pereduksinya dan hasilnya berupa lapisan oksida logam tipis yang berperan sebagai pengikat [13]. Selain untuk meningkatkan keterbasahan, penggunaan metoda *electroless plating* juga dapat mengurangi aglomerasi pada penguat. Kelebihan *electroless plating*, yaitu:

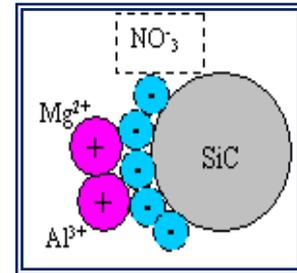
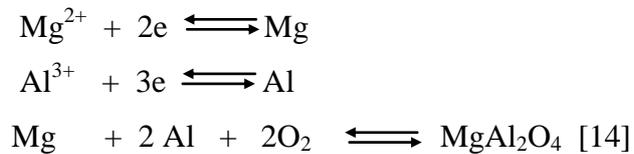
- Biaya relatif murah
- Penggunaan pada temperatur rendah
- Dalam proses pelapisannya mengurangi terjadinya oksidasi pada substrat
- Proses pelapisannya tidak bergantung pada bentuk geometri spesimen substrat

Pelapisan yang dilakukan pada partikel penguat menghasilkan lapisan $MgAl_2O_4$ (*spinel*) dengan metoda *electroless plating*. Lapisan $MgAl_2O_4$ dibuat dengan cara melarutkan serbuk Mg dan Al ke dalam larutan polar HNO_3 . Reaksi yang terjadi yaitu:



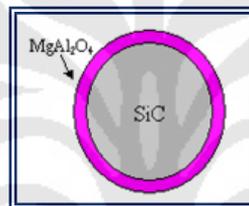
Serbuk penguat yang bersifat *inert* dimasukkan ke dalam larutan HNO_3 untuk dilakukan pendeposisian Mg dan Al, kemudian akan termuati oleh sisa

asam NO_3^- yang mengakibatkan terjadinya gaya elektrostatis antar ion-ion Mg^{2+} dan Al^{3+} , seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Mekanisme pelapisan MgAl_2O_4 pada permukaan penguat SiC [15]

Partikel SiC yang akhirnya terlapiasi MgAl_2O_4 (*spinel*) pada permukaannya sebagaimana Gambar 2.15.



Gambar 2.11. Ilustrasi permukaan penguat SiC yang telah terlapiasi MgAl_2O_4 [15]

Pelapisan *spinel* juga dilakukan pada permukaan partikel Al_2O_3 dengan metoda *elektroless plating* dan dapat meningkatkan kualitas ikatan antar matriks dan penguat pada sistem komposit isotropik Al/ Al_2O_3 [15].

2. 3 Material

2. 3. 1 Aluminium

Aluminium merupakan unsur logam ketiga terbanyak di dunia dan terdapat di alam kira-kira sebanyak 8%. Aluminium juga banyak diproduksi karena mudah diperoleh, harganya relatif murah dan memiliki sifat-sifat fisik serta mekanik yang relatif baik. Pada komposit laminat hibrid ini, aluminium berperan sebagai matriks yang berfungsi sebagai media transfer beban ke penguat, menahan penyebaran retak dan melindungi penguat dari efek 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 [16].

Pada Tabel 2.1 ditunjukkan sifat-sifat dari logam aluminium, baik sifat fisik, sifat mekanis maupun sifat lainnya.

Tabel 2.1. Sifat-sifat Logam Aluminium [4]

Sifat Fisik	Satuan	Nilai
Densitas (T = 20°C)	gram/cm ³	2,7
Nomor Atom	-	13
Berat Atom	gram/mol	26,67
Warna	-	Putih keperakan
Sruktur 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
Sifat Mekanis	Satuan	Nilai
Modulus Elastis	GPa	71
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0,35
Kekerasan	VHN	19
Kekuatan Luluh	Mpa	25
Ketangguhan	Mpa m	33
Konduktivitas Panas	W/mK	237
Kapasitas Panas	°C ⁻¹	2,08.10 ⁻² (23,6 Ppm°)
Koefisien Ekspansi Termal	10 ⁻⁵ /°C	2,4
Sifat-sifat Lain	Satuan	Nilai
Ketahanan Korosi	-	Sangat baik
<i>Formability</i> & <i>Machinability</i>	-	Baik

2. 3. 2 Silikon Karbida (SiC)

Silikon karbida merupakan salah satu jenis keramik yang sering digunakan sebagai penguat dalam komposit. Silikon karbida atau SiC memiliki kekerasan yang tinggi, sehingga dapat meningkatkan sifat mekanis pada komposit. Sifat-sifat dari SiC secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini:

Tabel 2.2. Sifat-sifat Silikon Karbida [16]

Sifat Fisik	Satuan	Nilai
Densitas	g/cm ³	3,15
Berat Atom	g/mol	40,1
Warna	-	Hitam
Struktur Kristal	-	Hexagonal
Titik Lebur	°C	2700
Titik Didih	°C	2972
Sifat Mekanik	Satuan	Nilai
Modulus Elastisitas	GPa	410
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0,14
Kekuatan Tekan	MPa	3900
Kekerasan	VHN	3500
Kekuatan Luluh	MPa	450
Ketangguhan	MPa m	4,5
Sifat Thermal	Satuan	Nilai
Konduktivitas Panas	W/m °K	120
Koefisien Ekspansi Termal	10 ⁻⁶ /°C	4,0
<i>Specific Heat</i>	J/kg.K	750
Kapasitas Panas	°C ⁻¹	3,7.10-6 (2,7 Ppm/°)

2. 3. 3 Alumina (Al₂O₃)

Penambahan penguat alumina bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, kekakuan dan ketahanan material komposit. Alumina merupakan salah satu jenis keramik oksida yang keras.

Sifat-sifat mekanis dari material alumina adalah [18]:

- ✓ Daya hantar panas yang baik
- ✓ Ketahanan terhadap api yang baik
- ✓ Tahan aus dan tahan terhadap korosi
- ✓ Kekerasan yang tinggi

Secara teoritis, kecenderungan meningkatnya fraksi volume dari alumina akan meningkatkan kekuatan tekan. Ini dikarenakan sifat penguatannya yang semakin tinggi dan akibatnya pengikatan antarkomponen matriks dan penguat semakin tinggi, sehingga beban mekanis yang diberikan akan mampu ditahan oleh material. Sifat-sifat alumina secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Sifat-sifat Alumina [19]

Sifat Fisik	Satuan	Nilai
Densitas	g/cm ³	3.89
Warna	-	ivory
Struktur Kristal	-	polikristalin
Titik Lebur	°C	1750
Sifat Mekanik	Satuan	Nilai
Modulus Elastisitas	GPa	375
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0.22
Kekuatan Tekan	MPa	379
Kekerasan	Kg/mm ²	1440
Sifat Thermal	Satuan	Nilai
Konduktivitas Panas	W/m °K	35
Koefisien Ekspansi Thermal	10 ⁻⁶ /°C	8.4
<i>Specific Heat</i>	J/kg.K	880
Kapasitas Panas	°C ⁻¹	9.10-6 (6,5 Ppm/ °C)

2. 3. 4 Magnesium (Mg)

Dalam pembuatan komposit, Mg digunakan sebagai *wetting agent*, yaitu sebagai pengikat *interface* antara matriks dan penguat. Logam ini berfungsi untuk memperkuat ikatan adhesi antara dua unsur atau lebih pembentuk komposit [3]. Sifat-sifat logam Mg dapat dilihat pada Tabel 2.4 di bawah ini.

Tabel 2.4. Sifat-sifat Magnesium [20]

Sifat Fisik	Satuan	Nilai
Densitas	g/cm ³	1,738
Berat Atom	g/mol	24,305
Warna	-	Putih keperakan
Struktur Kristal	-	Hexagonal
Titik Lebur	°C	650
Titik Didih	°C	1090
Sifat Mekanik	Satuan	Nilai
Modulus Elastisitas	GPa	
Ratio Poisson	-	0,29
Kekuatan Tekan	MPa	
Kekerasan	BHN	260
Kekuatan Luluh	MPa	45
Ketangguhan	MPa m	
Sifat Thermal	Satuan	Nilai
Konduktivitas Panas	W/m °K	156
Koefisien Ekspansi Thermal	µm/(m·K)	24.8
Kapasitas Panas	J/(mol·K)	24,869

2. 4 Metalurgi Serbuk

Metalurgi serbuk merupakan suatu kegiatan yang mencakup pembuatan benda dari serbuk logam melalui penekanan dengan pemanasan pada suhu tinggi.

Teknik pemrosesan dengan metalurgi serbuk memiliki kelebihan dibandingkan dengan proses lain, diantaranya [21]:

- Kontrol material lebih mudah sehingga lebih mudah didapatkan sifat mekanik dan sifat fisik sesuai dengan variasi yang kita inginkan.
- Produk lebih beraneka ragam
Dapat dikombinasikan dengan logam seperti Co, Ni, stainless steel, baja karbon rendah, besi murni, logam-logam refraktori serta karbida. Cara metalurgi serbuk juga dapat membuat bahan *non-ferrous*, campuran bahan logam dan non-logam, bahkan bentuk yang rumit.
- Dapat membuat bantalan swa pelumas (*self lubricating bearing*)
Self lubricating ini dibuat dengan cara mencelupkan material ke dalam minyak, dan diharapkan minyak dapat menyerap ke pori-pori. Sehingga, kita tidak perlu memberikan pelumas pada benda kerja.
- Untuk filtrasi
Ini dikarenakan kita dapat membuat bagian serbuk dengan porositas yang dikendalikan. Maka, dengan porositas tertentu material ini dapat dibuat sebagai filter/penyaring.
- Toleransi ukuran ketat
Benda jadi dalam bakalan sesudah disinter pada umumnya memiliki ukuran yang presisi, sehingga tidak diperlukan permesinan lebih lanjut setelah proses sinter.
- Memiliki ketahanan aus yang baik.
Ketahanan aus yang baik diperoleh dengan adanya paduan logam-logam atau partikel yang keras.
- Sifat mampu redam yang baik.

Proses metalurgi serbuk juga memiliki kerbatasan, yaitu:

- Ukuran benda yang akan dibuat terbatas.
Panjang maksimal 15 cm dengan luas 0,2 m² dan berat 10 kg. Keterbatasan ini disebabkan oleh homogenisasi pemanasan yang sulit dilakukan jika benda terlalu besar.
- Sifat benda hasil proses metalurgi serbuk lebih rendah daripada benda pejal dengan material yang sama

Ini disebabkan akibat berat jenis produk metalurgi serbuk yang dicapai hanya 95% berat jenis benda pejal.

- Kemurniannya kurang
Luas permukaan serbuk relatif tinggi dibandingkan dengan berat serbuk, sehingga mudah teroksidasi dan menyebabkan benda terkontaminasi.
- Korosi
Benda serbuk memiliki porositas, maka serbuk lebih peka terhadap oksidasi dibanding benda pejal.
- Keterbatasan karena pembentukkan
Semakin rumit bentuk produk, maka bentuk cetakan semakin rumit dan sulit untuk pembuatan cetakannya.

2. 4. 1 Karakteristik Serbuk

Karakteristik serbuk dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya ukuran dan distribusi partikel, bentuk partikel, luas permukaan partikel, berat jenis serbuk, mampu alir, kompresibilitas, gesekan antar partikel dan komposisi kimia serbuk [21]. Hal-hal tersebut dapat mempengaruhi sifat serbuk dari logam yang akan dihasilkan dan tingkah laku serbuk logam selama pemrosesan.

2.4.1.1 Ukuran dan Distribusi Partikel

Ukuran partikel dapat didefinisikan sebagai ukuran linear dari partikel oleh analisa ayak [21]. Ukuran partikel ini akan sangat menentukan densitas serta porositas juga sifat mekanis dari material serbuk hasil kompaksi (bakalan). Untuk proses metalurgi serbuk, serbuk logam yang sesuai umumnya berukuran antara 0,1 – 1000 μm . Ada beberapa teknik yang dapat dilakukan untuk menentukan ukuran partikel serbuk, diantaranya dengan pengayakan (*screening*), mikroskop, teknik sedimentasi, hamburan cahaya (*light scattering*), konduktivitas listrik, penghalangan cahaya (*light blocking*) [21]. Beberapa pengaruh ukuran partikel serbuk terhadap karakteristik serbuk, antara lain [22]:

- ❖ Ukuran partikel yang halus sangat diperlukan untuk kompaksi serbuk yang keras atau getas, karena dengan semakin tingginya gesekan antarpartikel akan membantu meningkatkan kekuatan adhesi bakalan.

- ❖ Serbuk-sebuk yang kasar memiliki kepadatan yang seragam saat dilakukan kompaksi, tetapi luas permukaan kontak antarpartikel menjadi kecil yang mengakibatkan proses difusi saat proses sinter kurang baik sehingga menyebabkan banyak pori dan menurunkan sifat mekanik produk.

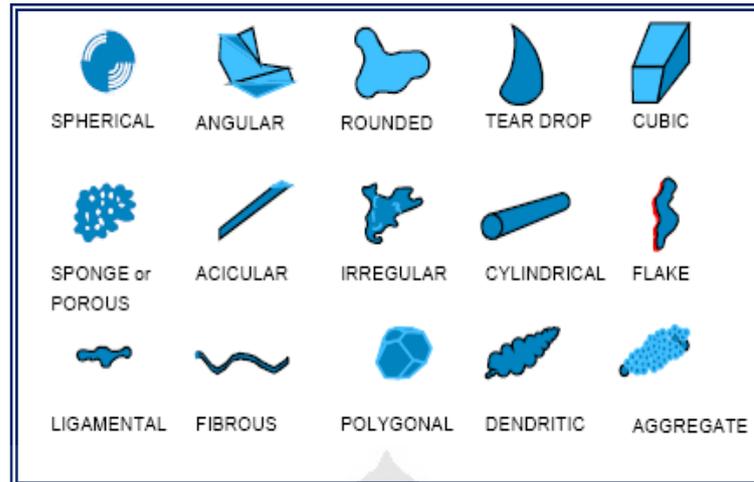
Distribusi ukuran partikel serbuk menyatakan penyebaran serbuk untuk ukuran tertentu dengan tujuan untuk menampilkan hasil pengukuran kerapatan maksimum suatu partikel. Distribusi ukuran partikel ini sangat menentukan kemampuan partikel dalam mengisi ruang kosong antarpartikel untuk mencapai volume terpadat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

2.4.1.2 Bentuk Partikel Serbuk

Bentuk partikel serbuk sangat mempengaruhi sifat massa serbuk, yaitu efisiensi pemadatan (*packing efisiensi*), mampu alir (*flowability*) dan mampu tekan (*compressibility*). Berdasarkan standar ISO 3532, bentuk partikel serbuk dapat diklasifikasikan seperti pada Tabel 2.5 dan dapat dilihat pada Gambar 2.12.

Tabel 2.5. Klasifikasi partikel serbuk [22]

Klasifikasi Partikel Serbuk	Bentuk Partkel Serbuk
<i>Acicular</i>	Jarum
<i>Angular</i>	Polihedral kasar dengan tepi tajam
<i>Dendritic</i>	Kristalin dan bercabang
<i>Fibrous</i>	Serabut yang beraturan atau tidak beraturan
<i>Flaky</i>	Serpihan
<i>Granular</i>	Tidak beraturan dan hampir bulat
<i>Irregular</i>	Tidak beraturan dan tidak memiliki simetri
<i>Nodular</i>	Bulat dan tidak beraturan
<i>Spheroidal</i>	Bulat



Gambar 2.12. Bentuk partikel serbuk [23]

2.4.1.3 Luas Permukaan Partikel

Luas permukaan berhubungan erat dengan kontak antarpartikel yang dapat mempengaruhi proses difusi saat dilakukan proses sinter. Jika luas permukaan partikel besar, kontak antarpartikel juga semakin besar sehingga akan meningkatkan mekanisme ikatan antarpartikel secara difusi saat proses sinter. Sedangkan jika luas permukaan partikel kecil, kontak antarpartikel sedikit sehingga proses difusi saat proses sinter juga kurang baik dan menyebabkan banyak pori.

2.4.1.4 Berat Jenis Serbuk

Berat jenis serbuk adalah tingkat kerapatan atau kepadatan dari serbuk. Terdapat istilah lain mengenai berat jenis dalam proses metalurgi serbuk, diantaranya:

- *Theoretical density*, yaitu berat jenis sesungguhnya dari material serbuk ketika material serbuk tersebut ditekan hingga menghasilkan serbuk tanpa pori [21].
- *Green density*, yaitu berat jenis serbuk setelah serbuk mengalami penekanan kompaksi untuk proses pemanasan (*sintering*) [21].
- *Apperent density* atau *bulk density*, yaitu berat per satuan volume dari serbuk dalam keadaan bebas tanpa agitasi [24].
- *Tap density*, yaitu berat jenis tertinggi yang dicapai dengan vibrasi tanpa aplikasi terkanan luar [24].

Ketidakhomogenan berat jenis bakalan (*green density*) yang dihasilkan dari proses kompaksi seringkali terjadi, sehingga dilakukan beberapa cara yang dapat mengurangi hal tersebut, seperti [21]:

- 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.

2.4.1.5 Mampu Alir Serbuk (*flowability*)

Mampu alir merupakan karakteristik yang menggambarkan sifat alir serbuk dan kemampuan memenuhi ruang cetak [21]. Pada umumnya, faktor-faktor yang mengurangi gesekan antarpartikel atau meningkatkan berat jenis (*apparent density*), seperti partikel bulat dan halus akan meningkatkan mampu alir serbuk [22].

2.4.1.6 Kompresibilitas

Kompresibilitas adalah perbandingan volume serbuk mula-mula dengan volume benda yang ditekan yang nilainya berbeda-beda tergantung distribusi ukuran serbuk dan bentuk serbuknya [21]. 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.

2.4.1.7 Gesekan Antar Partikel

Nilai gaya gesek antarpartikel serbuk merupakan hal yang menentukan keberhasilan pencampuran dan pengadukan serbuk.

Gaya gesek antarpartikel serbuk dipengaruhi oleh [21]:

➤ Efisiensi Pencampuran Serbuk

Pencampuran dan pengadukan tergantung aliran partikel ketika melewati partikel yang lainnya dalam satu campuran. Gaya gesek antarpartikel serbuk yang tinggi akan membuat pencampuran dan pengadukan lebih sulit. Gaya gesek tersebut dapat diminimalkan dengan memperbaiki ukuran dan bentuk partikel.

➤ Pelumasan Terhadap Serbuk

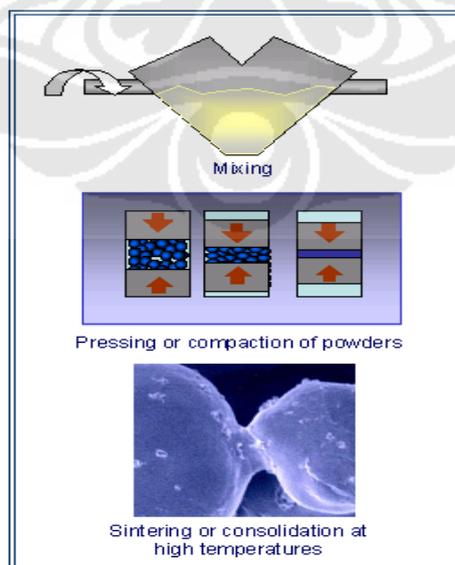
Pelumas berfungsi untuk mengurangi keausan peralatan, mengurangi gesekan antarserbuk dan mengurangi gesekan antara serbuk dengan dinding cetakan. %pelumasan yang tinggi akan mengakibatkan berat bakalan tinggi.

2. 4. 2 Tahapan Proses Metalurgi Serbuk

Tahapan dalam proses metalurgi serbuk, meliputi:

1. Pencampuran (*blending/mixing*)
2. Penekanan (*compaction/pressing*)
3. Pemanasan (*sintering/consolidation*)

Tahapan tersebut, secara singkat dapat dilihat pada Gambar 2.13 di bawah ini.



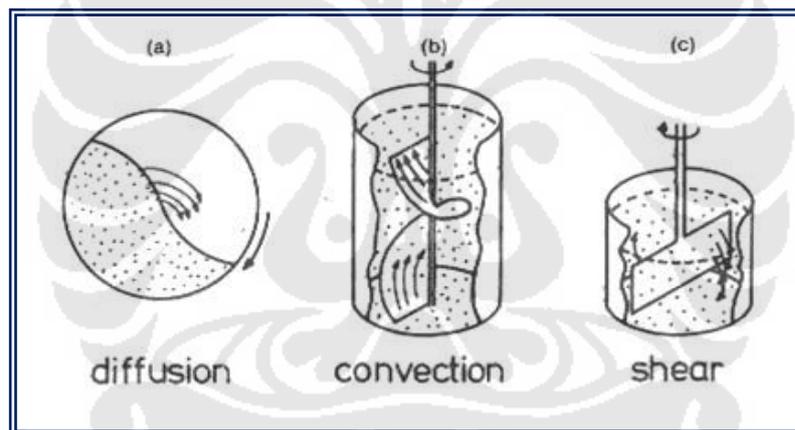
Gambar 2.13. Tahapan proses metalurgi serbuk [25]

2.4.2.1 Pencampuran (*blending/mixing*)

Pencampuran dan pengadukan partikel serbuk adalah proses bercampurnya serbuk secara sempurna dengan masing-masing besaran komposisi guna menghasilkan serbuk yang homogen [17]. Mekanisme yang terjadi selama proses pencampuran serbuk tergantung dari metoda pencampuran yang digunakan, yaitu [21]:

- Difusi, merupakan pencampuran karena gerak antarpartikel serbuk yang dihasilkan oleh perputaran drum
- Konveksi, merupakan pencampuran karena ulir di dalam kontainer berputar pada porosnya
- Geser, merupakan pencampuran karena menggunakan suatu media pengaduk

Mekanisme pencampuran dan pengadukan serbuk dapat diilustrasikan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Mekanisme pencampuran dan pengadukan serbuk [21]

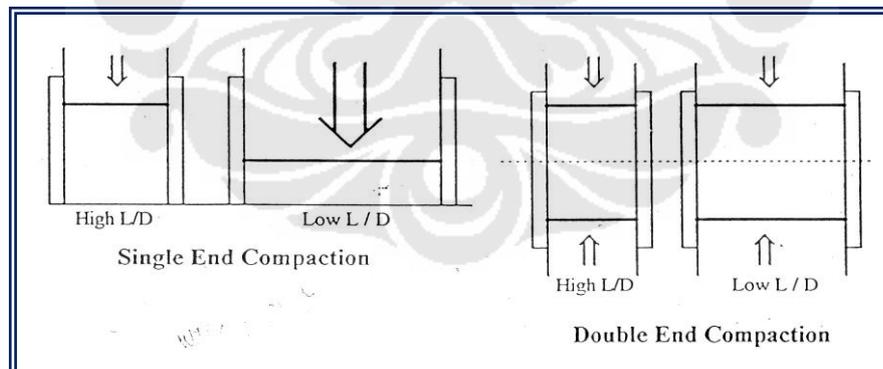
Dampak negatif pengadukan dan pencampuran terhadap serbuk, diantaranya [21]:

- Partikel logam akan lebih sulit dikompaksi.
- Kontaminasi terhadap serbuk dapat terjadi selama pengadukan dan pencampuran
- Disain alat pencampur yang buruk dapat mengakibatkan segregasi partikel

2.4.2.2 Penekanan (*compaction/pressing*)

Kompaksi adalah suatu proses pembentukan atau pemampatan terhadap serbuk murni, paduan atau campuran dari berbagai jenis serbuk sehingga mempunyai bentuk tertentu dan mempunyai kekuatan yang cukup untuk mengalami proses selanjutnya [21]. Peningkatan penekanan akan menghasilkan penurunan porositas. Ketika tekanan kompaksi dinaikkan, jumlah partikel yang mengalami deformasi plastis akan meningkat [26]. Dengan penekanan yang cukup, seluruh partikel akan mengalami *work (strain) hardening* ketika jumlah porositas berkurang [24].

Kompaksi dapat dilakukan melalui *cold compaction* dan *hot pressing* baik dengan penekanan satu arah (*single end compaction*) ataupun penekanan dua arah (*double end punch*). Pada umumnya, *cold compaction* digunakan untuk serbuk yang mudah teroksidasi, sedangkan *hot pressing* dilakukan untuk serbuk yang tidak mudah teroksidasi. Pada penekanan satu arah, penekan (*punch*) bagian atas bergerak ke bawah, sedangkan pada penekanan dua arah terdapat dua *punch*, yaitu *punch* atas dan *punch* bawah yang bergerak secara bersamaan dengan arah berlawanan. Penekanan satu arah maupun dua arah dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Jenis kompaksi/penekanan

Pada saat kompaksi, terdapat beberapa tahapan yang terjadi pada serbuk, yaitu [21]:

- a. Penataulangan partikel serbuk (*rearrangement*)

Saat dimulai penekanan, serbuk mulai mengalami penyesuaian letak pada tempat-tempat yang lebih luas atau 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 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.

b. Deformasi elastis partikel serbuk

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.

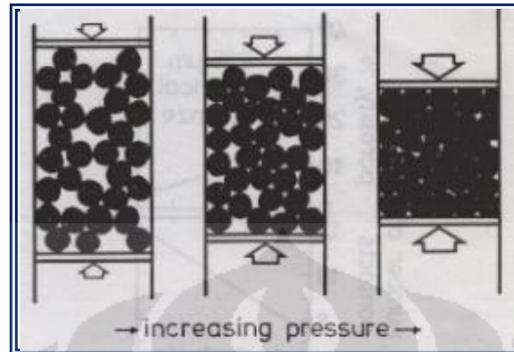
c. Deformasi plastis partikel serbuk

Deformasi plastis merupakan bagian terpenting dari mekanisme pemadatan selama kompaksi berlangsung. Pada tahap ini, semakin tinggi tekanan kompaksi yang diberikan menyebabkan meningkatnya derajat deformasi plastis dan pemadatan yang terjadi. Ada beberapa faktor yang menentukan deformasi plastis, antara lain kekerasan dan perpindahan tegangan antarpartikel yang berdekatan dan terjadi peningkatan nilai kekerasan.

d. Penghancuran partikel serbuk

Setelah serbuk mengalami deformasi plastis, serbuk mengalami *mechanical interlocking* (antarbutir saling mengunci). Mekanisme ini disebut ikatan *cold weld*, yaitu 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 dibawah permukaan oksida terdapat permukaan yang bersih. Oleh karena itu, diperlukan pemecahan lapisan oksida sebelum terjadi *cold weld*. Ketika serbuk ditekan, berat jenis serbuk naik, porositas menurun karena rongga berkurang. Selain

itu, serbuk juga mengalami distribusi berat jenis yang tidak merata, pada bagian atas (dekat *punch*) berat jenis serbuk lebih besar dibandingkan pada bagian tengah. Perilaku serbuk saat kompaksi seiring dengan meningkatnya tekanan kompaksi ditunjukkan pada Gambar 2.16.



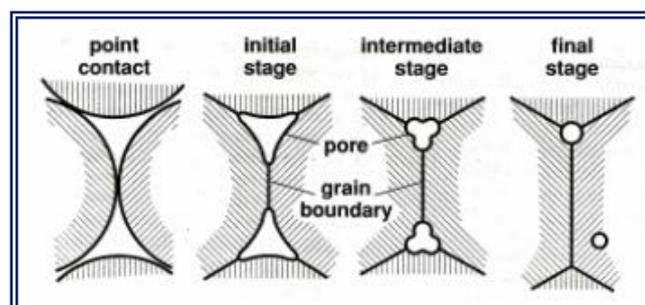
Gambar 2.16. Perilaku serbuk saat kompaksi [24]

2.4.2.3 Pemanasan (*sintering/consolidation*)

Proses sinter merupakan proses pemanasan, dengan atau tanpa aplikasi tekanan sehingga partikel akan saling berikatan secara kimia menjadi struktur yang kohern [16]. Proses sinter biasanya akan diikuti dengan adanya peningkatan sifat mekanik jika dibandingkan dengan material hasil kompaksi yang belum melalui proses sinter. Hal ini diakibatkan oleh penyatuan dari partikel-partikel tersebut sehingga dapat meningkatkan densitas produk atau biasa disebut proses densifikasi (pemadatan) [28]. Gaya penggerak utama pada proses sinter adalah penurunan energi bebas sistem. Ikatan yang terbentuk akan meningkatkan kekuatan dan menurunkan energi dari sistem [16].

❖ Tahapan Proses Sinter

Secara umum, terdapat 4 tahapan pada proses sinter sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.17, yaitu [18]:



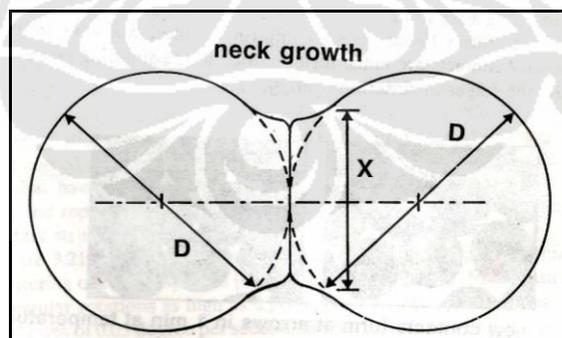
Gambar 2.17. Perilaku serbuk pada tahapan *Sintering*[16]

1. *Point contact* (ikatan awal partikel)

Pada awal tahap ini, partikel bebas membentuk kontak dengan partikel lainnya pada orientasi acak dan tahap adhesi terjadi secara spontan dengan dimulainya pembentukan ikatan sinter. 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 dapat mengurangi jumlah bidang kontak sehingga kekuatan produk sinter juga menurun.

2. *Initial stage*

Pada tahap ini, pada daerah kontak antarpartikel terjadi perpindahan massa yang menyebabkan terjadinya pertumbuhan leher [22]. Tahap ini berakhir saat rasio ukuran leher (X/D) mencapai 0,3 [16]. Pada tahap ini pula pori mulai terpisah karena titik kontak membentuk batas butir, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18.

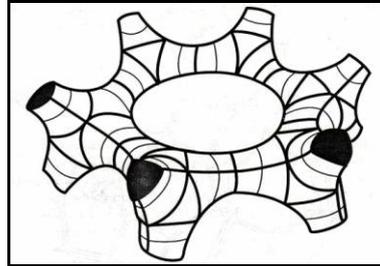


Gambar 2.18 Tahap pertumbuhan leher dengan rasio X/D [16]

3. *Intermediate stage*

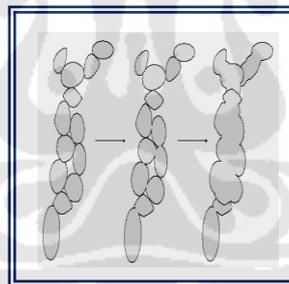
Pada tahap ini terjadi proses pemadatan, pertumbuhan butir dan struktur pori menjadi halus. Geometri batas butir dan pori yang terjadi pada tahap ini tergantung pada laju proses sinter. Awalnya, pori terletak pada bagian batas butir yang memberikan struktur pori [24]. Tahap ini

merupakan tahap terpenting dalam penentuan terhadap pemadatan (densifikasi) dan sifat mekanik bakalan sinter. Struktur pori yang terbentuk pada tahap *intermediate stage* dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Struktur pori pada *intermediate stage* [24]

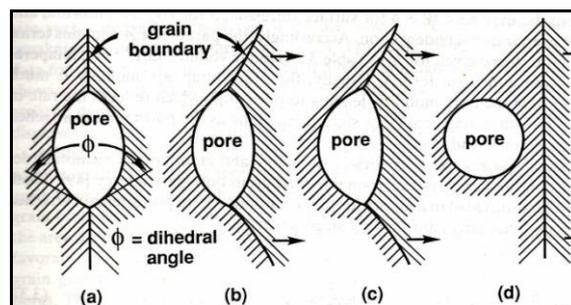
Pemadatan yang terjadi pada tahap ini diikuti oleh difusi volume dan difusi batas butir. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan sinter serta semakin kecil partikel serbuk, maka ikatan dan densifikasi yang terjadi juga semakin tinggi. Pertumbuhan butir yang terjadi dapat mengeliminasi jumlah porositas yang ada, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20. Pertumbuhan butir yang mengeliminasi porositas

4. *Final stage*

Pada tahapan ini proses berjalan lambat. Pemisahan pori pada tahap akhir ini dapat dilihat pada Gambar 2.21 di bawah ini.

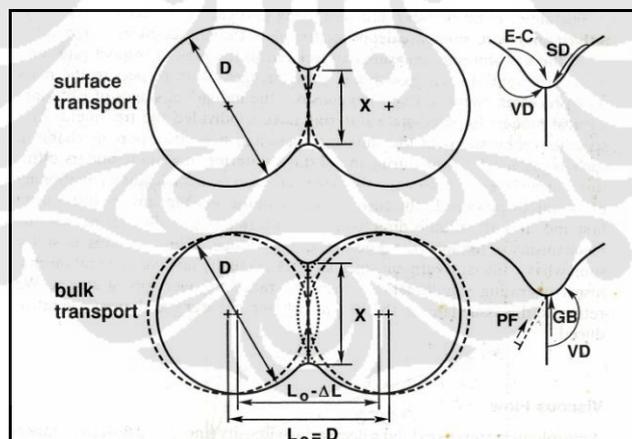


Gambar 2.21. Pemisahan dan pembulatan pori pada *final stage* [16]

Pori-pori yang bulat menyusut dengan adanya mekanisme difusi ruah (*bulk diffusion*). 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 dan 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.

❖ Mekanisme Transport Massa

Mekanisme perpindahan/transport merupakan pergerakan massa sebagai respon dari gaya penggerak (*driving force*). Mekanisme transport massa tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.22 di bawah ini.



Gambar 2.22. Mekanisme transport massa [24]

Terdapat dua mekanisme transport massa yang terjadi dalam proses sinter, yaitu [16]:

1. *Transport Permukaan (Surface Transport)*

Transport permukaan menghasilkan pertumbuhan leher tanpa terjadi perubahan jarak antarpartikel (tidak ada penyusutan dan densifikasi) karena massa mengalir dan berakhir pada permukaan partikel. Difusi

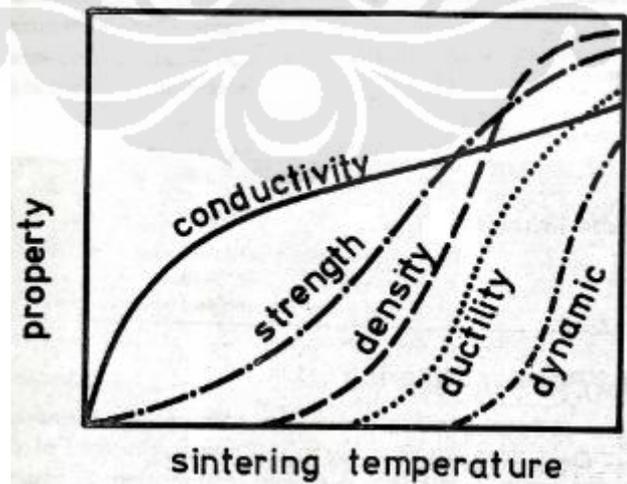
permukaan dan penguapan kondensasi merupakan kontribusi penting selama sinter transport permukaan.

2. *Transport Ruah (Bulk Transport)*

Transport ruah melibatkan difusi volume, difusi batas butir, aliran plastis, dan aliran rekat. Aliran plastis biasanya penting hanya ketika pemanasan, terutama untuk serbuk yang telah dikompaksi, dimana berat jenis dislokasi awal tinggi. Pembentukan aliran rekat juga memungkinkan untuk logam dengan fasa cair berada pada batas butir. Difusi batas butir penting untuk densifikasi material kristalin, umumnya, transport ruah aktif pada temperatur tinggi.

❖ Pengaruh Temperatur Terhadap Proses Sinter

Temperatur sangat mempengaruhi perpindahan massa pada proses sinter karena dengan meningkatnya temperatur sinter, akan mendorong terjadinya *interdiffusion* dari serbuk hasil kompaksi (*green compact*) dan meningkatkan kepadatan produk hasil proses sinter. Sehingga, dengan semakin meningkatnya temperatur sinter, semakin meningkat pula sifat mekanis bakalan yang telah dilakukan proses sinter. Pada Gambar 2.23 ditunjukkan pengaruh temperatur sinter terhadap sifat mekanik dari material.



Gambar. 2.23. Pengaruh temperatur sinter terhadap sifat mekanik [24]

Proses sinter juga dapat mempengaruhi banyak hal seperti yang disebutkan pada Tabel 2.6 di bawah ini:

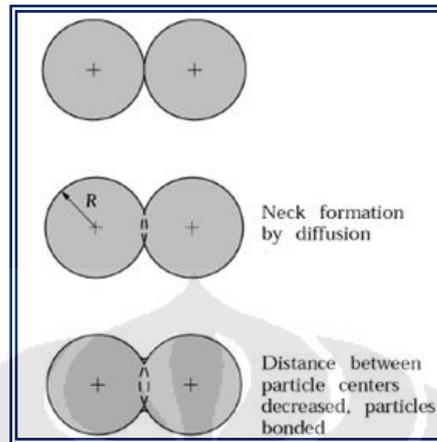
Tabel 2.6 Pengaruh proses sinter [24]

Perubahan dengan Peningkatan Proses Sinter	Pengaruh
Penurunan ukuran partikel	Proses sinter lebih cepat Biaya lebih mahal Tingkat kelarutan pengotor lebih tinggi Peningkatan bahaya akibat panas
Peningkatan waktu sinter	Biaya lebih mahal Pertumbuhan butir dan pengkasaran Mengurangi produktivitas
Peningkatan temperatur	<i>Shrinkage</i> yang terjadi lebih besar Pertumbuhan butir Biaya lebih mahal Kepresisian rendah Sifat semakin baik Keterbatasan dapur Pengkasaran pori
Peningkatan <i>green density</i>	<i>Shrinkage</i> yang terjadi lebih kecil Poros lebih kecil Densitas akhir tinggi Dimensi seragam
Penambahan paduan dan zat aditif	Kekuatan lebih tinggi Masalah kehomogenan Temperatur sinter lebih tinggi

❖ *Solid State Sintering*

Merupakan pemanasan yang dilakukan dengan melibatkan fasa padat, tanpa melibatkan fasa cair. Ikatan yang terbentuk akibat proses sinter mengurangi energi permukaan dengan memindahkan kembali permukaan bebas, dengan eliminasi kedua dari luas batas butir melalui pertumbuhan butir [16]. Dengan bertambahnya pemanasan, memungkinkan pengurangan volume

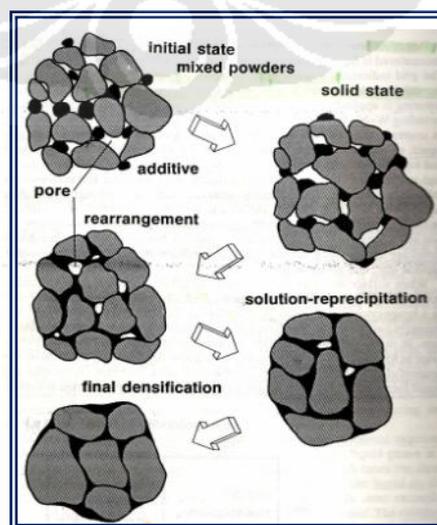
pori menuju *compact shrinkage*, meskipun pada proses sinter perubahan dimensi tidak diinginkan. Perilaku partikel serbuk selama proses *solid-state sintering* dapat dilihat pada Gambar 2.24 di bawah ini.



Gambar 2.24. Perilaku Partikel Serbuk saat *Solid-state sintering*

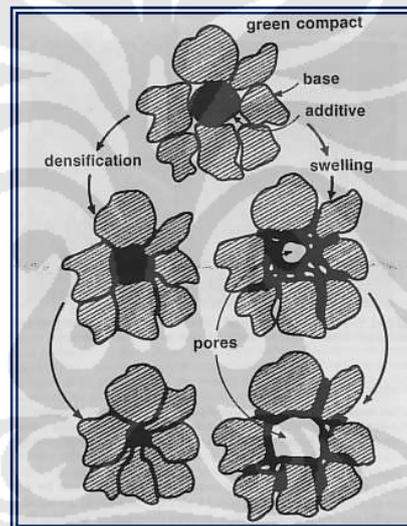
❖ *Liquid Phase Sintering*

Liquid state sintering merupakan proses sinter yang dilakukan pada temperatur tertentu dengan melibatkan fasa cair [24]. Material logam yang dapat dilakukan proses *liquid phase sintering* harus dapat membentuk lapisan di sekeliling fasa padatan dan cairan logam harus memiliki kelarutan terhadap fasa padat, seperti Fe-Cu, Cu-Sn dan W-Cu. Perilaku partikel serbuk selama proses *liquid-state sintering* terlihat pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25. Perilaku partikel serbuk saat proses *liquid phase sintering*

Terdapat dua kelarutan yang tidak boleh diabaikan dalam *liquid phase sintering*, 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 disebut dengan istilah *swelling* seperti diperlihatkan pada Gambar 2.26. Sedangkan, kelarutan padatan dalam cairan semakin besar sangat diinginkan karena mendorong fasa padat masuk ke dalam fasa cair sehingga mengisi porositas yang berada didalam matriks. Peristiwa terisinya porositas ini disebut dengan istilah densifikasi (pemadatan) yang juga diperlihatkan pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26. Proses terjadinya densifikasi dan *swelling* pada *liquid phase sintering*

❖ Atmosfer *Sintering*

Gas-gas yang tidak diinginkan dalam atmosfer sinter tidak hanya dapat bereaksi pada permukaan bakalan tetapi juga dapat berpenetrasi ke struktur pori dan bereaksi ke dalam bakalan. Oleh sebab itu, digunakanlah atmosfer sinter yang bertujuan untuk mengontrol reaksi-reaksi kimia (melindungi logam dari oksidasi) yang terjadi antara bakalan dengan lingkungannya selama proses sinter berlangsung [28].

Atmosfer yang dapat digunakan untuk melindungi bakalan, diantaranya hidrogen, amonia, gas *inert*, nitrogen, vakum dan gas alam. Atmosfer hidrogen digunakan karena mampu untuk mereduksi oksida dan menghasilkan atmosfer dekarburisasi untuk logam *ferrous*. Atmosfer vakum seringkali digunakan karena prosesnya bersih dan kontrol atmosfer cukup mudah. Sedangkan alasan menggunakan gas-gas *inert* seperti argon, helium dan nitrogen karena gas tersebut tidak bereaksi dengan bakalan [24].

