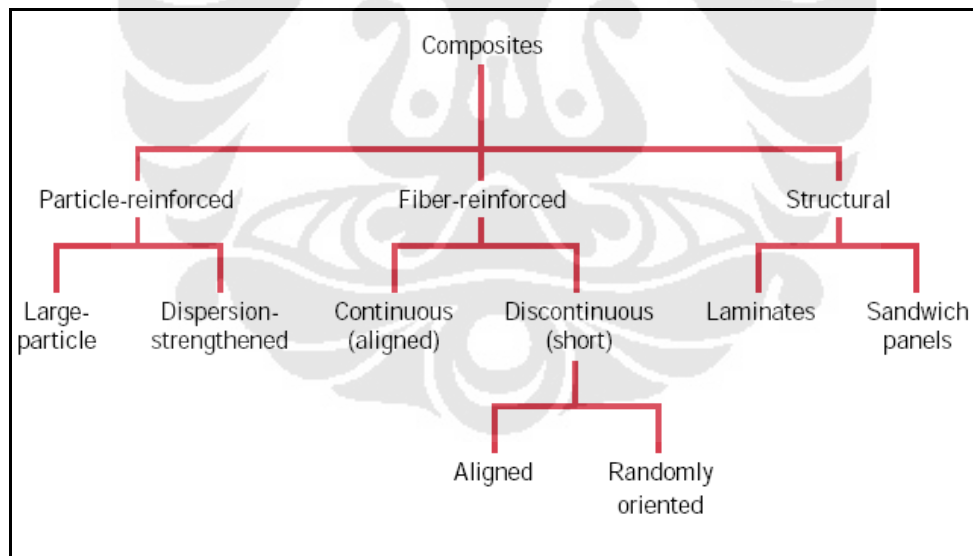


BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Komposit

Material komposit adalah material yang terdiri dari dua atau lebih fasa yang berbeda baik secara fisika ataupun kimia dan memiliki karakteristik yang lebih unggul dari masing-masing komponen penyusunnya [1].

Komposit tersusun dari dua fasa, satu disebut sebagai matriks, dimana matriks bersifat kontinyu dan mengelilingi fasa yang satunya, yang disebut penguat. 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. Berdasarkan jenis penguatnya, komposit dibagi menjadi 3 macam, yaitu komposit dengan penguat partikel, fiber, dan struktural, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.1:



Gambar 2.1 Pembagian Komposit Berdasarkan Jenis Penguat [2]

Berdasarkan sifat penguatannya, maka komposit dibagi menjadi dua:

1. Komposit isotropik, merupakan komposit yang penguatnya memberikan penguatan yang sama untuk berbagai arah sehingga segala pengaruh tegangan atau regangan dari luar akan mempunyai nilai kekuatan yang sama baik arah transversal maupun longitudinal.

2. Komposit anisotropik, merupakan komposit yang penguatnya memberikan penguatan tidak sama terhadap arah yang berbeda, sehingga segala pengaruh tegangan atau regangan dari luar akan mempunyai nilai kekuatan yang tidak sama baik arah transversal maupun longitudinal.

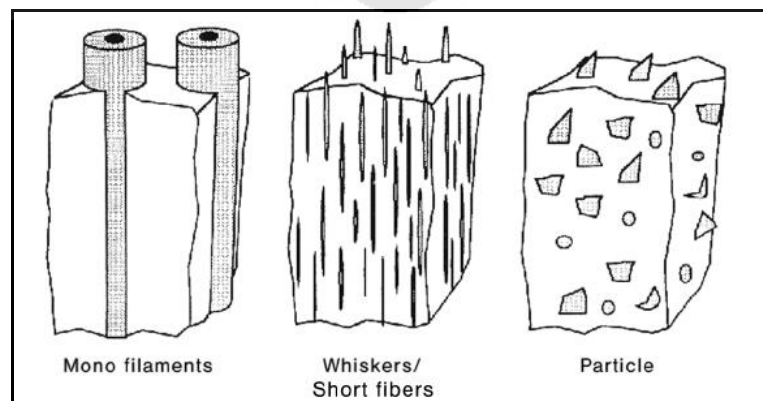
Sedangkan menurut matriks penyusunnya, komposit dapat dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu [3]:

1. Komposit berbasis logam (*Metal Matrix Composite/MMC*)
2. Komposit berbasis polimer (*Polymer Matrix Composite/PMC*)
3. Komposit berbasis keramik (*Ceramic Matrix Composite/CMC*)

Sifat-sifat komposit secara umum bila dibandingkan dengan komponen-komponen penyusunnya antara lain memiliki kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik, lebih ringan, ketahanan aus dan ketahanan korosi yang lebih baik, ketahanan temperatur tinggi dan *creep* yang lebih baik, ketahanan impak serta konduktivitas listrik dan termal yang lebih baik, serta umur fatik yang lebih lama. Hal ini disebabkan oleh sifat-sifat komponen penyusunnya yang saling menutupi kekurangan satu dengan yang lain [4].

2.1.1 Komposit Matriks Logam

Komposit dengan matriks logam atau metal disebut sebagai *metal-matrix composite* (MMC) atau komposit berbasis logam. Pada MMC, penguat dapat berbentuk partikel, *whiskers* atau serat pendek, dan *mono filaments* [1], seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Klasifikasi MMC Berdasarkan Bentuk Penguat [5]

Material MMC memiliki beberapa keuntungan yang sangat penting untuk material struktural. Dibandingkan dengan logam monolitik, MMC memiliki sifat-sifat [3]:

1. Kombinasi kekuatan & modulus yg baik
2. Berat jenis cenderung lebih rendah
3. Rasio kekerasan dengan berat dan modulus dengan berat lebih baik dari logam.
4. Nilai koefisien muai termalnya lebih rendah dari logam
5. Mempunyai *internal damping* yg tinggi
6. Kekuatan fatik cukup baik
7. Konduktivitas panas dan listrik baik

Pemilihan logam yang sesuai sebagai matriks ditentukan oleh aplikasi dari material komposit tersebut. Logam yang biasa digunakan sebagai matriks adalah aluminium dan paduannya yang secara umum disebut sebagai *Aluminium Matrix Composite (AMC)*. Hal ini dikarenakan keunggulan aluminium yang memiliki densitas rendah sehingga dapat menghasilkan produk yang lebih ringan. Selain itu, aluminium juga memiliki keunggulan lain seperti harganya yang cukup ekonomis, memiliki keuletan yang tinggi dan mudah dibentuk. Untuk meningkatkan kekuatannya, maka ditambahkan penguat. Material yang biasa digunakan sebagai penguat biasanya dari golongan keramik, antara lain alumina, silikon karbida, dan partikel grafit.

2.1.2 Komposit Laminat Hibrid

Dalam dunia komposit, dikenal istilah komposit hibrid (*hybrid composite*). Pada komposit hibrid ini, dalam satu matriks memungkinkan adanya dua atau lebih partikel penguat. Sehingga memungkinkan juga terjadinya interaksi maupun proses penguatan yang lebih kompleks, baik terhadap matriks itu sendiri maupun kepada penguat lain dalam satu matriks tersebut. Pada komposit hibrid, perubahan yang signifikan akan sangat terlihat ketika material komposit tersebut dilakukan pembebanan. Kerusakan pada komposit hibrid ini biasanya terjadi secara bertahap (*noncatastrophic*) [6].

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.1, komposit laminat merupakan salah satu jenis komposit berdasarkan strukturnya, yaitu merupakan komposit yang terdiri dari lembaran atau lamina (*ply*) yang membentuk elemen struktur secara integral. Komposit laminat hibrid merupakan salah satu jenis komposit laminat dimana komposit ini tersusun dari lamina-lamina dengan kombinasi yang berbeda dari segi material (jenis penguat dan matriks) serta arah penguat [7].

2.2 Antarmuka (*Interface*) dan Kemampubasahan (*Wettability*) pada Komposit Laminat Hibrid

Antarmuka (*interface*) dapat diartikan sebagai suatu daerah planar dengan ketebalan yang hanya beberapa atom, dimana pada daerah ini terjadi perubahan sifat dari matriks ke penguat. Oleh karena itu, pada antarmuka ini biasanya terdapat ketidak-kontinyuan sifat kimia, struktur kristal dan molekular, sifat mekanis, dan sifat lainnya. Karakteristik dari suatu antarmuka ditentukan oleh ketidak-kontinuan ini sehingga antarmuka spesifik untuk setiap kombinasi matriks-penguat. Harus terdapat ikatan antara matriks dan penguat untuk memungkinkan transfer beban dari matriks ke penguat. Beberapa jenis ikatan yang dapat terjadi pada *interfacial bonding* antara lain [3]:

1. Ikatan Mekanik

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

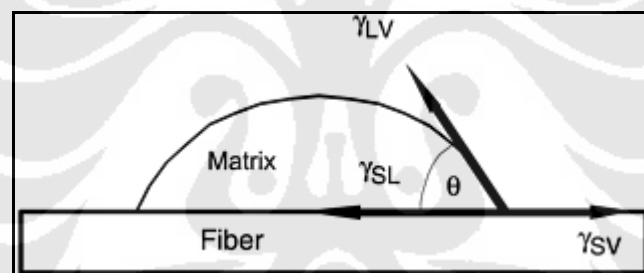
2. Ikatan Elektrostatik

Proses tarik menarik antara permukaan yang berbeda tingkat kelistrikkannya (muatan positif dan muatan negatif) dan terjadi pada skala atomik. Efektivitas terhadap jenis ikatan ini dapat menurun jika ada kontaminasi permukaan dan kehadiran gas yang terperangkap.

3. Ikatan Kimia

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

Kemampubasahan (*wettability*) adalah kemampuan dari cairan matriks untuk tersebar merata kepermukaan suatu padatan. Pembasahan merupakan kontak antara fasa cair dan permukaan fasa padat, dihasilkan dari interaksi antar molekul ketika keduanya terbawa secara bersamaan. Banyaknya pembasahan tergantung dari energi yang diminimalkan. Derajat pembasahan dijelaskan dengan sudut kontak (*contact angle*), sudut dimana antarmuka fasa *liquid-vapor* bertemu dengan antarmuka fasa *solid-liquid*. Sudut kontak dengan besar lebih dari atau sama dengan 90° memiliki karakteristik permukaan yang tidak membasahi (*non wettable*), sedangkan untuk sudut kontak dengan besar kurang dari atau sama dengan 90° bersifat membasahi (*wettable*).



Gambar 2.3 Gaya yang Dihasilkan Pada Peristiwa Pembasahan [4]

Kesetimbangan energi pada sistem disajikan dalam persamaan Young, yaitu [11]:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2.1)$$

Dimana:

- γ_{SV} = tegangan permukaan *solid-vapour*
- γ_{SL} = tegangan permukaan *solid- liquid*
- γ_{LV} = tegangan permukaan *liquid-vapour*
- θ = sudut kontak

Dengan menggunakan rumus persamaan Young diatas , maka nilai sudut kontak $\theta \leq 90^\circ$ akan menghasilkan nilai $\cos \theta$ semakin besar , sehingga nilai

tegangan permukaan *liquid-vapour* (γ_{LV}) dijumlah dengan nilai tegangan permukaan *solid-liquid* (γ_{SL}) akan bernilai sama dengan nilai tegangan permukaan *solid-vapour* (γ_{SV}) atau dengan terjadi pembasahan antara permukaan fasa liquid dan permukaan fasa solid. Kemampubasahan yang baik berarti bahwa cairan akan mengalir pada penguat dan akan menutupi seluruh bagian topografi permukaan baik yang berupa benjolan maupun cekungan dari permukaan kasar penguat. Pembasahan hanya akan terjadi jika viskositas matriks tidak terlalu tinggi dan jika pembasahan menurunkan energi bebas sistem. Dengan demikian matriks dan penguat akan bertemu dalam suatu kontak sehingga terbentuk ikatan antarmuka yang kuat.

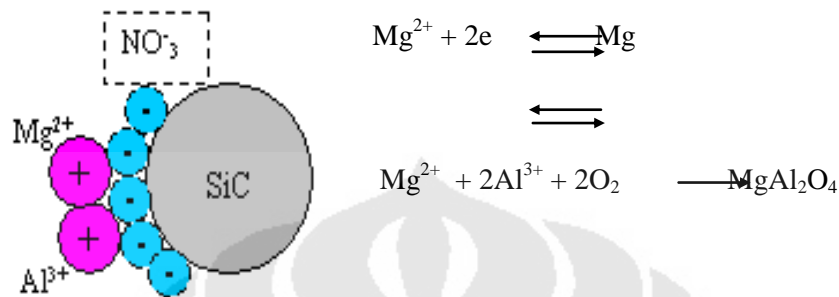
Antarmuka pada matriks-penguat merupakan bagian yang sangat penting pada MMC. Untuk meningkatkan kekuatan antarmuka antara matriks-penguat pada MMC, dapat dilakukan dengan metode *electroless plating* yang dilakukan pada serbuk penguat. *Electroless plating* adalah salah satu metode pelapisan dengan cara mendeposisikan logam pada sebuah substrat dengan media larutan polar sebagai agen pereduksinya. Metoda *electroless plating* mempunyai beberapa keunggulan dibanding metode pelapisan yang lain yaitu biaya yang relatif lebih murah, penggunaan temperatur rendah dalam proses pelapisannya mengurangi terjadinya oksidasi pada substrat, dan yang paling utama adalah proses pelapisannya tidak bergantung pada bentuk geometri spesimen substrat.

Electroless plating yang dilakukan terhadap partikel SiC adalah pelapisan $MgAl_2O_4$ (*spinel*). Lapisan $MgAl_2O_4$ dibuat dengan cara melarutkan serbuk Mg dan Al ke dalam larutan polar HNO_3 . Konsentrasi Mg 0,01 gram dan Al 0,5 gram konstan ke dalam larutan polar HNO_3 40 ml. Reaksi yang terjadi adalah



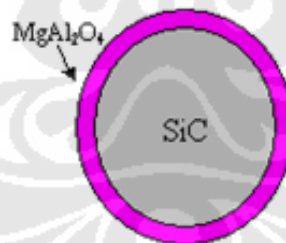
Di mana $H_{2(g)}$ akan menguap karena adanya faktor pemanasan dan $NO_{3(l)}$ adalah sisa asam. Dari sini akan terbentuk larutan elektrolit dengan ion Mg^{2+} dan Al^{3+} yang bergerak bebas. Selanjutnya, serbuk SiC dimasukkan ke dalam larutan

elektrolit tersebut guna dilakukan pendeposisian ion Mg dan Al, serbuk SiC yang bersifat *inert* yaitu tidak bereaksi atau larut dalam larutan asam maupun alkali akan termuati oleh sisa asam NO_3^- , hal ini akan mengakibatkan terjadinya gaya elektrostatis antar ion-ion Mg^{2+} , Al^{3+} dan SiC yang telah termuati, sebagaimana Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Mekanisme Pelapisan MgAl_2O_4 Pada Permukaan Penguat SiC [8]

Partikel SiC pada akhirnya akan terlapis MgAl_2O_4 (*spinel*) pada permukaannya sebagaimana Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Ilustrasi Permukaan Penguat SiC yang Telah Terlapis MgAl_2O_4 [8].

Pelapisan Spinel juga dilakukan pada permukaan partikel Al_2O_3 dengan metode *elektroless plating* dan dapat meningkatkan kualitas ikatan antara matrik dan penguat pada sistem komposit isotropik Al/ Al_2O_3 [9].

2.3. Material Penyusun Komposit Laminat Hibrid

2.3.1 Aluminium

Aluminium (Al) merupakan unsur logam ke-3 terbanyak di dunia dan memiliki sifat-sifat yang membuat logam ini menjadi bernilai ekonomis untuk

diproduksi dan digunakan dalam aplikasi industri, yaitu diantaranya memiliki ketangguhan yang tinggi, berat jenis yang rendah, mampu bentuk yang baik dan juga mudah diperoleh, dengan harga yang relatif murah. Aluminium dan paduannya merupakan material yang memiliki sifat mampu tekan yang tinggi, dengan *green density* mencapai 90% dari densitas teoritisnya [10].

Pada komposit laminat hibrid ini, logam aluminium berperan sebagai matriks yang berfungsi sebagai media transfer beban ke penguat dan melindungi penguat dari lingkungan. Sifat-sifat fisik dan mekanik yang dimiliki oleh aluminium dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat-sifat Aluminium [11]

Sifat Fisik	Satuan SI	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 SI	Nilai
Modulus Elastis	GPa	72
Poisson's Ratio	-	0,35
Kekerasan	VHN	19
Kekuatan Luluh	Mpa	25
Ketangguhan	Mpa m	33
Sifat Thermal	Satuan SI	Nilai
Konduktivitas Panas	W/mK	237
Kapasitas Panas	J/Kg °C	917

2.3.2 Silikon Karbida

Silikon karbida (SiC) merupakan salah satu jenis keramik yang sering digunakan sebagai penguat dalam komposit. Dalam komposit laminat hibrid ini, SiC digunakan sebagai penguat pada lapisan pertama. Silikon karbida memiliki kekerasan dan modulus elastisitas yang tinggi, sehingga dapat meningkatkan sifat mekanis pada komposit. Sifat-sifat dari SiC secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat-sifat Silikon Karbida [12]

Sifat Fisik	Satuan SI	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 SI	Nilai
Modulus Elastisitas	GPa	410
Ratio Poisson	-	0,14
Kekuatan Tekan	MPa	3900
Kekerasan	VHN	3500
Kekuatan Luluh	MPa	450
Ketangguhan	MPa m	4,5
Sifat Thermal	Satuan SI	Nilai
Konduktivitas Panas	W/m °K	120
Koefisien Muai Thermal	10 ⁶ / °C	4,0
Specific Heat	J/kg.K	750
Kapasitas Panas	J/kg °C	628

2.3.3 Alumina (Al₂O₃)

Penambahan penguat alumina bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, kekakuan dan ketahanan material komposit. 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 dari alumina secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat-sifat Alumina [13]

Sifat Fisik	Satuan SI	Nilai
Densitas	g/cm ³	3.89
Berat Atom	g/mol	
Warna	-	Ivory
Struktur Kristal	-	Polikristalin
Titik Lebur	°C	1750
Sifat Mekanik	Satuan SI	Nilai
Modulus Elastisitas	GPa	375
Ratio Poisson	-	0.22
Kekuatan Tekan	MPa	379
Kekerasan	Kg/mm ²	1440
Sifat Thermal	Satuan SI	Nilai
Konduktivitas Panas	W/m °K	35
Koefisien Ekspansi Thermal	10 ⁶ /°C	8.4
Specific Heat	J/kg.K	880

2.3.4 Magnesium (Mg)

Dalam pembuatan komposit, Mg digunakan sebagai *wetting agent*, yaitu untuk meningkatkan pembasahan antara matriks dan penguat dengan membentuk lapisan *spinel*. Sifat-sifat dari magnesium secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Sifat-sifat Magnesium [14]

Sifat Fisik	Satuan SI	Nilai
Densitas	g/cm^3	1,738
Berat Atom	g/mol	24,305
Warna	-	Putih keperakan
Struktur Kristal	-	Hexagonal
Titik Lebur	$^{\circ}\text{C}$	650
Titik Didih	$^{\circ}\text{C}$	1090
Sifat Mekanik	Satuan SI	Nilai
Ratio Poisson	-	0,29
Kekerasan	BHN	260
Kekuatan Luluh	MPa	45
Sifat Thermal	Satuan SI	Nilai
Konduktivitas Panas	$\text{W/m } ^{\circ}\text{K}$	156
Koefisien Ekspansi Thermal	$\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$	24.8
Kapasitas Panas	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	24,869

2.4 Metalurgi Serbuk

Proses metalurgi serbuk merupakan mekanisme proses yang mempelajari sifat-sifat serbuk logam mulai dari fabrikasi, karakteristik, hingga konversi serbuk logam menjadi komponen produk [15]. Teknologi Metalurgi Serbuk memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan proses lain dalam menghasilkan produk. Dibawah ini diterangkan beberapa keuntungan proses metalurgi serbuk dibandingkan proses yang lain, yakni [16]:

- Kontrol dari material dan sifat-sifatnya lebih mudah karena kita dapat memperoleh sifat mekanik dan sifat fisik sesuai variasi yang kita inginkan.
- Produk lebih beraneka ragam.
- Kita dapat mengkombinasikan Co, Ni, *Stainless Steel*, baja karbon rendah, logam-logam refraktori, besi murni, karbida sesuai keinginan kita. Dan cara metalurgi serbuk pun dapat membuat bahan non logam, campuran bahan

logam dan non logam, bentuk yang rumit, asal kita sanggup membuat cetakannya.

- Bisa membuat bantalan swa pelumas (*self lubricating bearing*).
Caranya: material dicelupkan ke dalam minyak. Diharapkan minyak dapat menyerap ke pori-pori, apalagi kita dapat membuat pori-pori yang berhubungan. Jadi kita tidak perlu memberikan pelumasan pada benda kerja (pelumas sudah ada di pori, tinggal kita pakai). Hal ini juga dapat mengurangi biaya perawatan.
- Untuk filtrasi, karena kita dapat membuat bagian serbuk dengan porositas yang dikendalikan. Maka material dengan porositas tertentu dapat dibuat sebagai *filter* yang baik untuk penyaringan.
- Toleransi ukuran yang ketat ketat, karena benda jadi dalam bakalan sesudah disinter pada umumnya memiliki ukuran yang presisi sesuai keinginan kita. Jadi kita tidak perlu melakukan permesinan lebih lanjut sebelum proses sinter.
- Ketahanan aus yang baik. Ketahanan aus yang baik bisa diperoleh dengan mengadakan perpaduan logam-logam atau partikel yang keras.
- Sifat mampu redam yang baik. Bagian yang dibuat secara metalurgi serbuk memiliki kemampuan redam yang relatif tinggi.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, proses metalurgi serbuk juga memiliki beberapa keterbatasan diantaranya sebagai berikut.:

- Ukuran (panjang) maksimal 15 cm dengan luas $0,2 \text{ m}^2$, berat kurang dari 10 kg. Keterbatasan ini disebabkan oleh mesin tekan, susunan cetakan, dan proses sinter (kalau benda lebih besar maka pemanasan homogen sulit dilakukan).
- Sifat benda hasil metalurgi serbuk lebih rendah dari pada benda pejal pada material yang sama. Hal ini dikarenakan berat jenis produk hasil metalurgi serbuk yang dicapai hanya 95% berat jenis benda pejal.
- Kemurnian kurang. Meskipun serbuk itu murni namun karena luas permukaan serbuk yang relatif tinggi dibandingkan berat serbuk hingga serbuk mudah teroksidasi. Dalam kasus ini oksidasi dapat dianggap kontaminasi.
- Korosi, karena pada benda serbuk memiliki porositas maka serbuk lebih peka terhadap oksidasi dibanding benda pejal.

- Keterbatasan karena pembentukan. Makin rumit bentuk produk serbuk maka bentuk cetakan semakin rumit dan sulit untuk dibuat.

Serbuk didefinisikan sebagai suatu padatan yang memiliki dimensi ukuran lebih kecil dari 1 mm [15]. Karakteristik serbuk awal dapat mempengaruhi kemampuan serbuk logam untuk dikompaksi dan sifat serbuk kompaksi sebelum dan sesudah sinter. Karakteristik dasar serbuk tersebut meliputi ukuran serbuk, distribusi ukuran serbuk, bentuk serbuk, berat jenis serbuk, mampu alir (*flowability*), dan mampu tekan (*compressibility*) [17]. Berikut ini merupakan karakteristik serbuk:

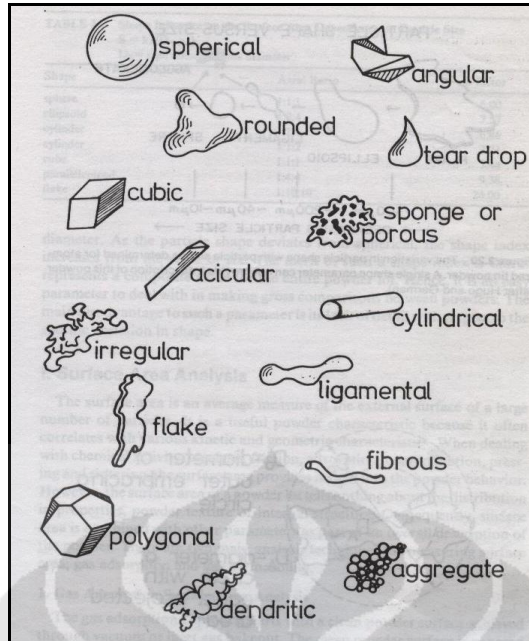
1. Ukuran dan Distribusi Partikel Serbuk

Ukuran partikel ini dapat didefinisikan sebagai ukuran linier partikel oleh analisa ayak [16]. 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 serbuk partikel, maka akan semakin besar berat jenis bakalan (*green density*) tersebut [17].

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

2. Bentuk Partikel Serbuk

Bentuk partikel serbuk merupakan faktor penting yang mempengaruhi sifat massa serbuk, seperti efisiensi pemadatan (*packing efficiency*), mampu alir (*flowability*), dan mampu tekan (*compressibility*). Bentuk partikel dapat memberikan informasi mengenai proses fabrikasi serbuk dan membantu menjelaskan karakteristik proses. Berbagai bentuk partikel dari serbuk dapat di lihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Bentuk Partikel Serbuk [15]

Bentuk partikel serbuk akan mempengaruhi luas permukaan serbuk dan gesekan antarpartikel serbuk. Hal ini akan mempengaruhi perpindahan serbuk ketika dilakukan penekanan pada saat proses kompaksi. Peningkatan luas permukaan partikel (semakin kecil ukuran partikel, semakin tidak beraturan bentuk partikel, semakin kasar permukaan partikel) akan meningkatkan reaktivitas kimia serbuk. Hal tersebut juga akan meningkatkan penyerapan gas dan uap air dari lingkungan sehingga akan terbentuk oksida-oksida pada permukaan partikel yang dapat mengganggu proses kompaksi dan sinter [18].

3. Berat Jenis Serbuk

Berat jenis serbuk biasa dinyatakan dalam satuan gram/cm^3 . Dalam proses metalurgi serbuk terdapat beberapa istilah mengenai berat jenis serbuk, yakni [15]:

- a. *Apparent density* atau *bulk density* didefinisikan sebagai berat per satuan volume dari serbuk lepas.
- b. *Tap density* didefinisikan sebagai berat jenis tertinggi yang dicapai dengan variasi tanpa aplikasi tekanan luar.
- c. *Green density* didefinisikan sebagai berat jenis serbuk setelah serbuk mengalami penekanan kompaksi untuk proses pemanasan (*sintering*).

d. *Theoretical density* didefinisikan sebagai berat jenis sesungguhnya dari material serbuk ketika material serbuk tersebut ditekan hingga menghasilkan serbuk tanpa pori.

Berat jenis bakalan yang dihasilkan dari proses kompaksi terkadang tidak homogen sehingga dilakukan beberapa cara yang dapat mengurangi terjadinya ketidakhomogenan tersebut, diantaranya ialah [16]:

- a. Memberi pelumas untuk mengurangi gesekan
- b. 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.
- c. Meningkatkan rasio penekanan kompaksi agar distribusi serbuk lebih baik
- d. Menggunakan penekanan dua arah (*double punch*) agar berat jenis serbuk lebih homogen.
- e. Melakukan penekanan secara bertahap dimulai dari tekanan terendah kemudian ditingkatkan secara bertahap sampai titik optimum.

4. Mampu Alir (*Flowability*) Serbuk

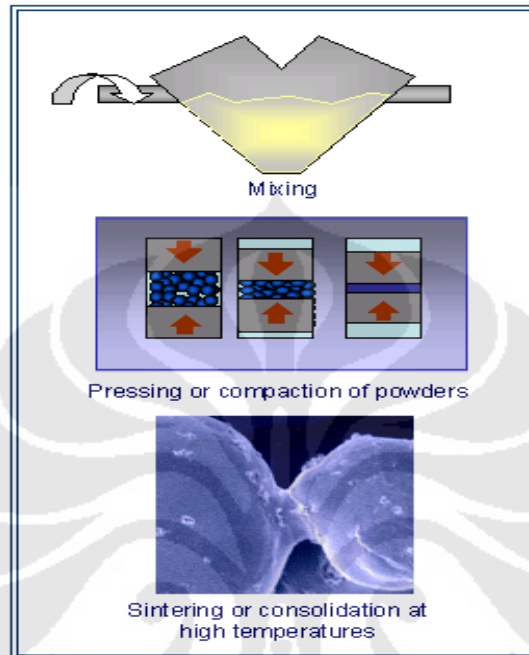
Mampu alir serbuk merupakan karakteristik yang menggambarkan sifat alir serbuk dan kemampuan serbuk untuk memenuhi ruang cetakan [15]. Karakteristik serbuk seperti berat jenis (*apparent density*) seringkali dihubungkan dengan gesekan antar partikel. Pada umumnya faktor-faktor yang mengurangi gesekan antarpartikel atau meningkatkan berat jenis (*apparent density*), seperti partikel bulat dan halus, akan meningkatkan mampu alir serbuk [18].

5. Mampu Tekan (*Compressibility*)

Mampu tekan serbuk merupakan perbandingan volume serbuk mula-mula dengan volume benda yang ditekan yang nilainya berbeda-beda tergantung distribusi ukuran serbuk dan bentuk butirnya [17]. Besarnya mampu tekan serbuk dapat dipengaruhi oleh efek gesekan antarpartikel. Serbuk yang memiliki bentuk lebih teratur, lebih halus, dan sedikit porositas antarpartikel akan memiliki mampu tekan dan *green density* yang lebih tinggi dibandingkan serbuk yang kasar.

Secara garis besar, tahapan dalam proses metalurgi serbuk, yakni:

1. Pencampuran (*mixing*)
2. Kompaksi (*compaction/pressing*)
3. Proses Sinter (*sintering/consolidation*)



Gambar 2.7 Tahapan Proses Metalurgi Serbuk [19]

2.4.1 Pencampuran dan Pengadukan Partikel Serbuk

Pencampuran dan pengadukan partikel serbuk didefinisikan sebagai proses bercampurnya serbuk secara sempurna dengan masing-masing besaran komposisi guna menghasilkan serbuk yang homogen [20]. 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.

2.4.2 Kompaksi

Kompaksi berkaitan erat dengan tekanan yang dimiliki dari luar untuk mendeformasi serbuk menjadi masa yang memiliki densitas tinggi, selain memberikan bentuk dan mengontrol ukuran serbuk. Artinya tekanan yang

diberikan pada serbuk, perilaku mekanik, dan laju penekanan parameter proses utama yang menentukan hasil kepadatan serbuk. Peningkatan penekanan akan memberikan hasil *packing* yang lebih baik dan penurunan porositas. Ketika tekanan kompaksi dinaikkan, jumlah partikel yang mengalami deformasi plastis akan meningkat. Pada tekanan rendah, aliran plastis dipusatkan pada kontak partikel. Ketika tekanan dinaikkan, aliran plastis yang homogen terjadi seluruhnya. Dengan penekanan yang cukup, seluruh partikel akan mengalami *work (strain) hardening* ketika jumlah porositas berkurang [15].

Pada saat kompaksi, terdapat beberapa tahapan yang terjadi pada serbuk, yaitu [16]:

1. Penataulangan Partikel Serbuk (*Rearrangement*)

Pada saat dimulai penekanan, serbuk mulai mengalami penyesuaian letak pada tempat-tempat yang lebih luas atau dengan kata lain belum terjadi deformasi pada partikel serbuk tersebut. Pergerakan dan pengaturan kembali partikel-partikel serbuk akibat adanya penekanan menyebabkan partikel serbuk tersusun lebih rata. Gerakan penyusunan kembali partikel ini dibatasi oleh adanya gaya gesek antar partikel, 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.

2. Deformasi Elastis Partikel Serbuk

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

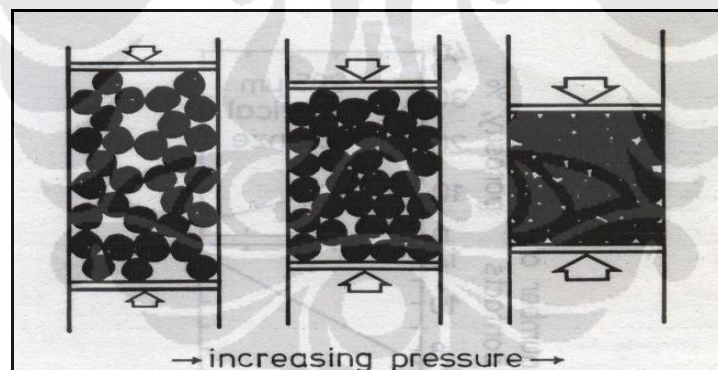
3. Deformasi Plastis Partikel Serbuk

Deformasi plastis merupakan bagian terpenting dari mekanisme pemadatan (*densification*) selama kompaksi berlangsung. Pada tahap ini, semakin tinggi tekanan kompaksi yang diberikan akan menyebabkan semakin meningkatnya derajat deformasi plastis dan pemadatan yang terjadi. Ada beberapa faktor

yang menentukan deformasi plastis, antara lain kekerasan dan perpindahan tegangan antar partikel yang berdekatan dan terjadi peningkatan nilai kekerasan.

4. Penghancuran Partikel Serbuk

Setelah serbuk mengalami deformasi plastis, serbuk mengalami *mechanical interlocking* (antar butir 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.



Gambar 2.8 Perilaku Serbuk Saat Kompaksi [6].

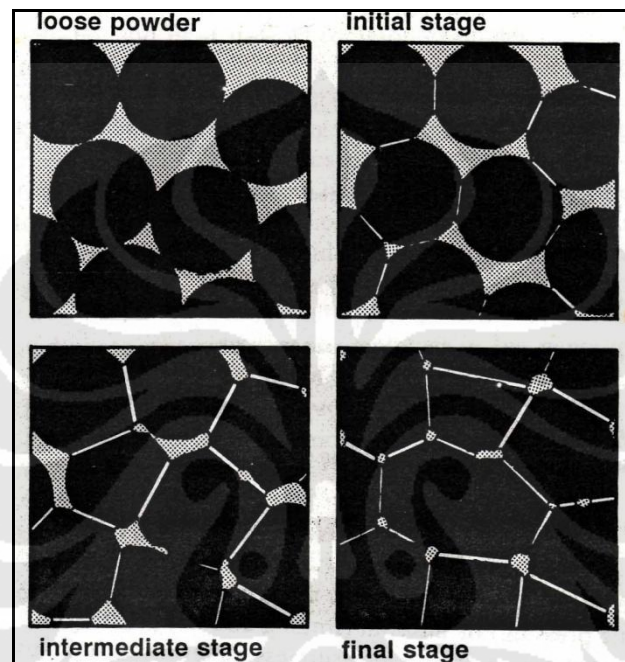
2.4.3 Proses Sinter

Proses sinter diartikan sebagai perlakuan panas untuk mengikat partikel-partikel menjadi koheren, menghasilkan struktur padat melalui transport massa yang biasa terjadi dalam skala atomik. Ikatan yang terbentuk akan meningkatkan kekuatan dan menurunkan energi dari sistem [10]. 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 akan dapat meningkatkan densitas (kepadatan) produk atau biasa disebut proses densifikasi (pemadatan).

2.4.3.1 Tahapan Proses Sinter

Tahapan pada proses sinter menggambarkan perubahan bakalan menjadi kuat dan padat, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Partikel Serbuk Pada Berbagai Tahapan Proses Sinter [10]

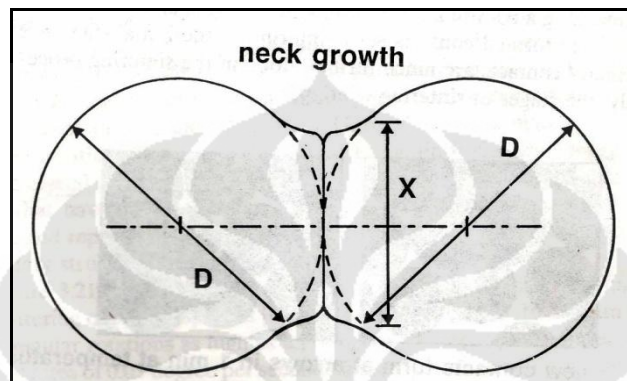
Beberapa tahapan yang dialami oleh partikel-partikel serbuk pada proses sinter adalah sebagai berikut [10]:

1. Pengaturan Kembali

Pada awal tahap ini, partikel lepas membentuk kontak dengan partikel lainnya pada orientasi acak. Tahap adhesi terjadi secara spontan dengan pembentukan ikatan sinter yang baru dimulai. Kekuatan ikatan kontak yang terjadi masih lemah dan belum terjadi perubahan dimensi bakalan. Semakin tinggi berat jenis bakalan maka bidang kontak yang terjadi antar partikel juga semakin banyak sehingga ikatan yang terjadi pada proses sinter pun semakin besar. Pengotor yang menempel pada batas kontak mengurangi jumlah bidang kontak sehingga kekuatan produk sinter juga menurun.

2. *Initial Stage*

Pada tahap ini, pada daerah kontak antar partikel terjadi perpindahan massa yang menyebabkan terjadinya pertumbuhan leher. Tahap ini berakhir saat rasio ukuran leher (X/D) mencapai 0,3 [10]. Pada tahap ini pula pori mulai terpisah karena titik kontak membentuk batas butir. Selain itu, terjadi pula penyusutan (*shrinkage*), pengurangan luas permukaan, dan pepadatan.



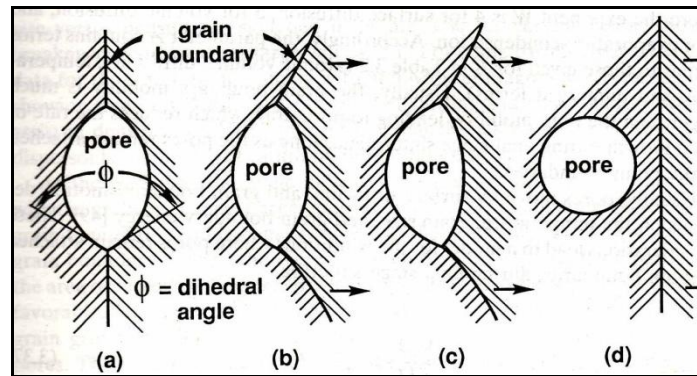
Gambar 2.10 Tahap Pertumbuhan Leher Dengan Rasio X/D [10]

3. *Intermediate Stage*

Tahap ini merupakan tahap terpenting dalam penentuan terhadap pepadatan (densifikasi) dan sifat mekanik bakalan sinter. Tahap ini ditandai dengan proses pepadatan, pertumbuhan butir dan struktur pori menjadi halus. Geometri batas butir dan pori yang terjadi pada tahap ini tergantung pada laju proses sinter. Mulanya, pori terletak pada bagian batas butir yang memberikan struktur pori. Sedangkan pepadatan 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.

4. *Final Stage*

Pada tahapan ini proses berjalan lambat. Pori-pori yang bulat menyusut dengan adanya mekanisme difusi ruah (*bulk diffusion*). Pemisahan pori pada tahap akhir ini dapat dilihat Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Pemisahan dan Pembulatan Pori Pada Final Stage [10]

Untuk pori yang berada di batas butir, sudut dihedral yang kecil menyebabkan gaya menjadi besar. Setelah batas butir meluncur, pori akan berdifusi ke batas butir sehingga mengalami penyusutan, dimana proses ini berlangsung lambat. Dengan waktu pemanasan yang berlangsung lama, pengkasaran pori akan menyebabkan ukuran pori rata-rata meningkat, sedangkan jumlah pori akan berkurang. Jika pori memiliki gas yang terperangkap, maka kelarutan gas dalam matriks akan mempengaruhi laju pengurangan pori.

2.4.3.2 Mekanisme Transport Massa

Terdapat dua mekanisme transport massa yang terjadi dalam proses sinter, yaitu sebagai berikut[4]:

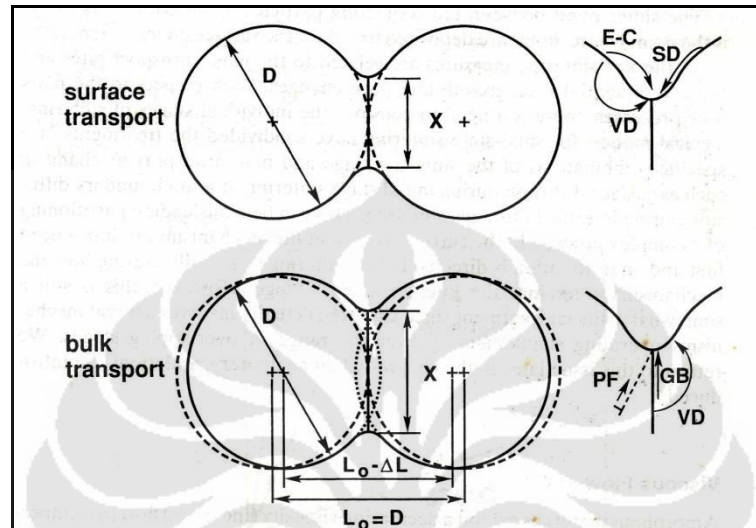
1. Transport Permukaan (*Surface Transport*)

Transport permukaan menghasilkan pertumbuhan leher tanpa terjadi perubahan jarak antar partikel (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 selama waktu pemanasan, terutama untuk serbuk yang telah dikompaksi, dimana berat jenis dislokasi awal tinggi. Lain halnya dengan material *amorphous* seperti polimer dan gelas, yang disinter dengan aliran rekat, di mana partikel-partikelnya bersatu

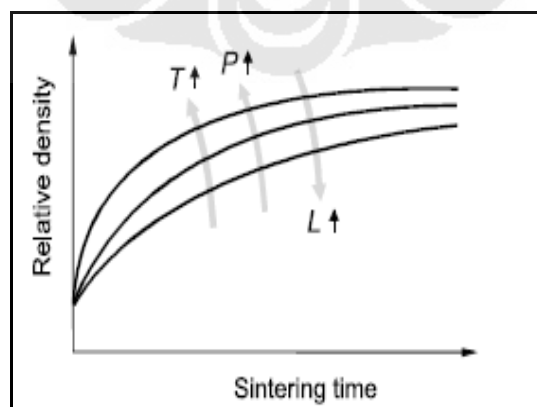
tergantung pada ukuran partikel dan sifat merekat material. Pembentukan aliran rekat juga memungkinkan untuk logam dengan fasa cair pada batas butir. Difusi batas butir penting untuk densifikasi material kristalin. Umumnya, transpor ruah aktif pada temperatur tinggi.



Gambar 2.12 Mekanisme Transport Massa [10]

2.4.5.3 Pengaruh Waktu Sinter

Semakin tinggi waktu tahan sinter, temperatur sinter, dan *green density* maka densitas produk hasil proses sinter akan semakin tinggi pula, seperti yang terlihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Hubungan Antara Waktu Tahan Sintering Dengan Densitas Relatif Komposit [21]

Namun, terdapat pula kerugian akibat meningkatnya waktu tahan sinter, yaitu meningkatnya persentase penyusutan, pertumbuhan butir, dan juga meningkatnya biaya proses, seperti yang terdapat pada Tabel 2.5 [10]. Peningkatan waktu tahan sinter memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik yang hampir sama dengan kenaikan temperatur sinter, tetapi tidak sebesar pengaruh yang dihasilkan oleh peningkatan temperatur sinter.

2.4.5.4 Atmosfer Sinter

Penggunaan atmosfer sinter bertujuan untuk mengontrol atau melindungi logam dari oksida selama proses sinter berlangsung [15]. 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 [17]. Terdapat enam jenis atmosfer yang dapat digunakan untuk melindungi bakalan, yakni hidrogen, amoniak, gas *inert*, nitrogen, vakum dan gas alam. Sebagai contoh, atmosfer vakum sering digunakan sebagai atmosfer sinter karena prosesnya bersih dan kontrol atmosfer mudah. Atmosfer hidrogen juga disukai karena kemampuannya untuk mereduksi oksida dan menghasilkan atmosfer dekarburisasi untuk logam ferrous.

Pengontrolan atmosfer merupakan hal yang cukup penting selama proses sinter berlangsung. Namun bukan hanya atmosfer yang dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia, tetapi juga serbuk yang telah dikompaksi biasanya terkontaminasi oleh oksida-oksida, karbon, dan gas-gas yang terperangkap, sehingga ketika dilakukan pemanasan terjadi perubahan komposisi atmosfer sinter [15].

Tabel 2.5 Pengaruh Proses Sintering [10]

Perubahan Proses Sinter	Efek
Penurunan ukuran partikel	Proses sinter lebih cepat Biaya yang lebih tinggi Kemurnian lebih tinggi Meningkatkan bahaya
Peningkatan waktu sinter	Biaya lebih tinggi Pertumbuhan dan pengkasaran butir Mengurangi produktivitas
Peningkatan temperatur sinter	Penyusutan lebih besar Pertumbuhan butir Biaya lebih tinggi Keakuratan kurang Sifat mekanik lebih baik Keterbatasan tanur Pengkasaran Pori
Peningkatan <i>green density</i>	Penyusutan berkurang Pori yang lebih kecil Densitas akhir lebih tinggi Dimensi seragam <i>Density gradients</i>
Peningkatan paduan / <i>additives</i>	Kekuatan lebih tinggi Masalah homogenitas Temperatur sinter lebih tinggi
Penggunaan <i>sintering aids</i>	Sinter lebih cepat Temperatur sinter lebih rendah Penggetasan (<i>Embrittlement</i>) Distorsi Kontrol pertumbuhan butir