

BAB II

STUDI LITERATUR

2.1 LOGAM BUSA

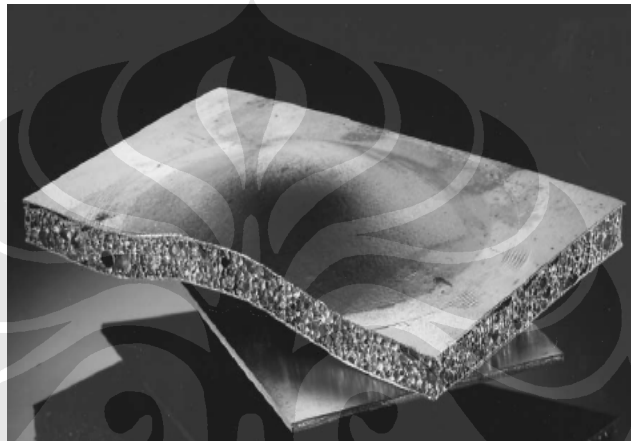
Logam busa atau material selular merupakan suatu material yang memiliki banyak struktur sel dan pori di dalamnya. Porositas dalam aplikasi keteknikan dapat menjadi suatu kelemahan dari suatu material terutama bagi material pada penggunaannya akan terkena suatu beban yang tinggi, namun porositas dapat menjadi suatu keunggulan dibandingkan dengan material *bulk* terutama dari segi berat material, reduksi pengeluaran biaya pembelian material, karakteristik termal, meningkatkan kekuatan spesifik (*specific strength*), dan lain-lain. Logam busa kini banyak dimanfaatkan untuk aplikasi dibidang industri otomotif, pesawat ulang-alik, industri manufaktur, dan industri yang lain karena memiliki kombinasi sifat mekanis dan fisis yang menarik.



Gambar 2.1. Logam busa^[4].

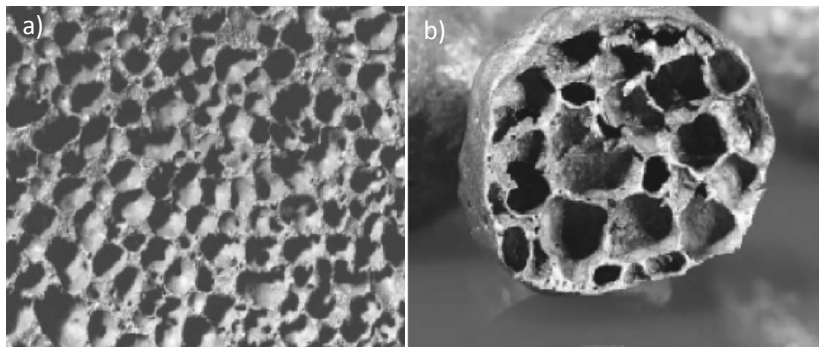
Suatu material yang mempunyai struktur berpori-pori ini memiliki karakteristik yang menarik terutama pada kombinasi sifat mekanis dan sifat fisisnya seperti kombinasi antara tingginya kekakuan (*stiffness*) dengan rendahnya atau tinggi permeabilitas gas dengan konduktivitas termal yang tinggi. Dengan berkembangannya teknologi pembuatan logam busa, kini banyak dipakai pada aplikasi-aplikasi untuk menggantikan material *bulk*. Sifat mekanis yang baik

seperti kekakuan dan kapasitas menyerap energi yang cukup baik menjadikan logam busa dapat digunakan sebagai aplikasi struktural termasuk gedung dan struktur mobil yang sering dikena beban impact. Untuk aplikasi struktural, logam busa biasanya dibuat menjadi struktur berlapis (*sandwich panels*) yang merupakan gabungan antara gabungan dua lembar logam yang diantara logam tersebut terdapat inti yang terbuat dari logam busa dan untuk melekatkan kedua logam tersebut menggunakan perekat atau adesif.



Gambar 2.2. *Sandwich panel* dengan inti dari aluminium busa^[1].

Logam busa umumnya mengandung fraksi volum untuk pori yang sebesar 85-91%^[5]. Berdasarkan struktur porinya material logam busa ini di bagi menjadi dua yaitu logam busa dengan sel tertutup dan sel terbuka. Logam busa dengan sel tertutup adalah logam busa yang tiap selnya tertutup atau selnya berada di dalam material sedangkan logam busa dengan sel terbuka adalah logam busa yang tiap selnya berada baik diluar maupun didalam material dan saling terhubung^[1].



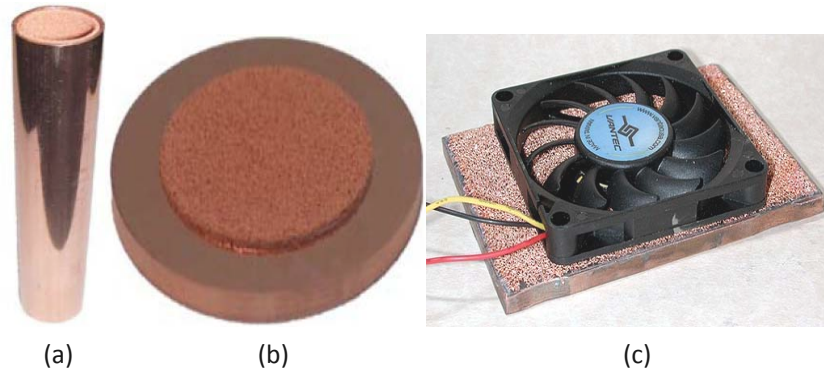
Gambar 2.3. Bentuk logam busa (a) sel terbuka dan (b) sel tertutup^[1].

Logam busa sering yang dijual dalam market dan situs-situs di internet merupakan logam busa dengan sel tertutup yang aplikasinya digunakan sebagai, penyerap suara (peredap suara), isolator panas, disipasi panas dan katalis. Sekarang sudah banyak material logam yang dipakai sebagai matrik dalam logam busa misalnya alumunium, baja, tembaga, nikel dan lain-lain namun 50 %-nya berasal dari logam alumunium karena logam ini mempunyai sifat yang ringan, sifat mekanis yang baik dan temperatur leburnya lebih rendah sehingga dari segi biaya proses cukup ekonomis dibandingkan material lain.

Tabel 2.1 Persentase material yang digunakan untuk pembuatan logam busa^[6].

No	Logam	Persentase (%)
1	Alumunium (Al)	51
2	Titanium (Ti)	13.6
3	Baja (Fe)	10.4
4	Nikel (Ni)	7.7
5	Tembaga (Cu)	5.7
6	Emas (Au)	3.9
7	Logam yang lain	7.6

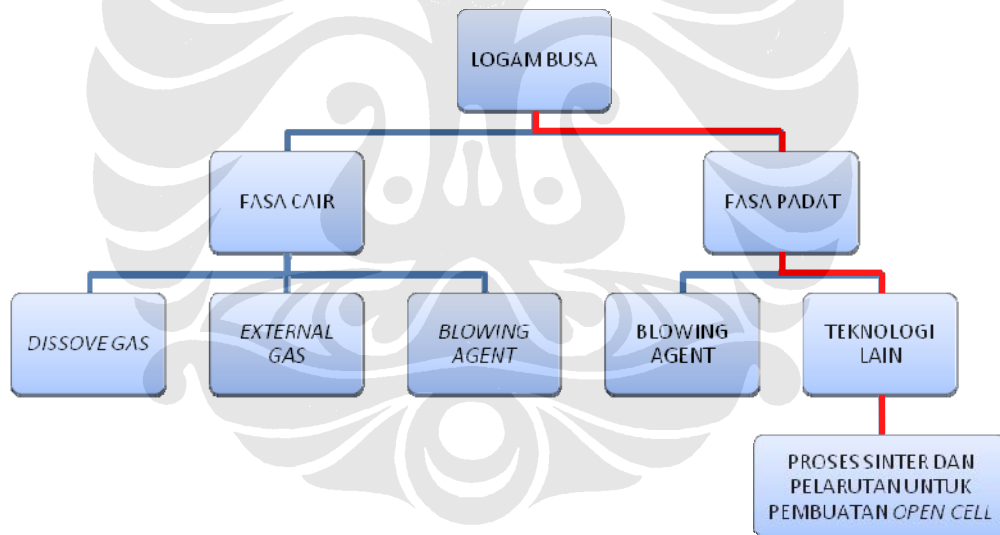
Tembaga merupakan salah satu logam yang dapat diproses untuk membuat logam busa yang mempunyai konduktifitas termal dan listrik yang baik. Dalam aplikasinya, tembaga busa biasanya digunakan untuk pendingin pada komputer, peredap suara (*sound absorber*) untuk aplikasi temperatur tinggi, pipa panas (*heat pipe*) untuk memindahkan panas, dan sebagai material pada alat pendidih (*boiling plates*)^[7]. Semua aplikasi tersebut menggunakan kombinasi sifat dasar tembaga dan luas area yang besar akibat adanya pori-pori pada tembaga busa. Kombinasi antara sifat dasar tembaga dan luas area yang besar akan menghasilkan efisiensi waktu dalam pemindahan panas dan listrik sehingga akan menurunkan biaya proses secara tidak langsung.



Gambar 2.4. Aplikasi tembaga busa, (a)pipa panas, (b)pelat pendidih^[7], dan (c) pendingin^[8].

2.2 PEMBUATAN LOGAM BUSA

Untuk mendapatkan logam busa dapat dilakukan dengan berbagai cara yaitu melalui fasa cair dan fasa padat. Kedua cara tersebut berfungsi untuk menghasilkan distribusi dan ukuran porositas yang merata.



Gambar 2.5. Macam-macam proses pembuatan logam busa^[1].

Dalam pembuatan logam busa melalui fasa cair dengan menggunakan teknologi *dissolve gas*, *External gas*, dan *blowing agent*. Dalam proses *dissolve gas*, logam busa dibentuk dari gas – gas yang larut dalam logam dimana gas yang akan dialirkan ke dalam logam cair yang temperaturnya mendekati zona solidifikasi sehingga gas yang larut dalam logam yang telah menjadi fasa padat akan meninggalkan pori-pori pada logam. Gas yang biasanya digunakan dalam

teknologi *dissolve gas* adalah hidrogen, nitrogen, dan oksigen. Dalam proses eksternal sama prinsipnya dengan *dissolve gas* namun teknologi ini menggunakan nitrogen dan argon sedangkan *blowing agent* menggunakan zat kimia yang dapat menghasilkan gas seperti TiH_2 , $MgCO_3$, $SrCO_3$ dan ZrH_2 . Pada pembuatan logam busa melalui fasa cair ini membutuhkan biaya yang rendah namun pengaturan ukuran dan distribusi pori sangat sulit dan logam busa yang dihasilkan dalam proses ini memiliki pori-pori yang besar dan tidak seragam sehingga hanya bisa digunakan untuk aplikasi tertentu.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk membuat logam busa yang bisa mengontrol bentuk sel, ukuran sel, dan distribusi porositas dengan baik yaitu melalui jalur proses metalurgi serbuk yang disertai proses pencampuran, kompaksi, dan sinter. Proses sinter dan pelarutan karbonat merupakan suatu proses yang menggunakan jalur proses metalurgi serbuk untuk membuat logam busa dengan sel atau pori yang terbuka. Salah satu logam yang digunakan pada proses ini adalah tembaga. Tembaga busa yang terbentuk dapat memiliki porositas sekitar 50 -85 % dengan ukuran porositas sekitar 53-1500 μm ^[9]. Dalam penelitian ini, proses sinter dan pelarutan yang dipilih untuk mendapatkan tembaga busa.

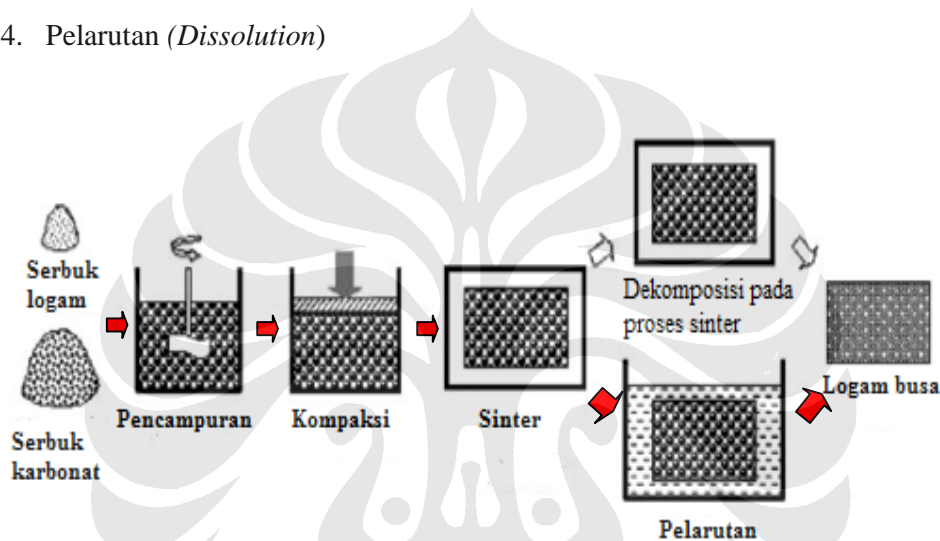
2.3 PROSES SINTER DAN PELARUTAN KARBONAT

Proses sinter dan pelarutan karbonat atau *Lost carbonate sintering* (LCS) merupakan suatu proses untuk membuat logam busa dengan menggunakan proses metalurgi serbuk. Proses ini telah ditemukan dan dipatenkan oleh Dr. Yuyuan Zhao dari Universitas Liverpool dimana dalam proses ini dapat membuat logam busa dengan menggunakan logam dan garam yang dapat larut dalam air kemudian diproses melalui jalur metalurgi serbuk dan dilanjutkan dengan proses pelarutan. Dengan proses ini dapat menghasilkan logam busa yang memiliki sel terbuka dan mempunyai pori – pori yang saling terhubung. Pada umumnya, logam busa yang diproses dengan proses sinter dan pelarutan karbonat mempunyai persentase porositas sebesar 50-90%. Hal ini tergantung dari persentase garam yang terkandung dalam bakalan atau semakin banyak garam yang ada dalam bakalan maka akan semakin banyak porositas yang terbentuk dalam material tersebut. Material yang dapat dibuat menjadi logam busa dengan proses ini adalah baja,

tembaga, titanium, nikel, dan magnesium. Garam yang dapat digunakan untuk proses ini adalah kalsium karbonat, natrium karbonat, magnesium karbonat, dan kalium karbonat^[10].

Untuk mendapatkan logam busa dengan proses ini harus melalui 4 tahapan proses yaitu :

1. Pencampuran (*Mixing*)
2. Kompaksi (*Compacting*)
3. Sinter (*Sintering*)
4. Pelarutan (*Dissolution*)



Gambar 2.6. Skema proses sintesis dan pelarutan karbonat untuk pembuatan logam busa^[9].

Proses sintesis dan pelarutan karbonat ini dikembangkan untuk mendapatkan bentuk logam busa yang sesuai dengan yang diinginkan (*net near shape*) sesuai dengan ciri-ciri produk yang dihasilkan dengan proses metalurgi serbuk dan memiliki pori-pori yang terbuka dimana logam busa tersebut dapat diaplikasikan ke dalam berbagai aplikasi seperti pendingin, pengedap suara dan sebagai katalis yang membutuhkan luas area yang tinggi sehingga kontak panas pada pendingin, zat reaksi pada aplikasi katalis, dan gelombang suara pada pengedap suara dengan material logam busa dapat berjalan secara sempurna. Jika kontak hal tersebut dengan material tinggi akan menciptakan efisiensi dalam proses dan secara tidak langsung akan menurunkan biaya proses.

Jurnal mengenai proses pembuatan tembaga busa sudah banyak yang dipublikasikan melalui situs – situs namun jurnal mengenai jurnal proses sintesis

dan pelarutan karbonat hanya sedikit yang sudah dipublikasikan. Peneliti seperti Y.Y Zhao merupakan peneliti yang sangat aktif menulis dan mempublikasikan jurnal proses sinter dan pelarutan karbonat. Salah satu jurnal dibuat oleh Y.Y Zhao dan F.L Zhang adalah *Lost Carbonate Sintering For Manufacturing Metal Foam*. Di dalam jurnal tersebut mereka memjabarkan tentang bagaimana proses pembuatan tembaga busa dengan proses sinter dan pelarutan karbonat dan membandingkan hasil tembaga busa dengan temperatur dan waktu tahan sinter yang berbeda yaitu 850°C selama 4 jam (rute A), 950°C selama 2 jam (rute C), dan 850°C selama 4 jam lalu dinaikan kembali temperature sintering hingga 950 selama 0.5 jam (rute B). Hasilnya pada rute A dan C mendapatkan tembaga busa dengan hasil yang baik sedangkan pada rute B, mendapatkan hasil tembaga busa dengan kurang yang baik. Selain itu dalam jurnal ini juga menyajikan hasil pengujian tekan pada tembaga busa yang dibuat melalui rute A dan hasilnya semakin tinggi porositas yang ada dalam tembaga busa maka kekuatan tekan akan semakin turun.

2.3.1 Karakteristik Serbuk

Keefektifan dari serbuk logam untuk dikompaksi dan disinter dipengaruhi oleh karakteristik awal dari serbuk itu sendiri. Karakteristik serbuk itu bisa berupa ukuran, bentuk serbuk, komposisi kimia, dan kondisi permukaan serbuk yang merupakan hal yang penting yang karena akan sangat mempengaruhi dalam proses metalurgi serbuk^[3]. Karakteristik dasar serbuk yang akan mempengaruhi hasil material dalam metalurgi serbuk antara lain :

1. Ukuran dan Distribusi Ukuran Partikel Serbuk

Ukuran partikel merupakan suatu hal yang harus dipertimbangkan untuk menghasilkan sifat produk hasil metalurgi serbuk yang baik. Ukuran partikel dapat dilihat dari dimensi dari partikel serbuk tersebut seperti diameter. Namun kebanyakan partikel tidak dalam bentuk bulat sehingga ukuran partikel sulit untuk dihitung secara kuantitas namun ukuran partikel tergantung pada teknik pengukuran, parameter tertentu dalam pengukuran, dan bentuk partikel. Ukuran partikel akan mempengaruhi densitas, porositas, sifat mekanis material serbuk hasil kompaksi atau bakalan dimana semakin kecil atau halus

ukuran partikel serbuk maka densitas bakalan (*green density*) akan semakin besar. Serbuk logam yang sesuai untuk proses metalurgi serbuk umumnya memiliki ukuran dengan range antara 0,1 – 1000 μm ^[11]. Pada umumnya, ukuran partikel serbuk yang bulat dapat ditentukan berdasarkan ukuran diameternya namun untuk partikel dengan bentuk tidak beraturan (*irregular*) sangat sulit menentukan ukuran atau diameternya. Salah satu mengetahui ukuran partikel yaitu dengan penggunaan alat optik seperti SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan TEM (*Transmission Electron Microscope*) tergantung dari ukuran partikel^[3]. Beberapa pengaruh ukuran partikel serbuk terhadap karakteristik serbuk^[11], antara lain :

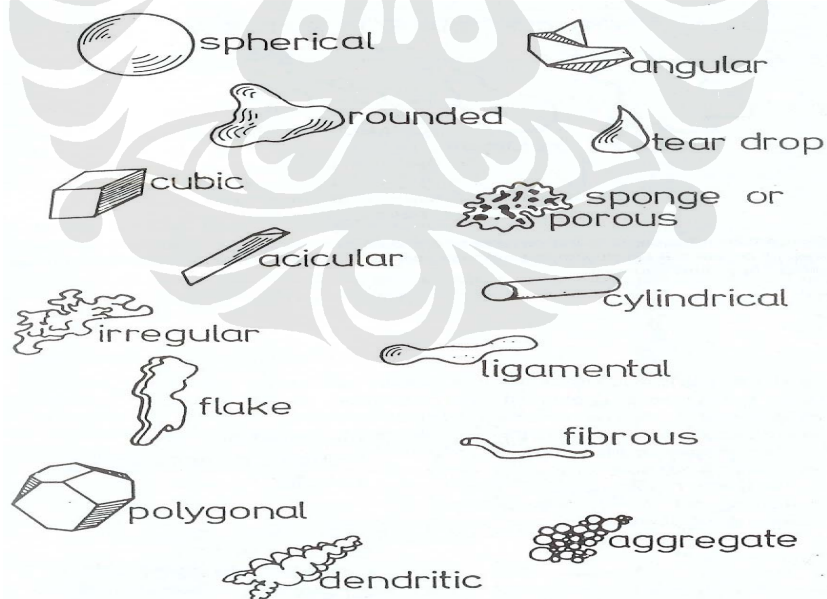
- a. Ukuran partikel yang halus sangat diperlukan untuk kompaksi serbuk yang keras atau getas seperti tungsten (W) dan alumina (Al_2O_3), karena dengan semakin tingginya gesekan antar partikel akan membantu meningkatkan kekuatan adhesi bakalan untuk memudahkan dalam proses penanganan selanjutnya.
- b.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

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

2. Bentuk Partikel Serbuk

Bentuk partikel serbuk akan mempengaruhi seperti pemadatan (*packing*), mampu alir (*flowability*), dan mampu tekan dari partikel tersebut (*compressibility*). Bentuk partikel mempengaruhi besarnya kontak antar partikel sehingga akan menghasilkan gaya gesek yang besar pada permukaan partikel. Berdasarkan standar ISO 3252 bentuk serbuk dapat diklasifikasikan sebagai berikut^[11] :

- a. *Acicular* : berbentuk jarum
- b. *Angular* : berbentuk polihedral kasar dengan tepi tajam
- c. *Dendritic* : berbentuk kristalin dan bercabang
- d. *Fibrous* : berbentuk serabut yang beraturan atau tidak beraturan
- e. *Flaky* : berbentuk serpihan
- f. *Granular* : berbentuk tidak beraturan dan hampir bulat
- g. *Irregular* : berbentuk tidak beraturan atau tidak mempunyai simetri
- h. *Nodular* : berbentuk bulat dan tidak beraturan
- i. *Sphreroidal* : berbentuk bulat



Gambar 2.7. Bentuk partikel serbuk^[3].

Bentuk partikel serbuk akan mempengaruhi luas permukaan serbuk dan gesekan antar partikel serbuk. Hal ini akan mempengaruhi perpindahan

serbuk ketika penekanan 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 sehingga hal ini meningkatkan penyerapan gas dan uap air dari lingkungan dan bisa menyebabkan terbentuk oksida-oksida pada permukaan partikel yang mana dapat mengganggu proses kompaksi dan sinter.

3. Berat jenis serbuk

Berat per satuan volum suatu serbuk lepas merupakan berat jenis nyata serbuk (*apparent density*). Berat jenis serbuk ini biasanya dinyatakan dalam berat dalam suatu unit volum (gr/cm^3). Untuk berat jenis setelah serbuk mengalami penekanan kompaksi untuk proses sinter disebut dengan densitas bakalan. Untuk logam, berat jenis serbuk sangat tergantung pada ukuran partikel dan distribusi ukuran partikel, bentuk partikel, kondisi permukaan, efisiensi pemadatan serbuk, dan struktur partikel (pori atau tidak berpori)^[11]. Untuk menghasilkan berat jenis yang tinggi maka serbuk harus mempunyai partikel halus yang memiliki jumlah optimum untuk mengisi *void* yang terbentuk antara partikel yang besar. Berat jenis bakalan yang dihasilkan dari proses kompaksi, namun berat jenis yang dihasilkan tidak selalu homogen. Berikut ini merupakan beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi terjadinya ketidak homogenan tersebut, antara lain :

- a. Memberi pelumas untuk mengurangi gesekan antar partikel dan gesekan dengan cetakan.
- b. Mengatur perbandingan dimensi cetakan antara tinggi dengan lebar rongga cetakan (L/D). Semakin besar L/D maka distribusi akan semakin besar. sehingga L/D sebaiknya kecil sehingga distribusi serbuk akan merata atau homogen.
- c. Meningkatkan rasio penekanan kompaksi agar distribusi serbuk lebih baik.
- d. Menggunakan penekanan dua arah agar berat jenis serbuk lebih homogen.
- e. Melakukan penekanan secara bertahap dari mulai yang paling rendah kemudian ditingkatkan tekannya secara bertahap sampai titik optimum.

4. Mampu Alir Serbuk

Mampu alir serbuk merupakan karakteristik yang menggambarkan sifat alir serbuk dan kemampuan serbuk untuk memenuhi ruang cetakan. Karakteristik serbuk seperti berat jenis nyata serbuk yang seringkali dihubungkan dengan gesekan antarpartikel. Pada umumnya, faktor-faktor yang mengurangi gesekan antar partikel dan meningkatkan berat jenis nyata (seperti partikel bulat dan halus) akan meningkatkan mampu alir serbuk. Disamping itu karakteristik serbuk seperti bentuk serbuk, berat jenis serbuk, kelembaban serbuk, dan distribusi ukuran partikel dapat mempengaruhi mampu alir serbuk^[11]. Mampu alir dari serbuk logam tergantung dari gesekan antar partikel dimana luas permukaan dan kekasaran partikel akan mempengaruhi gesekan antar partikel tersebut. Jika luas permukaan dan kekasaran partikel maka jumlah gesekan serbuk akan meningkat sehingga menyebabkan efisiensi mampu alir serbuk akan rendah. Selain itu bentuk dari serbuk juga mempengaruhi sifat mampu alir, partikel yang mempunyai bentuk tak beraturan mempunyai efisiensi mampu alir yang rendah sedangkan bentuk yang bulat mempunyai mampu alir yang baik^[12].

5. Mampu Tekan Serbuk

Mampu tekan serbuk merupakan besarnya nilai pemadatan yang didapatkan ketika serbuk dalam berat serbuk tertentu diberi tekanan. Sifat serbuk ini dapat dihitung dengan perbandingan volume serbuk mula-mula dengan volum benda yang ditekan dan nilainya berbeda-beda tergantung distribusi ukuran serbuk dan bentuk butirnya. Seperti hal mampu alir, besarnya mampu tekan serbuk juga dipengaruhi oleh efek gesekan antarpartikel^[11]. Gesekan antarpartikel akan lebih rendah bila serbuk yang akan dikompaksi memiliki bentuk yang lebih teratur dan lebih halus sehingga akan menghasilkan densitas bakalan yang lebih tinggi.

2.3.2 Proses Pencampuran

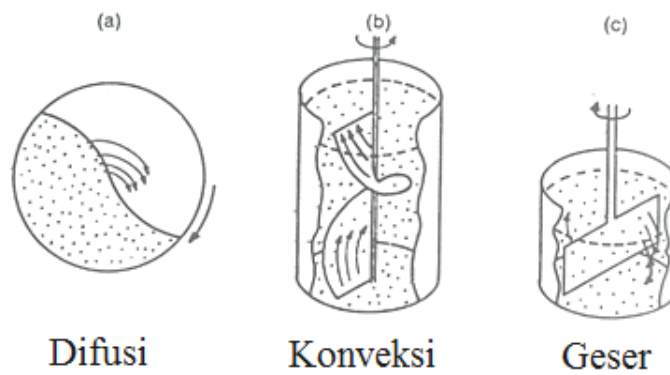
Mixing atau pencampuran merupakan suatu proses mencampur serbuk logam dengan bahan-bahan yang lain (pengikat dan pelumas) untuk mendapatkan nominal yang sama atau seragam^[13]. Sifat mekanis dari material yang terbuat dari

proses metalurgi serbuk sangat sensitif terhadap distribusi partikel dalam suatu bakalan sehingga proses pencampuran merupakan salah proses yang penting dalam metalurgi serbuk.

Karakteristik serbuk mempunyai peranan yang penting dalam tercapai hasil campuran yang seragam. Karakteristik serbuk tersebut adalah ukuran, bentuk, dan densitas dari partikel serbuk. Pada umumnya, ukuran partikel serbuk yang seragam akan memudahkan untuk mendapatkan hasil pencampuran yang seragam. Partikel yang besar dari material yang sama maupun yang berbeda akan mempunyai kemungkinan yang tinggi untuk terjadinya segregasi. Sehingga perlu proses sebelum pencampuran untuk menghilangkan partikel yang besar dalam serbuk. Bentuk partikel mempunyai pengaruh pada kemampuan serbuk untuk dicampur. Salah satu masalah dalam proses pencampuran adalah jika serbuk yang akan dicampur memiliki densitas partikel serbuk yang berbeda sehingga akan sulit untuk mendapatkan hasil campuran yang seragam. Serbuk yang lebih ringan atau densitas lebih kecil akan terakumulasi di atas serbuk yang berat sehingga akan terjadi segregasi. Namun segregasi akibat densitas partikel yang berbeda dapat diminimalisir jika partikel yang halus mempunyai densitas yang lebih besar^[13]

Mekanisme dari pencampuran serbuk dibagi menjadi 3 jenis^[3] yaitu :

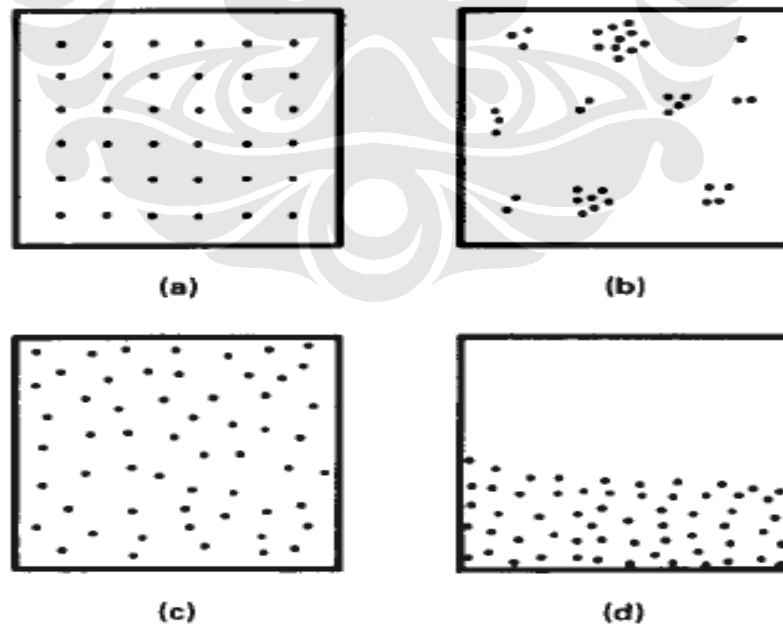
- a. Difusi : proses pencampuran yang dikarenakan oleh gerak antar partikel yang dihasilkan oleh perputaran drum.
- b. Konveksi : proses pencampuran yang dikarenakan oleh gerak ulir pada porosnya.
- c. Geser : proses pencampuran yang dikarenakan oleh media pengaduk (blade).



Gambar 2.8. Mekanisme pencampuran^[3].

Efisiensi dalam proses pencampuran memiliki hubungan dengan volum serbuk yang dimasukkan kedalam media pengaduk dan kecepatan pengadukan. Volum serbuk yang dimasukkan ke dalam media pengaduk untuk mendapatkan efisiensi yang paling baik dalam proses pencampuran yaitu 20-40 %^[3]. Kecepatan berputar pada media pengaduk juga memiliki pengaruh terhadap efisiensi dalam proses pencampuran. Perputaran yang rendah cukup untuk mendapatkan hasil yang baik dan perputaran yang cepat dapat hasil campuran yang baik jika gaya sentrifugal yang terjadi kecil namun tidak boleh terlalu kecil sehingga tidak menyebabkan gaya *turbulence*. Gaya sentrifugal pada proses pencampuran akan mengakibatkan aliran serbuk akan berlawanan arah dengan arah putaran^[13].

Hasil pencampuran yang teratur merupakan suatu bentuk keberhasilan dalam suatu proses pencampuran serbuk karena akan menghasilkan sifat mekanis dan sifat fisis yang baik pada bakalan. Namun untuk mendapatkan hasil pencampuran yang baik sangat sulit karena karakteristik serbuk yang berbeda-beda. Segregasi merupakan hasil pencampuran yang paling tidak diinginkan dalam proses pencampuran kerana tidak terjadi interaksi antar partikel serbuk yang berbeda dan akan menghasilkan sifat fisis dan mekanis yang buruk pada bakalan. Hasil dari pencampuran dapat seperti gambar berikut ini :

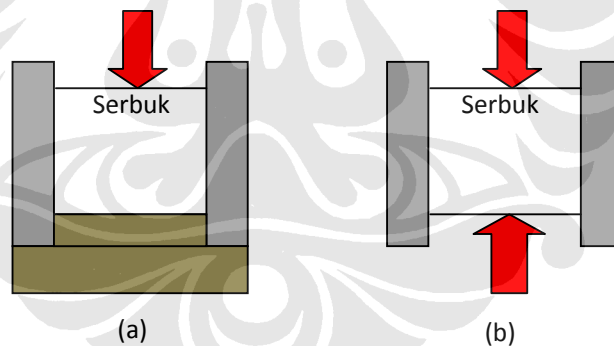


Gambar 2.9. Hasil pencampuran, (a) teratur, (b) penggumpalan, (c) distribusi acak, (d) segregasi^[13].

2.3.3 Proses Kompaksi

Kompaksi merupakan proses pemberian suatu gaya luar berupa tekanan untuk mendeformasi serbuk menjadi benda yang mempunyai bentuk dan ukuran tertentu yang mempunyai densitas yang lebih tinggi. Proses kompaksi akan mengakibatkan pengaturan partikel, deformasi partikel, dan terbantuknya ikatan antarpartikel.

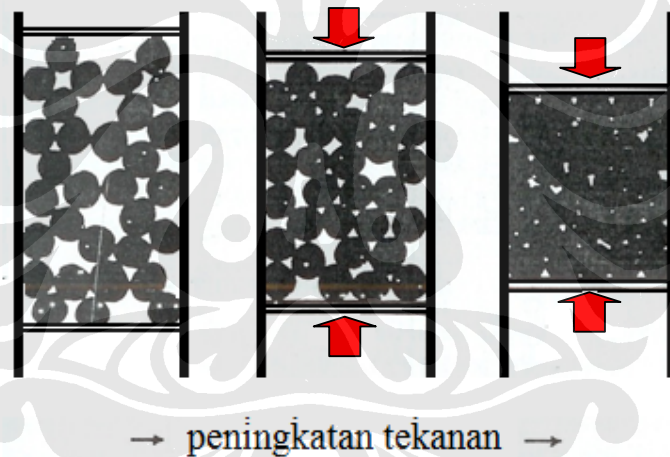
Kompaksi dapat dilakukan melalui kompaksi dingin (*cold compacting*) maupun kompaksi panas (*hot pressing*) baik dengan proses penekanan satu arah (*single end compaction*) maupun penekanan dua arah (*double end punch*). Proses kompaksi dingin merupakan proses kompaksi yang dilakukan dengan temperatur ruang sedangkan proses hot pressing merupakan suatu proses kompaksi yang dilakukan pada temperatur yang relatif tinggi. Pada penekanan satu arah, penekan (*punch*) bagian atas bergerak ke bawah, sedangkan pada penekanan dua arah menggunakan dua buah penekan, yaitu penekan atas dan penekan bawah bergerak secara bersamaan dengan arah yang berlawanan. Penekanan dengan dua arah memiliki keunggulan berupa hasil densitas bakalan yang seragam.



Gambar 2.10. Penekanan satu arah (a) dan penekanan dua arah (b).

Dalam proses kompaksi, serbuk akan mengalami proses pengaturan partikel, deformasi plastis, dan *mechanical interlocking* (saling mengunci). Ketika diberikan pemberian tekanan awal, respon pertama yang terjadi pada proses kompaksi adalah pengaturan (*rearrangement*). Dalam proses ini tidak terjadi proses deformasi partikel namun hanya penyesuaian letak dari serbuk. Dalam proses pengaturan terjadi pergerakan partikel karena terjadi penekanan yang rendah oleh partikel yang mempunyai densitas yang lebih besar hingga tercapai

koordinasi yang terpadat. Pada saat pemberian tekanan yang tinggi maka akan terjadi peningkatan densitas yang disebabkan oleh perbesaran kontak antar partikel sehingga akan terjadi deformasi plastis pada partikel tersebut. Beban yang diberikan juga menyebabkan tekanan terlokalisasi pada kontak antar partikel sehingga terjadi *strain hardening*. Adanya kontak antar partikel akan menghasilkan zona antarpartikel yang terlihat berbentuk flat. Selama proses deformasi, akan terjadi las dingin (*cold welding*) pada antarpartikel yang akan menghasilkan peningkatan kekuatan dalam proses kompaksi. Ikatan las dingin yang merupakan ikatan antara dua permukaan butiran logam yang bersih yang ditimbulkan oleh gaya kohesi tanpa adanya peleburan atau pengaruh panas.. Ketika pemberian beban yang lebih tinggi lagi maka besar deformasi plastis yang terjadi pada setiap partikel meningkat dan efek *strain hardening* pada setiap partikel meningkat sehingga menyebabkan jumlah porositas menurun^[3].



Gambar 2.11. Fenomena serbuk ketika peningkatan tekanan kompaksi^[3].

Kekuatan setelah proses kompaksi dan sebelum proses sinter disebut kekuatan bakalan (*green strength*). Kekuatan hasil kompaksi ini tergantung dari ikatan antarpartikel yang terjadi akibat deformasi plastis antar partikel sehingga akan menghasilkan lapisan antarmuka yang padat. Kekuatan bakalan umumnya dapat ditingkatkan dengan cara yaitu sebagai berikut^[11]:

1. Menggunakan serbuk yang halus.
2. Menggunakan serbuk dengan bentuk partikel yang tidak beraturan dan permukaan yang kasar.

3. Meningkatkan tekanan kompaksi.
4. Mengurangi kontaminasi permukaan partikel.
5. Mengurangi jumlah pelumas atau zat aditif pada serbuk.

2.3.4 Proses Sinter

Proses sinter merupakan proses pemanasan yang dilakukan di bawah temperatur lebur untuk membentuk ikatan antarpartikel melalui mekanisme perpindahan massa yang terjadi dalam skala atomik. Proses sintering merupakan proses yang sangat penting untuk menghasilkan sifat yang mekanis baik pada material yang dibuat dari proses metalurgi serbuk. Dalam skala mikro, ikatan antarpartikel akan timbul karena adanya gaya kohesi pada leher (*neck*) yang tumbuh pada titik dimana partikel bersentuhan. Ikatan yang terjadi dalam proses sintering akan meningkatkan sifat mekanis seperti kekuatan mekanis, konduktivitas listrik, dan konduktivitas panas bakalan^[3].



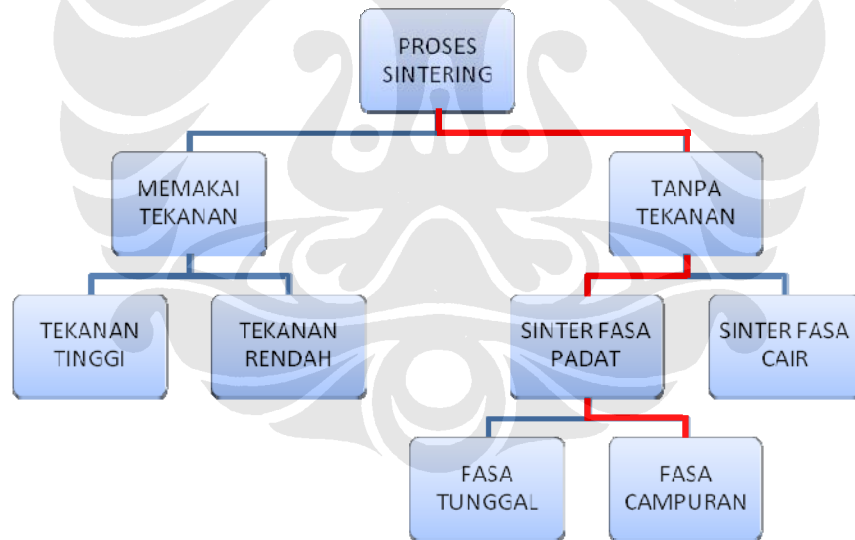
Gambar 2.12. Struktur mikro hasil pengamatan SEM tentang bentuk leher pada proses sinter^[3].

Dalam proses sintering ada 2 tujuan^[14] yaitu untuk menghilangkan pelumas (*lubricant*) dan pada temperatur yang lebih tinggi untuk proses difusi serta pembentukan ikatan antar partikel serbuk. Pada umumnya, perubahan yang terjadi jika serbuk hasil kompaksi disinter adalah sebagai berikut^[11] :

1. Partikel mulai berikatan sehingga meningkatkan kekuatan mekanis, konduktivitas listrik dan konduktivitas panas dari material.
2. Mengurangi jumlah porositas dan meningkatkan densitas.

3. Terjadi pertumbuhan butir sehingga hasil ukuran butir akan lebih besar daripada ukuran butir sebelum disinter.
4. Pori akan menjadi lebih halus dan bentuknya menjadi lebih bulat selama proses sinter berlangsung.
5. Udara yang terperangkap dalam butir akan keluar dan partikel oksida berkurang apabila kondisi atmosfer dapur baik.

Proses sinter biasanya dilakukan di dalam dapur baik dengan menggunakan tekanan (*pressure-assisted*) maupun tidak menggunakan tekanan (*pressureless*). Dalam proses pemberian tekanan dalam proses sinter merupakan teknologi baru dalam pembuatan material melalui jalur metalurgi serbuk dimana pemberian tekanan tersebut dilakukan untuk menghasilkan densitas yang baik pada material. Namun yang umum digunakan adalah proses sinter tanpa menggunakan tekanan karena biaya proses lebih murah dan alatnya lebih sederhana dibandingkan proses sinter dengan menggunakan tekanan.



Gambar 2.13. Macam-macam teknologi sinter.

Dalam proses sinter tanpa menggunakan tekanan terdapat 2 cara yaitu :

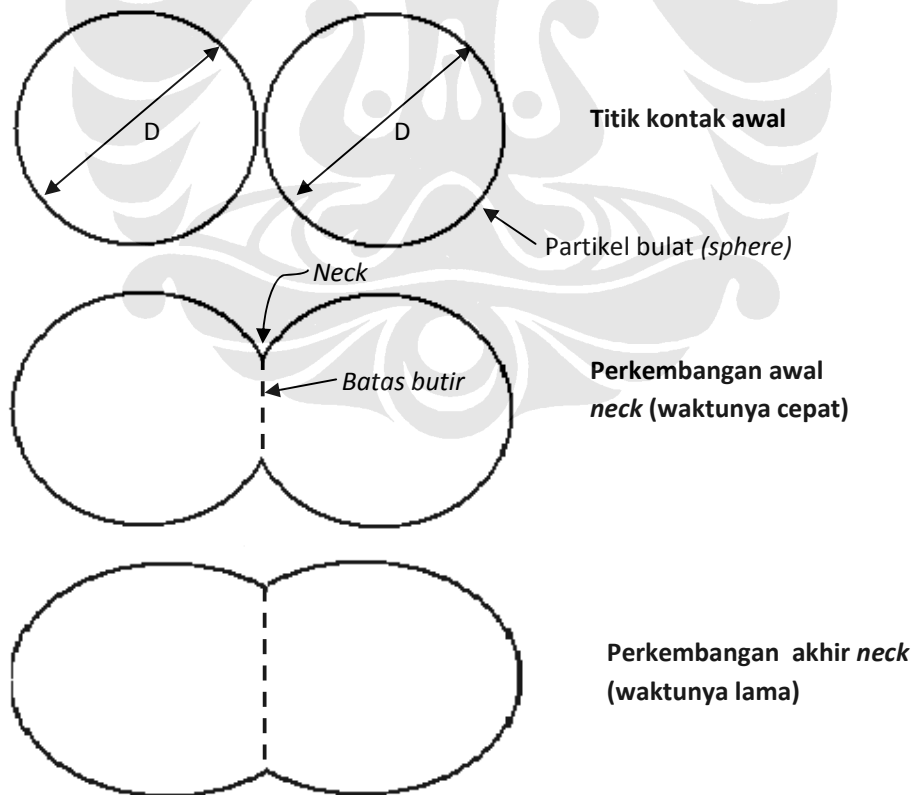
1. Proses sinter fasa cair (*Liquid Phase Sintering*)

Sinter fasa cair merupakan suatu proses sinter yang dilakukan pada temperatur tertentu melibatkan fasa cair yang diakibatkan karena perbedaan temperatur lebur antara 2 atau lebih komponen material dalam suatu bakalan. Fasa cair

tersebut akan mengelilingi fasa solid dalam bakalan sehingga terjadi proses pembasahan. Proses ini mempunyai keuntungan yaitu dapat meningkatkan densitas dengan menghilangnya pori akibat diisi oleh fasa cair. Material yang dapat disinter dengan proses ini antara lain Cu-Co, W-Cu, W-Ni-Fe, W-Ag, Cu-Sn , dan lain-lain

2. Proses sinter fasa padat (*Solid State Sintering*)

Solid State Sintering merupakan jenis proses sintering dimana proses pemanasan yang dilakukan hanya melibatkan fasa padat atau tidak terjadi proses pencairan dari partikel. Dalam proses sinter ini terjadi perpindahan massa. Mekanisme perpindahan massa yang terjadi menentukan jumlah massa yang mengalir akibat adanya gaya pendorong (*driving force*) dari proses sinter. Proses sinter ini akan membentuk ikatan padat antara partikel-partikel ketika pemanasan berlangsung. Ikatan-ikatan tersebut mengurangi energi permukaan dengan memindahkan kembali permukaan bebas, dengan eliminasi kedua dari luas batas butir melalui pertumbuhan butir.



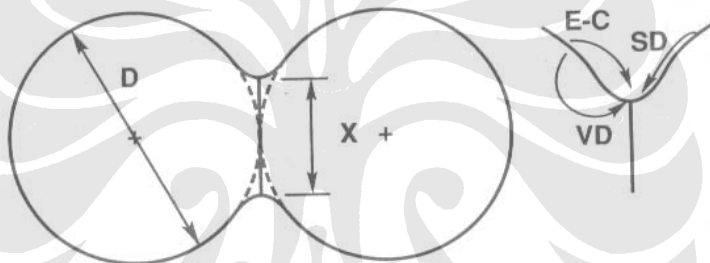
Gambar 2.14. Mekanisme pertumbuhan leher dalam *solid state sintering*.^[15]

Mekanisme perpindahan massa ini terdiri dari dua tahap, yaitu :

a. Perpindahan permukaan (*surface transport*)

Dalam tahap ini terjadi :

- Pertumbuhan leher (*neck*) terjadi tanpa adanya perubahan jarak partikel (tidak ada penyusutan dan densifikasi)
- Perpindahan permukaan dalam proses sintering merupakan hasil dari aliran massa (*mass flow*) dan berakhir pada permukaan partikel.
- Difusi permukaan dan kondensasi merupakan dua kontribusi yang sangat penting selama perpindahan permukaan pada waktu sinter.
- Perubahan dimensi belum terjadi.
- Tidak ada perubahan densitas atau masih konstan.

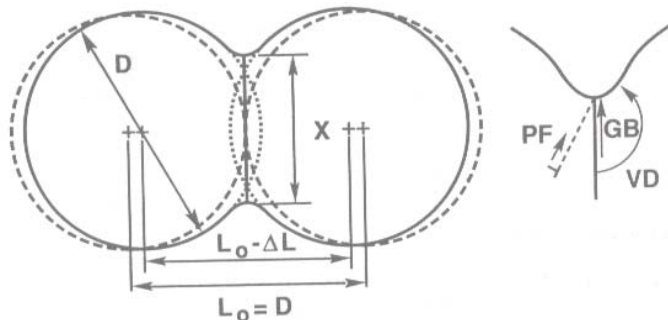


Gambar 2.15. Ilustrasi perpindahan permukaan^[3].

b. Perpindahan *bulk* (*bulk transport*)

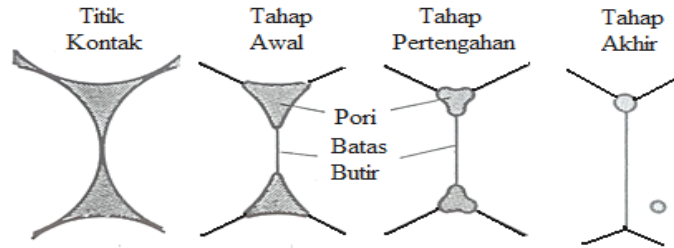
Dalam tahap ini terjadi :

- *Volume diffusion*, difusi batas butir, *plastic flow* dan *viscous flow*.
- Dislokasi pada daerah leher.
- Perubahan densitas atau penyusutan.



Gambar 2.16. Ilustrasi perpindahan bakalan^[3].

Ada 4 tahapan yang terjadi dalam proses sinter secara umum yaitu titik kontak (*point contact*), tahap awal (*initial contact*), tahap pertengahan (*intermediate contact*) dan tahap akhir (*final stage*).



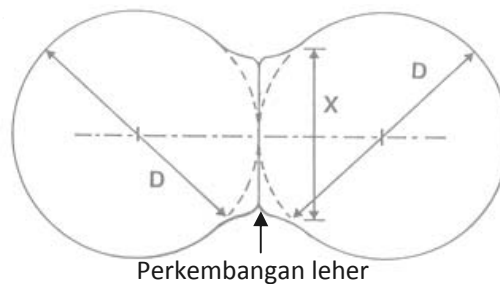
Gambar 2.17. Perkembangan ikatan antarpartikel selama proses sinter^[3].

a. Titik kontak

Pada tahap ini partikel lepas mulai membentuk kontak titik untuk antar partikel lainnya pada orientasi acak. Ikatan yang terjadi masih lemah dan belum terjadi perubahan dimensi bakalan. Semakin tinggi berat jenis bakalan maka bidang kontak yang terjadi antar partikel juga semakin banyak sehingga ikatan yang terjadi dalam proses sinter semakin besar pula. Pengotor yang menempel pada batas kontak akan mengurangi jumlah bidang kontak sehingga kekuatan produk sinter juga menurun.

b. Tahap awal

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



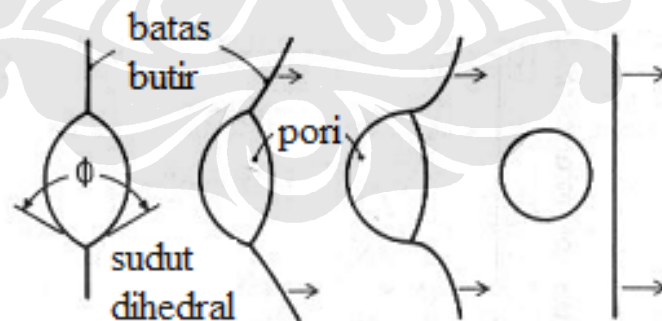
Gambar 2.18. Ilustrasi perkembangan leher dalam tahap awal^[3].

c. Tahap pertengahan

Tahap ini merupakan penentuan terhadap sifat mekanis bakalan sinter. Pada tahap ini terjadi pertumbuhan butir dan struktur pori menjadi halus. Geometri batas butir dan pori yang terjadi pada tahap ini tergantung pada laju sinter. Pada mulanya pori terletak pada bagian batas butir yang memberikan struktur pori. Sedangkan pematatan 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.

d. Tahap akhir

Pada tahap ini prosesnya berjalan lambat. Pori-pori yang bulat menyusut dengan adanya mekanisme *bulk diffusion*. Untuk pori yang berada dibatas 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, pemangkasan pori akan menyebabkan ukuran pori rata-rata meningkat sedangkan jumlah pori akan berkurang. Jika pori memiliki gas yang terperangkap, maka kelarutan gas dalam matrik akan mempengaruhi laju pengurangan pori.

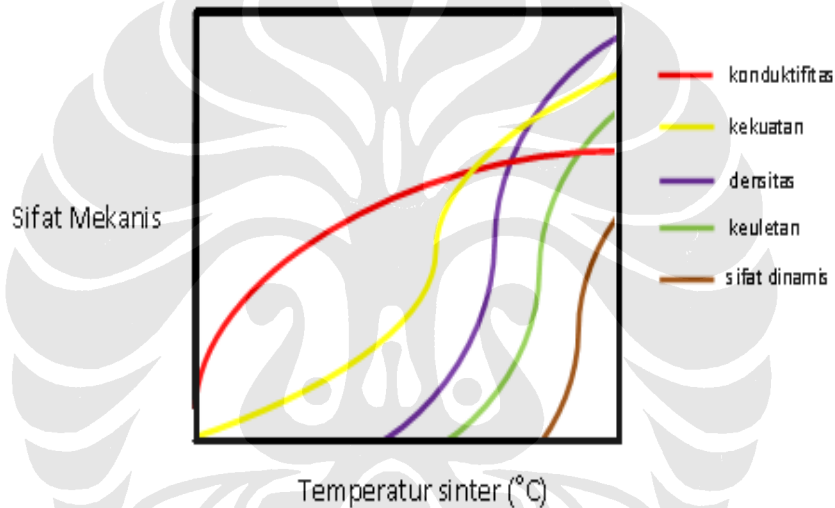


Gambar 2.19. Ilustrasi dalam proses akhir sinter^[3].

Ada beberapa variabel yang mempengaruhi sifat mekanis dari bakalan dalam proses sinter yaitu :

1. Temperatur Sinter

Tujuan utama dalam proses sinter adalah meningkatkan sifat mekanis dari bakalan hasil kompaksi, dimana dengan meningkatnya temperatur sinter maka sifat mekanis bakalan yang telah disinter akan meningkat pula seperti kekuatan, kekerasan, ketangguhan, keuletan, umur fatik, kekuatan impact, dan konduktivitas listrik. Namun, peningkatan temperatur juga menimbulkan kerugian seperti penyusutan ukuran partikel (*shrinkage*) sehingga keakuratan dimensi berkurang yang dikarenakan oleh terjadinya pertumbuhan butir, selain itu biaya proses juga akan lebih mahal.



Gambar 2.20. Pengaruh temperatur sinter terhadap sifat mekanis dan fisis^[3].

2. Waktu Sinter

Peningkatan waktu sinter tidak memberikan pengaruh yang besar seperti pengaruh yang dihasilkan temperatur sinter namun peningkatan waktu sinter memberikan pengaruh sifat mekanis yang hampir sama dengan kenaikan temperatur sinter. Semakin tinggi waktu tahan sinter, temperatur sinter, dan densitas bakalan maka densitas sinter juga akan semakin tinggi pula, namun waktu tahan sinter yang semakin lama akan menyebabkan beberapa kerugian yaitu menyebabkan peningkatan persentase penyusutan, pertumbuhan butir, dan biaya proses yang semakin besar.

3. Atmosfer Sinter

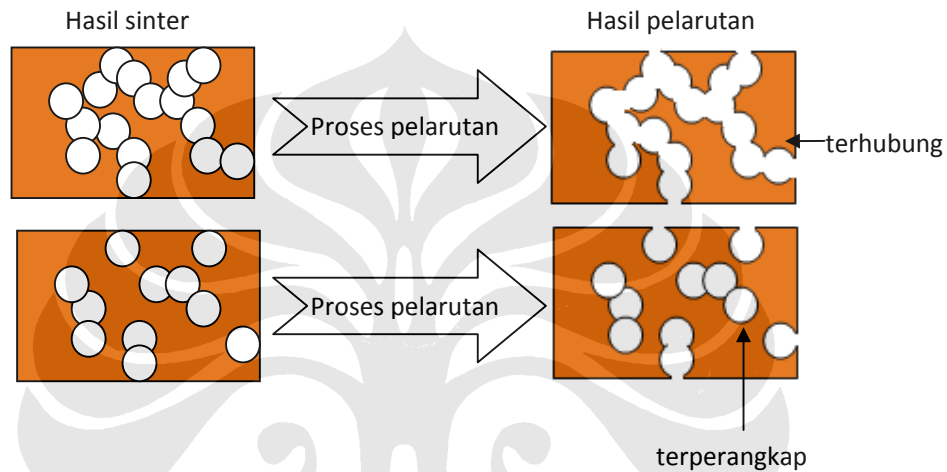
Penggunaan atmosfer sinter adalah bertujuan untuk mengontrol reaksi-reaksi kimia antara bakalan dengan lingkungannya. Gas-gas yang tidak diinginkan dalam atmosfer sinter tidak hanya dapat bereaksi pada permukaan luar bakalan saja, tetapi juga dapat berpenetrasi ke struktur pori dan bereaksi ke dalam permukaan bakalan. Oksida yang timbul pada material dalam proses sinter akan menghalangi terjadinya ikatan difusi dalam bakalan. Pengontrolan atmosfer memang sangat penting saat proses sinter untuk memperoleh hasil sinter yang optimal namun tidak hanya atmosfer saja yang menyebabkan reaksi-reaksi kimia, serbuk yang telah dikompaksi biasanya juga membawa zat kontaminasi seperti oksida-oksida dan zat yang menghasilkan gas yang akan terperangkap sehingga saat disinter terjadi perubahan komposisi atmosfer. Atmosfer bisa digunakan untuk menghilangkan pelumas dan binder yang digunakan pada saat proses kompaksi. Ada enam jenis atmosfer yang dapat digunakan untuk melindungi bakalan yaitu hidrogen, amoniak, gas *inert*, nitrogen, vakum, dan gas alam. Atmosfer vakum sering digunakan sebagai atmosfer sinter karena prosesnya bersih dan kontrol atmosfer mudah.

2.3.5 Proses Pelarutan

Proses pelarutan merupakan proses akhir dalam pembuatan logam busa dengan menggunakan proses sinter dan pelarutan karbonat. Tujuan dari proses ini adalah untuk melarutkan garam karbonat yang terkandung hasil sinter sehingga akan meninggalkan jejak karbonat berupa pori-pori dalam logam. Proses pelarutan tergantung dari jenis garam karbonat yang digunakan misalnya kalium karbonat yang mempunyai kelarutan dalam air sebesar 112 g/100 ml pada temperatur 20 °C^[16], sehingga untuk melarutkan garam ini dapat dilakukan dengan menggunakan air biasa pada temperatur kamar namun proses pelarutan ini biasanya menggunakan air hangat yang mengalir untuk mempercepat proses pelarutan^[9]. Penggunaan garam harus diketahui sifat garam yang larut dalam air agar tidak mempengaruhi logam busa yang sudah terbentuk misalnya penggunaan kalium karbonat pada pembuatan tembaga busa, sifat kalium karbonat yang larut dalam air akan mengakibatkan larutan menjadi basa namun larutan ini tidak

bereaksi dengan tembaga namun pada logam yang lain seperti Aluminium akan menyebabkan serangan kimia pada material tersebut^[9].

Proses pelarutan dapat berjalan dengan baik jika dalam hasil sinter memiliki kandungan garam karbonat yang saling terkoneksi atau terhubung (*interconnection*) sehingga garam yang ada dalam permukaan dan di dalam logam akan larut namun jika garam karbonat tidak yang saling terhubung atau terperangkap dalam logam maka sulit untuk melarutkannya.



Gambar 2.21. Ilustrasi koneksi antarpori dan garam yang terperangkap

Penghilangan karbonat dalam proses pelarutan dipengaruhi oleh fraksi volum dan ukuran partikel garam karbonat. Adanya koneksi antar garam tergantung dari fraksi volum dari garam karbonat, jika fraksi volum garam karbonat semakin besar maka semakin kecil kemungkinan ada garam karbonat yang terperangkap. Selain itu, ukuran partikel garam karbonat juga mempengaruhi proses pelarutan dimana ukuran partikel garam karbonat yang lebih besar dibandingkan ukuran partikel dari logam akan memperkecil kemungkinan untuk garam terperangkap dalam matrik logam^[17].