

BAB 2

STUDI LITERATUR

1. Logam Busa

Logam busa sudah menarik perhatian para insinyur di seluruh dunia selama hampir 2 dekade terakhir. Hal ini disebabkan oleh kombinasi atributnya yang sulit ditandingi, di antaranya ; luas permukaan spesifik tinggi, ringan (material ini terdiri atas sekitar 90% rongga), daya tahan di lingkungan ekstrim (temperatur tinggi, korosi dan kelembaban, yang tergantung pada logam atau keramik yang digunakan), kekakuan, penyerap energi benturan yang baik, peredam suara bising yang baik, serta dapat didaur ulang (*recyclable*).

Namun, meskipun memiliki manfaat besar pada sejumlah aplikasi industri, logam busa konvensional masih terbatas di pasar relung (khusus). Proses produksi logam busa yang ada saat ini belum cukup murah untuk komersialisasi secara masal karena terbentur oleh tingginya biaya dan persyaratan mutu.

1.1 Definisi Logam Busa

Ada beberapa kerancuan terminologi "logam busa", karena sering juga digunakan untuk menguraikan material bukan busa dalam pengertian yang paling kaku. Untuk mengidentifikasi dengan baik suatu logam busa, kita harus membedakan istilah-istilah berikut ^[14] :

- (a) *Cellular Metals* : istilah ini yang paling umum digunakan, mengacu pada suatu benda logam di mana semua ruang kosong (rongga) berisi gas disebar. Fase logam membagi ruang menjadi sel tertutup yang berisi fasa-gas itu.
- (b) *Porous Metals* : suatu jenis khusus logam selular yang dibatasi oleh suatu jenis tertentu ruang kosong (rongga). Pori-Pori umumnya bulat dan terisolasi satu sama lain.
- (c) *(Solid) Metal Foams* : suatu kelas khusus logam selular, biasanya dimulai dari busa *liquid-metal* sehingga memiliki morfologi terbatas. Selnya tertutup, bulat, atau polyhedral dan terpisah satu sama lain oleh suatu film (lapisan) tipis.

(d) *Metal Sponges* : suatu morfologi (bentuk) dari suatu logam selular, pada umumnya dengan ruang kosong yang saling berhubungan (interkoneksi).

1.2 Kriteria Logam Busa

Menurut Girlich^[15], logam busa tergolong *porous media*, dengan kriteria;

(a) Memiliki densitas relatif $\rho_{rel} = \frac{\rho_{foam}}{\rho_{solid}} \approx 10\%$, (2.1)

(b) Memiliki porositas, $\epsilon = 1 - \frac{\rho_{foam}}{\rho_{solid}}$ (2.2)

(c) Memiliki permeabilitas $K = \frac{\mu}{A}$ (2.3)

1.3 Parameter Logam Busa

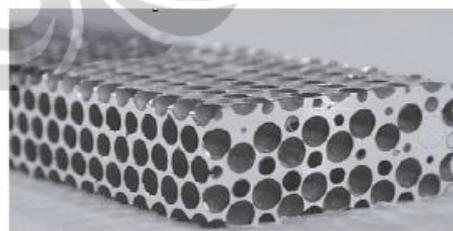
Seperti telah disampaikan, properti logam busa terutama ditentukan oleh jenis struktur serta ukuran sel, jenis dan ukuran pori, dan ada beberapa parameter lain.

(a) Jenis atau Struktur Sel

Ada dua jenis utama struktur sel logam busa, yaitu ; Jenis sel terbuka, lihat gambar 2.1 (a), secara morfologi sangat mirip dengan polimer busa namun dengan karakteristik logam (*ductility, electrical conductivity, weld ability, dsb.*). Dan, jenis sel tertutup, dari luar tampak seperti rata, namun bila diiris melintang, maka akan tampak struktur porinya. Lihat gambar 2.1(b).



(a)

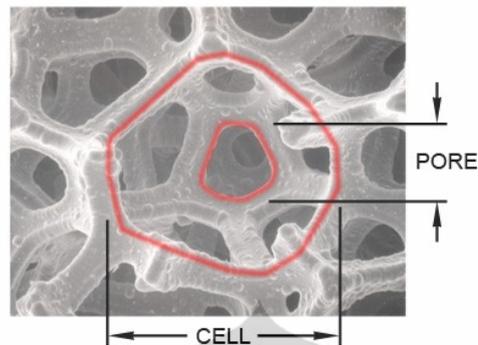


(b)

Gambar 2.1 Contoh sel terbuka (a), serta contoh sel tertutup (b)^[5].

(b) Ukuran Pori

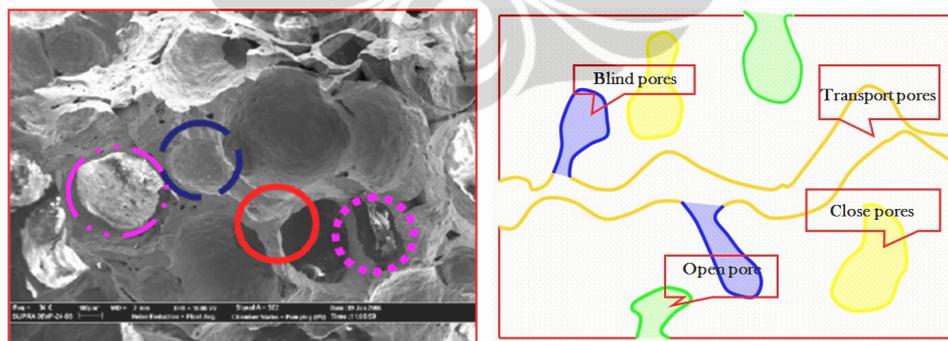
Pore size atau ukuran pori ditunjukkan pada gambar 2.2. Gambar tersebut sekaligus memberi klarifikasi pengertian antara sel dan pori. Ukuran sel adalah ukuran rongga busa, sedangkan ukuran pori adalah ukuran lubang interkoneksi antar sel. Meskipun demikian, di banyak penelitian masih banyak kerancuan tentang perbedaan pemakaian istilah sel dan pori.



Gambar 2.2 Perbedaan pori dan sel ^[16].

(c) Jenis Pori

- Pori Transpor (*transport pores*) adalah pori yang menghubungkan antar bagian berbeda dari permukaan luar suatu padatan ke pori lebih kecil di bagian dalam.
- Pori Buntu (*blind/closed pores*) adalah pori yang berhubungan dengan pori transpor tapi tidak berhubungan ke pori atau permukaan lain.
- Pori Terbuka (*open pores*) adalah kebalikan dari pori tertutup. Tidak berhubungan dengan pori transpor, tapi berhubungan ke pori atau permukaan lain.



(a)

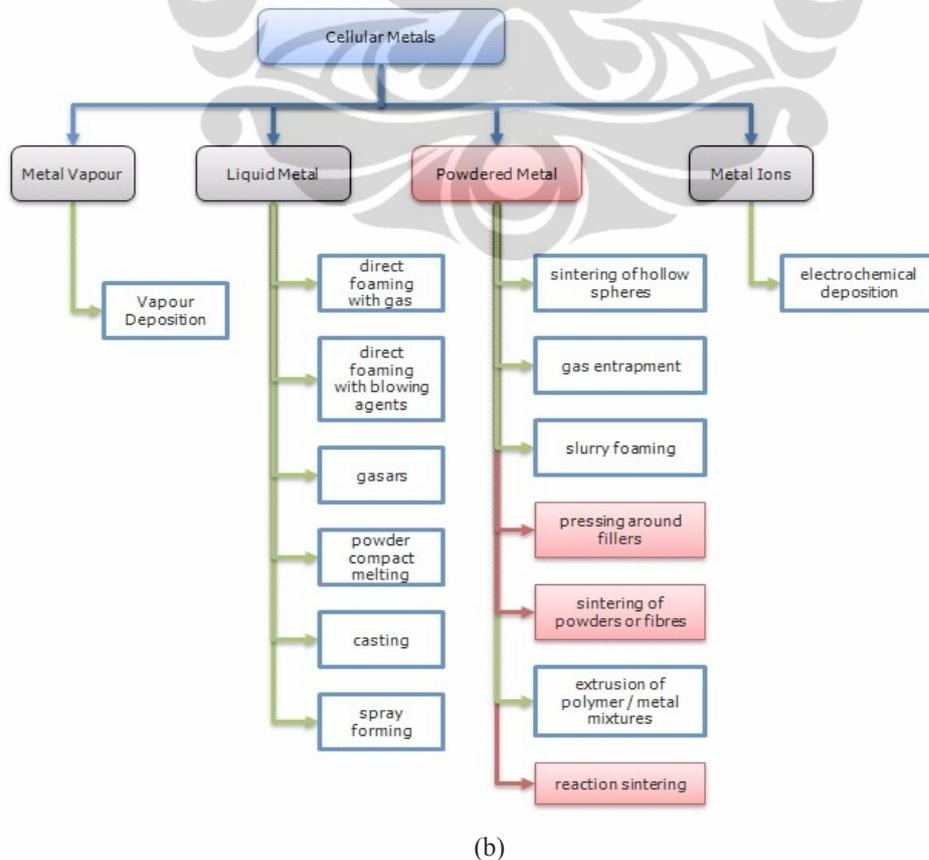
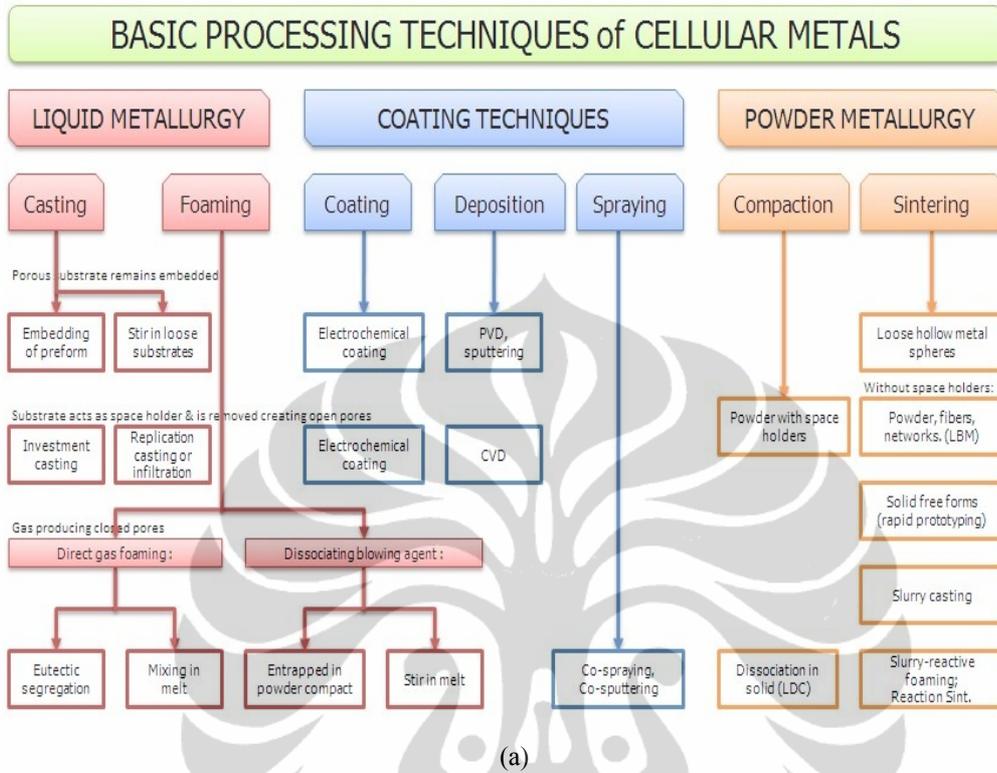
(b)

Gambar 2.3 Ilustrasi jenis pori, (a) langsung pada objek. (b) diagram ^[17].

1.4 Metode Produksi Logam Busa Jalur Padat

Dari beberapa literatur logam busa, baik berupa buku maupun riset dan penelitian, beberapa versi metode produksi dapat dilihat di gambar 2.4. Dari gambar yang ada, dapat ditemukan penamaan metode produksi yang berbeda, walaupun secara

prinsip sama.



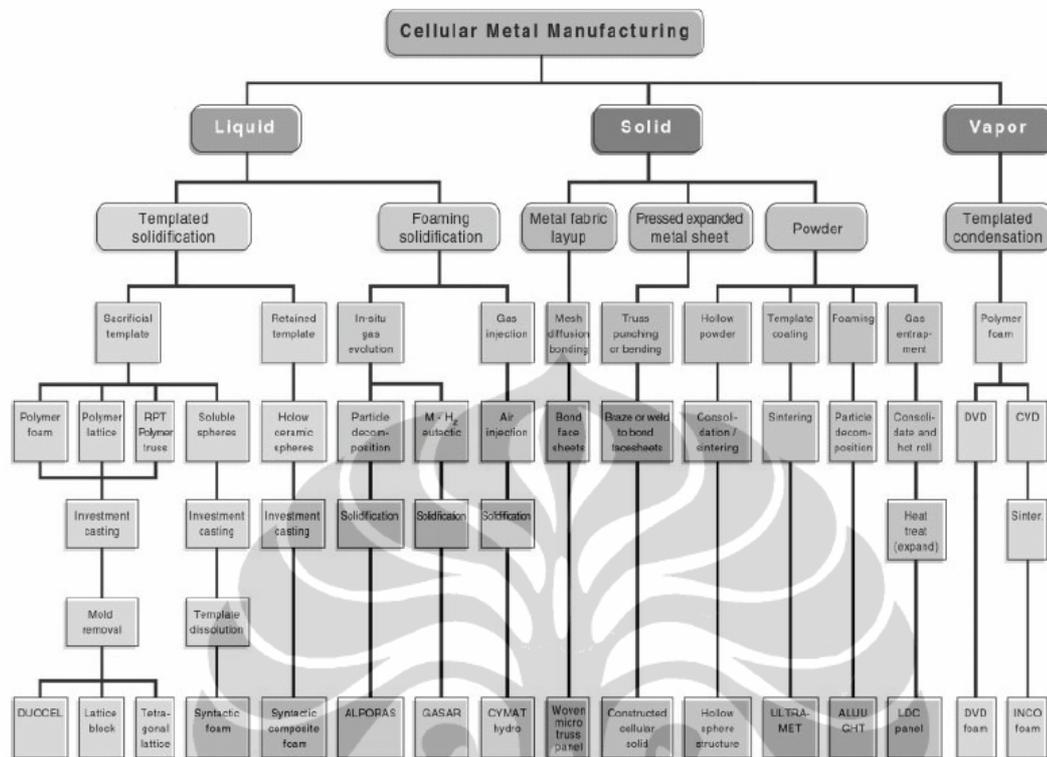


Fig. 2. A taxonomy of cellular metal manufacturing processes. They exploit liquid, solid and vapor phase processing routes.

(c)

Gambar 2.4 Metode produksi logam busa (a) Versi Degischer^[18]. (b) Versi Banhart^[14]. (c) Versi Wadley^[19].

Diagram-diagram di gambar 2.4, walaupun tidak sama persis namun mempunyai kemiripan ide berdasarkan adanya tahapan proses kompaksi, sinter, serta 'penghilangan' atau penyingkiran pembentuk pori setelah proses sinter.

Berikut dijelaskan beberapa metode pembuatan logam busa dari bahan serbuk, yang bisa dikategorikan ke dalam fabrikasi jalur padat. Juga sekaligus dijelaskan beberapa penelitian yang telah menggunakannya.

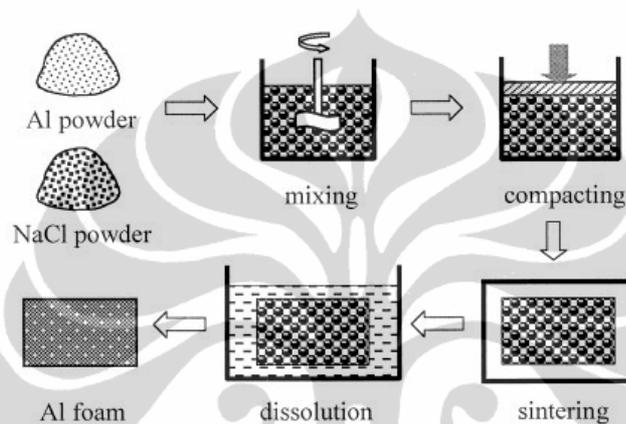
(a) *Sintering-Dissolution Process (SDP)*

Proses sinter dan pelarutan atau *Sintering-Dissolution Process (SDP)* merupakan teknik pembuatan logam busa dari bahan baku serbuk yang merupakan eksperimen Y.Y. Zhao *et al*^[20].

Pertama kali dikembangkan untuk manufaktur Al busa, dimana serbuk Al dan NaCl dengan nisbah tertentu pada tahap awal dicampur lalu dikompaksi menjadi suatu bakalan. Bakalan ini lalu disinter pada suhu di bawah titik lumer NaCl. Al busa didapat setelah partikel NaCl yang 'ditanam' di dalam

bakalan dilarutkan dengan air. Penelitian ini fokus pada teknik fabrikasi dengan pengaturan fraksi massa NaCl.

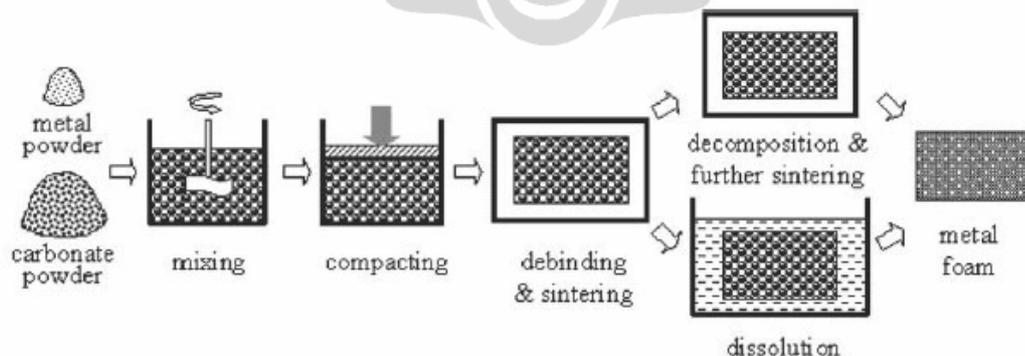
SDP mampu memproduksi bentuk utuh Al busa dengan biaya rendah, dengan morfologi pori, ukuran pori, distribusi pori, serta porositas yang terkontrol. Dihasilkan Al busa dengan densitas relatif 0,15 – 0,5 dan ukuran pori antara 300 – 1000 μm .



Gambar 2.5 Ilustrasi proses SDP ^[20].

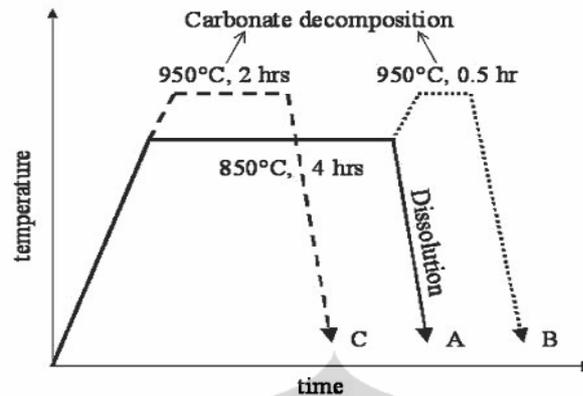
(b) *Lost Carbonates Sintering (LCS)*

Proses sinter dan pelarutan karbonat atau *Lost carbonate sintering (LCS)* merupakan suatu proses pembuatan logam busa dengan teknik metalurgi serbuk yang merupakan lanjutan penelitian oleh Zhao *et al* ^[10].



Gambar 2.6. Ilustrasi proses LCS ^[10].

Dari ilustrasi gambar 2.5 dan 2.6 tahapan proses ini sangat mirip. Perbedaan akan tampak pada 3 strategi atau skema sinter, yaitu dengan tujuan memperoleh *debinding* dan *decomposition* akibat variasi skema sinter itu.



Gambar 2.7 Skema sinter pada LCS ^[10].

Perbedaan lain LCS dibandingkan dengan SDP adalah pada jenis serbuk logam serta jenis serbuk garam yang digunakan, yaitu; serbuk logam menggunakan Cu, dan serbuk garam menggunakan garam karbonat K_2CO_3 .

Hasil penelitian ini adalah Cu busa dengan porositas antara 50 – 85% dan ukuran sel antara 53 – 1500 μm , yang dimanufaktur melalui tahapan pencampuran, kompaksi, dan sinter serbuk Cu dan K_2CO_3 , serta diikuti oleh pelarutan K_2CO_3 .

Dari hasil variasi skema sinter pada rute A dan C, didapat tembaga busa dengan hasil baik, sedangkan pada rute B didapat hasil tembaga busa kurang baik. Selain itu, penelitian ini juga menyajikan hasil uji tekan pada tembaga busa yang dibuat melalui rute A. Hasilnya adalah semakin tinggi porositas yang ada dalam tembaga busa maka kekuatan tekan akan semakin turun.

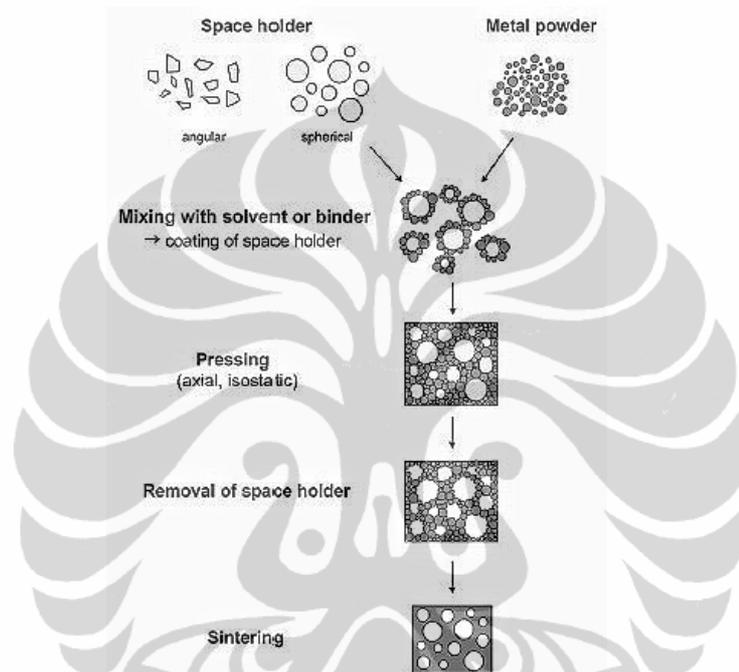
(c) *Space-Holding Fillers*

Teknik ini juga menggunakan bahan pengisi atau *filler materials* dan serbuk logam untuk menghasilkan pori (lihat gambar 2.8). Serbuk logam, serbuk *fillers* kering, bersama bahan pelarut dicampur, atau juga ditambah dengan perekat organik yang dapat digunakan untuk mencampur *space holder* dan serbuk logam tersebut ^[21, 22].

Partikel keramik atau bola-bola kecil berongga, butiran polimer atau bola-bola polimer berongga, garam, bahkan logam, juga dapat digunakan sebagai *space holders*.

Campuran bahan-bahan itu lalu dikompaksi pada temperatur kamar, atau bila

bahan *space holder* berupa bahan tahan panas, kompaksi dapat dilakukan pada temperatur tertentu untuk meningkatkan hasil kompaksi sekaligus memulai proses sinter antara partikel serbuk logam itu. Di kedua kasus ini (kompaksi dan sinter), suatu komposit yang terdiri dari matrix logam dengan butiran pengisi yang tertanam di dalamnya dapat dibentuk.



Gambar 2.8. Ilustrasi tahapan teknik *space holder* [6].

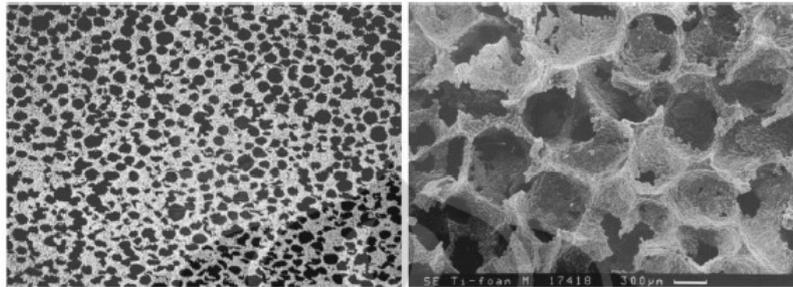
Jika kandungan logam cukup rendah, maka penghilangan material *space holder* di tahap proses berikutnya akan lebih dimungkinkan, karena jaringan pori yang dibentuk oleh bahan pengisi akan saling terhubung (interconnected). Proses penghilangan bahan pengisi ini dapat dilakukan dengan perlakuan thermal, *leaching*, atau dengan menggunakan bahan pelarut berbasis air.

Selanjutnya, dilakukan proses sinter yang merupakan tahap akhir teknik ini untuk densifikasi lanjut dari jaringan logam pori ini.

Contoh aplikasi yang menggunakan teknik ini; Titanium busa telah dimanufaktur dengan salah 1 dari 3 cara ini :

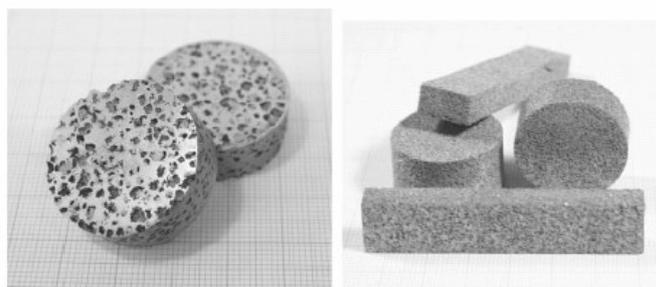
- Menggunakan bola-bola kecil dari bahan polimer sebagai *space holders*. Pengisian serbuk bola-bola polimer sambil digetarkan bersama serbuk

titanium lalu diikuti dengan penekanan dingin, penghilangan polimer dengan perlakuan thermal, dan akhirnya dilakukan sinter. Hasil bisa dilihat pada gambar 2.9 (kiri).



Gambar 2.9 Sel titanium dibuat dengan PM, menggunakan polimer (kiri) atau bulir magnesium (kanan) sebagai *space holder* [6].

- Alternatif lain, bulir logam magnesium digunakan sebagai pengisi. Pada proses ini, bulir itu dicampur dengan serbuk titanium lalu ditekan panas pada temperatur di bawah titik lebur magnesium. Bulir magnesium lalu dihilangkan dengan penguapan ion bertemperatur hingga 1400°C dimana pada saat yang sama terjadi proses sinter antar partikel titanium. Keuntungan menggunakan magnesium adalah titik didih relatif tinggi (1107°C) dan sifatnya yang total tidak dapat bercampur dengan titanium^[23]. Hasilnya bisa dilihat pada gambar 2.9 (kanan).
- Terakhir, titanium dengan porositas tinggi dapat dimanufaktur dengan menggunakan partikel *carbamide* berukuran butir 0,4 – 2,5 mm sebagai *space holder*, lalu serbuk halus titanium berukuran kurang dari $45\ \mu\text{m}$ ditambahkan setelah terlebih dahulu dilembabkan dengan *petrolether*. Campuran itu lalu dikompaksi pada 166 MPa dan dipanaskan pada 170°C , dilanjutkan ke 1400°C . Dihasilkan porositas hingga 70%^[21].



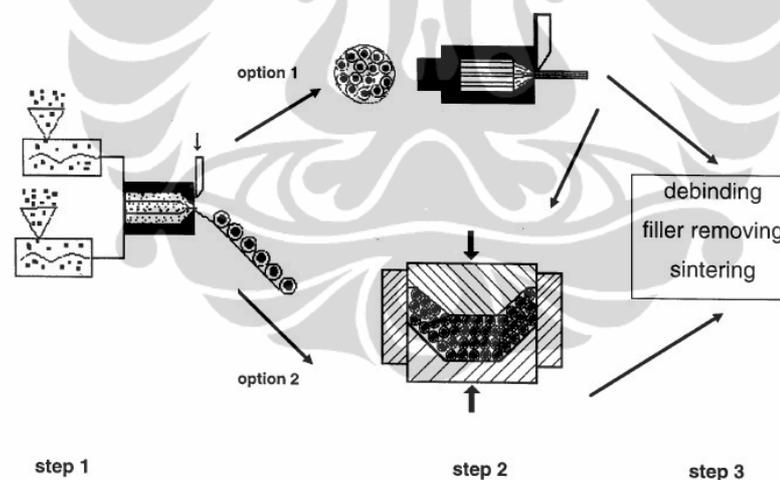
Gambar 2.10 Contoh produk dengan teknik *space-holding fillers* [18].

Stainless steel (316L) dan beberapa *superalloy* berbasis Ni juga dapat diproses dengan cara ini menjadi *cellular solids* dengan porositas antara 60 – 80% [22].

(d) Metal Powder atau Binder Methode

Campuran serbuk logam dan polimer pengikat dapat ditekan atau diekstrusi, kemudian diperlakukan panas untuk menghasilkan komponen atau material berpori. Meskipun tidak menggunakan pengisi sebagai *space holding*, porositas hingga 50% dapat dicapai [24, 25].

Dengan cara yang sama, material dengan orientasi pori tertentu (disebut “micro-honeycombs”) dapat dibuat dengan ukuran diameter *channel* antara beberapa mikron hingga beberapa milimeter tergantung pada jenis logam atau paduan yang dipakai. Tahapan proses diilustrasikan pada gambar 2.11 [26, 27].



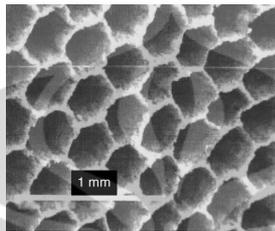
Gambar 2.11 Proses pembuatan logam selular dengan orientasi porositas tertentu, dibuat dari serbuk logam [27].

Tahap pertama, batangan bimaterial yang terdiri dari campuran pengikat plastik dan *space holder* yang mudah menguap dan suatu cangkang yang terbuat dari campuran serbuk logam dan pengikat dipersiapkan.

Tahap kedua, bundel batangan itu lalu ditekan menjadi suatu bakalan (*a green part*). Atau juga dapat dilakukan dengan cara ekstrusi, menghasilkan suatu bakalan dengan penampang lintang yang hampir tidak teratur. Cara lain

dengan penekanan ke arah axial bila diinginkan bakalan berbentuk rumit.

Pada tahap ketiga, *binder* dan *space holder* dihilangkan dan proses sinter dilakukan terhadap serbuk logam agar berkonsolidasi. Gambar 2.12 memperlihatkan contoh hasil produksi metode ini, berupa logam busa dengan penampang lintang sarang lebah.



Gambar 2.12. Sampel besi berpori dengan arah orientasi sel tertentu dan penampang lintang berbentuk hexagonal. (porositas 86%)^[27].

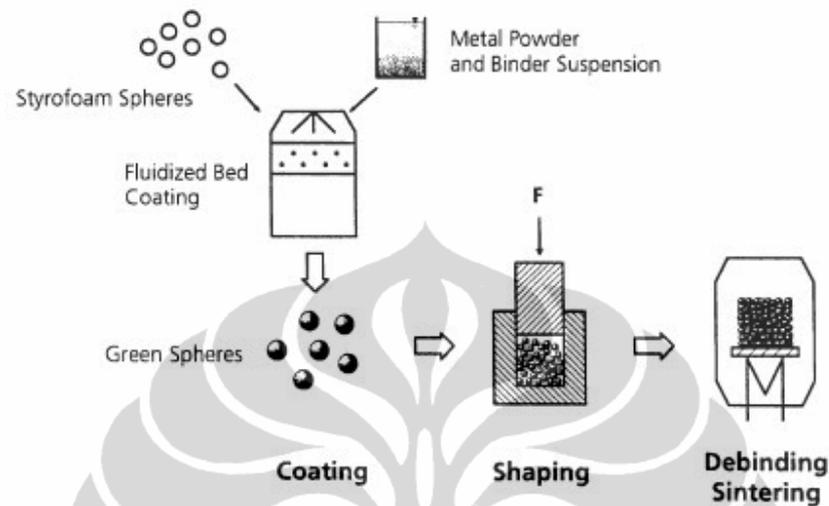
(e) *Metallic Hollow Sphere Structures*

Metallic Hollow Sphere Structures adalah struktur logam menyerupai bola berongga. Rongga berbentuk bola-bola yang dibuat dari tembaga, nickel, baja atau titanium dapat digunakan untuk membuat struktur dengan porositas tinggi dengan cara perekatan bersama antar bola-bola itu oleh proses sinter.

Bola-bola logam berongga itu dapat dibuat dengan cara bervariasi, diantaranya ;

- Kombinasi deposisi listrik dan kimia masing-masing logam ke bola-bola polimer yang kemudian dihilangkan di proses lanjutan^[28], atau
- Melapisi bola-bola polimer (misalnya polystyrene) dengan larutan penyangga serbuk logam berpekat dan sesudah itu disinter untuk mendapatkan suatu cangkang logam yang rapat bilamana polystyrene dihilangkan^[29]. Ilustrasi dapat dilihat pada gambar 2.13.
- Cara lain adalah dengan meniupkan serbuk logam, serbuk metal oksida atau serbuk logam hidride sehingga melapisi bola-bola mikro menggunakan nozel coaxial (1 sumbu). Dilanjutkan dengan mengeringkan bola-bola itu dalam sebuah tabung penetes, kemudian bola-bola yang sudah kering ini disinter atau *dideoxidise*^[30, 31].

- Cara terakhir, adalah dengan atomisasi lelehan logam dan memilih parameter yang cocok agar bola-bola berongga dapat dibentuk ^[32].



Gambar 2.13. Proses pelapisan styrofoam untuk membuat struktur bola berongga ^[29].

Diameter bola-bola yang biasa dihasilkan berkisar antara 0,8 – 8 mm, sedangkan ketebalan dinding antara 10 – 100 μm .

Bola berongga dapat juga digunakan untuk manufaktur material ringan dengan porositas terbuka dan tertutup, keduanya dapat dibuat dengan susunan sel berurutan maupun tidak berurutan ; struktur terbuka didapat jika bola-bola itu sebelum disinter, disusun dengan cara teratur, seperti susunan kisi-kisi Bravais. Dengan proses sinter akan terbentuk 'leher' atau *neck* antar logam bola berongga yang bersebelahan. Sarang lebah dari lilin dapat digunakan sebagai media penumpuk atau penyusun. Maka struktur material yang urut akan diperoleh ^[28].

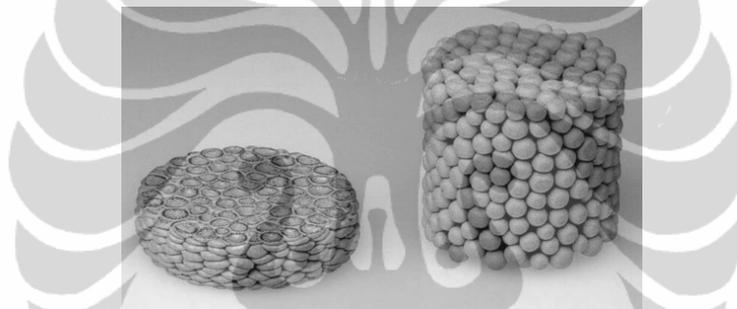
Dengan pemberian gaya saat proses sinter, bola-bola itu dideformasi atau diubah bentuknya menjadi bentuk polyhedral sehingga meningkatkan kontak permukaan untuk proses sinter. Namun menyebabkan reduksi derajat porositas terbuka. Dengan penggunaan suatu lumpur perekat, kontak antar bola dapat ditingkatkan. Salah satu cara untuk merekat oksida bola-bola itu adalah dengan lumpur oksida, dimana dapat diselesaikan proses *deoxidation* dan sinter dalam 1 langkah ^[33].

Alternatif lain, dimulai dari bola-bola polystyrene yang dilapisi lumpur

sehingga terikat bersama. *Debinding* dan *bonding* kemudian dicapai dalam 1 langkah ^[29]. Bola-bola dengan dinding tidak terlalu tipis ini, kemudian dapat digunakan untuk pembentuk struktur terbuka.

Salah satu logam selular yang khas dihasilkan dengan cara ini adalah paduan Ti-6Al-4V, yang mengandung porositas interstitial 36%, porositas kaviti bola 44% dan memiliki volume padat di dinding bola sebesar 20%. Dan memiliki densitas keseluruhan 0,9 g/cm³ ^[30].

Contoh struktur bola berongga terbuka setelah dan sebelum deformasi uniaxial ditunjukkan di gambar 2.14.



Gambar 2.14. Ilustrasi struktur bola berongga terbuka yang dibuat dari bola-bola *stainless steel* dengan proses sinter: sesudah dan sebelum deformasi axial. Diameter komponen ini sekitar 20 mm ^[6].

Struktur tertutup dapat dihasilkan dengan cara pengisian interstisi ruang kosong antar bola-bola itu dengan serbuk logam lalu diikuti perlakuan sinter ^[34]. Bola-bola berdinding tipis sudah dapat diperoleh dengan cara ini.

Jenis struktur kombinasi (*sandwich*) dapat dimanufaktur dalam 1 cara langsung, yaitu dengan proses sinter sejumlah bola berongga antar 2 muka atau sisi lembaran, sehingga menciptakan suatu perekatan tidak hanya antar bola-bola itu namun juga antar sisi-sisi lembaran dan bola-bola.

Salah satu keuntungan struktur bola berongga adalah distribusi ukuran pori tidak acak, namun dapat diatur dengan pemilihan bola-bola berongga yang sesuai. Properti mekanik dan properti fisika lain dari struktur bola berongga ini lebih dapat diprediksi dibanding properti “busa asli atau alami” dengan ukuran pori acak.

Keuntungan lain adalah, secara prinsip, seluruh material yang bisa diproses dengan teknik metalurgi serbuk dapat pula digunakan untuk proses ini, seperti ; *superalloys*, *titanium alloys* dan *intermetallics*.

Struktur bola berongga selanjutnya juga dapat diaplikasikan pada suhu tinggi, misalnya dengan mengganti serbuk logam pengisi dengan logam cair untuk infiltrasi ^[28], namun dianjurkan dengan pemberian tekanan dan proses *preheating* pada bola-bola agar pengisian struktur secara lengkap lebih terjamin ^[35, 36].

(f) *Sintering of Powders or Fibres*

Metode ini menghilangkan bahan pengisi pembentuk pori pada saat proses sinter. Jadi tidak melalui pelarutan. Metode *Loose pack* ini atau *gravity sintering* paling banyak digunakan untuk perunggu (Cu89Sn11). Temperatur sinter sekitar 820°C, dan dapat mencapai porositas antara 20 – 50% .

2. Tembaga Busa

2.1 Teknologi Metafoam ® ^[37]

Metafoam mengoptimalkan properti logam tembaga busa untuk aplikasi spesifik. Dengan proses produksi eksklusifnya, Metafoam telah berhasil menemukan cara untuk mengontrol properti akhir struktur mikro logam busa, yang dengan itu mendorong ke arah pengembangan metode "*Material by design*" ^[38, 39].

Oleh karena struktur mikro ini terdiri atas sel yang saling berhubungan (interkoneksi) oleh *micro-openings* yang disebut "jendela", produk Metafoam sudah mampu mencapai luas permukaan spesifik hingga 100x lebih luas (rerata 20.000 m²/m³) dibanding karakteristik logam busa lainnya. Nilai ini setara dengan lebih dari 3 kali luas lapangan sepak bola setiap 1 meter kubik.

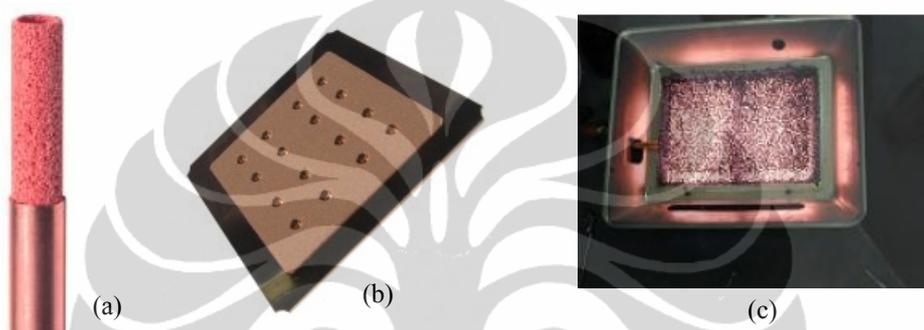
Hal ini menawarkan bukti keuntungan lain logam busa karena mempunyai dampak langsung pada performa proses pertukaran panas.

2.2 Aplikasi Tembaga Busa

Performa bahan ini khususnya dalam *heat transfer*, semakin baik, hal itu terjadi karena luas permukaan kontak yang jauh bertambah luas akibat adanya pori-pori.

Kombinasi antara sifat dasar tembaga dan luas area yang besar akan menghasilkan efisiensi pemindahan panas dan listrik sehingga secara tidak langsung akan menurunkan biaya proses.

Aplikasi tembaga busa tidak jauh berbeda dengan saat berwujud solid atau padat, misalnya ; untuk pendingin pada komputer, pencedap suara (*sound absorber*) untuk aplikasi temperatur tinggi, pipa panas (*heat pipe*) untuk memindahkan panas, dan sebagai material pada alat pendidih (*boiling plates*).



Gambar 2.15. Contoh aplikasi tembaga busa (a) pipa panas (*heat pipe*), (b) pelat pendidih^[37], dan (c) Tungku gas (*gas burner*).^[37]

2.3 Penelitian Tembaga Busa

Selain penelitian Zhao tahun 2004^[10], yang sudah dibahas di bagian 1.4(b), penelitian tentang tembaga busa yang penulis temukan adalah ;

Penelitian Sri Harjanto dan Iman Firmansyah Ika pada tahun 2008, dengan parameter proses; fraksi massa bahan pengisi 0 – 60% K_2CO_3 terhadap serbuk logam induk, dengan 1 skema sinter $950^{\circ}C$ selama 2 jam. Diperoleh hasil tembaga busa dengan ukuran pori 197 – 928 μm , densitas antara 1,28 – 2,75 g/cm^3 , porositas antara 27,36 – 85,69%^[9].

Penelitian lain yang bersamaan dengan penelitian ini, ada dua; Pertama, Sri Harjanto dan Khalid Mawardi (2009) meneliti pembuatan Cu murni busa dengan pengisi K_2CO_3 dengan varian 3 ukuran butir; 420 – 542 – 841 μm , fraksi massa pengisi konstan 50%, 4 skema sinter pada suhu 825, 850, 900, dan $950^{\circ}C$, semua dengan waktu tahan 2 jam^[43]. Kedua, Sri Harjanto dan Irwan (2009) meneliti pembuatan logam Cu murni busa dengan fraksi pengisi 20, 30, 40, dan 50% massa SiO_2 (silica gel). Skema sinter adalah $850^{\circ}C$ selama 2 jam^[44].

3. Kuningan (Cu-15Zn) Busa

Dideskripsikan sebagai suatu paduan yang terdiri dari utamanya *copper* (lebih 50%) dan zinc, yang mana sejumlah kecil elemen lain mungkin ditambahkan. Beberapa standar komposisi ; a) Cu= 55% dan Zn= 45%, b) Cu=65 dan Zn= 35%, c) Cu= 70% dan Zn= 30%, d) Cu= 80% dan Zn= 20%, e) Cu=85% dan Zn= 15%, f) Cu= 90% dan Zn= 10%.

3.1 Penamaan Kuningan Busa

Kuningan busa memiliki beberapa nama atau sebutan, di antaranya; *Brass metal powder, brass metal plate, brass metal sheet, brass nanoparticles, brass metal wire, Brass powder, brass plate, brass sheet, brass nanoparticles, brass wire* ^[13]. Beberapa penamaan lain khusus untuk komposisi 85Cu-15Zn, yaitu dengan kode C23000 ^[40] atau *red brass* ^[41].

Tabel 2.1 Properti fisika Cu-Zn ^[13] dan C23000 ^[41]

Apparent Density	~2,40 – 3,3 g/cm ³	
Density		8,75 g/cm ³ @ 20 °C
Melting Point	~1700 °F	
Sintering Temperature	~870 – 960 °C	
Specific Heat	0,09 °C	
Electrical Resistivity		4,65 microΩ-cm @ 20°C
Electrical Conductivity	5 – 36 % IACS @ 20°C	0,216 MegaSiemens/cm @ 20°C
Thermal Conductivity		159,2 W/m.K at 20°C
Coefficient of Thermal Expansion		18,7.10 ⁻⁶ per °C (20 – 300 °C)
Specific Heat Capacity		377,1 J/kg.K at 293 K
Modulus of Elasticity in tension		117000 MPa
Modulus of Rigidity		44130 MPa
Rockwell Hardness	61 – 80	
Specific Gravity	~ 8,5	8,75
Color	Gold / Yellow	

3.2 Aplikasi Kuningan Busa

Aplikasi Cu-Zn secara umum telah disinggung di atas, namun ada aplikasi khas untuk Cu-Zn ini, yaitu sebagai filter, *silencer*, dan katalis.

Filter berfungsi sebagai penyaring, bisa diaplikasikan sebagai penyaring air ataupun penyaring udara bertekanan di aplikasi pneumatik.

Silencer berfungsi sebagai peredam suara, banyak dipakai di rangkaian pneumatik untuk otomatisasi pabrik, fungsinya mengurangi kegaduhan akibat suara buangan udara bertekanan.

Sedangkan aplikasi sebagai katalis, misalnya sebagai pemercepat reaksi ^[7] atau sebaliknya sebagai penetral atau penghambat atau pencegah suatu reaksi kimia. Katalis yang bersifat mempercepat disebut katalis positif, sedangkan yang bersifat menghambat disebut katalis negatif, atau sering disebut inhibitor.



Gambar 2.16 Contoh kuningan busa dengan struktur sel terbuka ^[42].

Aplikasi di bidang otomotif ialah sebagai ; *Friction material, gears, wheels, nuts, valves, fasteners, hardware, lock cylinders, latch bolts, automotive gears* dan *amunitions*.

3.3 Penelitian Kuningan Busa

Berikut ini, akan diulas singkat beberapa penelitian yang menggunakan fabrikasi jalur padat, khususnya dari bahan baku serbuk. Pemilihan juga berdasarkan pada penggunaan serbuk utama dari keluarga Cu dan paduannya, khususnya paduan Cu-Zn. Penelitian yang berhasil kami data, adalah ;

Enrique M. Castrodeza dan Carlo Mapelli pada tahun 2008, mempublikasikan penelitian dengan judul *Processing of Brass Open-cell Foam by Silica-gel Beads Replication*, meneliti tentang fabrikasi CuZnPb busa (CW614N), dengan memilih silica-gel (SiO₂) sebagai bahan *space-holder*, dan larutan HF 25% sebagai pelarut silica gel. Namun tidak menggunakan teknik fabrikasi metode serbuk, melainkan menggunakan proses infiltrasi SiO₂ ke dalam CuZnPb cair ($\approx 1000^{\circ}\text{C}$). Uji tekan menggunakan laju beban 1 mm/min. Hasil berupa CuZnPb dengan densitas relatif

0,31. Jenis sel terbuka dengan pori saling terhubung ^[11].

Enrique M. Castrodeza dan Carlo Mapelli pada tahun 2009, melanjutkan penelitian itu dengan judul *Processing of Shape Memory CuZnAl Open-cell Foam by Molten Metal Infiltration*. Fokus penelitian ini adalah pada struktur mikro yang dihasilkan, serta tiadanya interaksi SiO₂ terhadap logam induk ^[45].

4. Tahap Penting pada Fabrikasi Jalur Padat

4.1 Sinter

Definisi ISO menyatakan “sinter adalah perlakuan panas suatu serbuk atau hasil kompaksi pada suatu temperatur di bawah titik-lebur unsur utama, untuk meningkatkan kekuatannya dengan cara mengikat bersama-sama partikel-partikelnya” ^[10].

Sinter merupakan langkah kunci pada komponen serbuk logam, dimana partikel serbuk 'dilas' bersama-sama menjadi suatu komponen logam dengan kriteria kekuatan tertentu agar aman sebagai suatu komponen rancang-bangun.

Sinter umumnya terdiri dari 6 tahap berbeda, yang tidak selalu berurutan : *Initial particle bonding, Neck growth, Pore rounding, Pore channel closure, densification and pore shrinkage, Pore coarsening* ^[12].



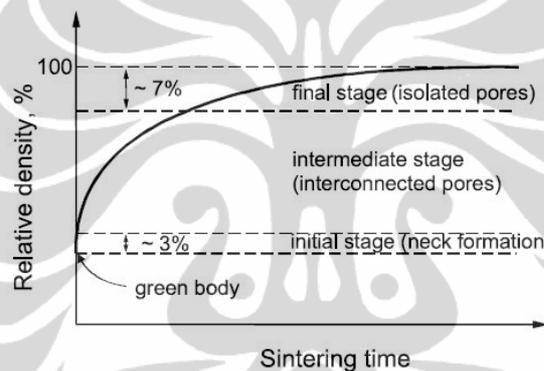
Gambar 2.17. Rekristalisasi saat Sinter, ditandai dengan terbentuknya 'leher' atau 'neck' di pertemuan butir ^[46].

Ada 4 jenis sinter, yaitu ; sinter keadaan padat terjadi bila serbuk yang dikompaksi terdensifikasi seluruhnya pada suhu sinter. Biasanya dibagi menjadi 3 tahap yang saling tumpang tindih yaitu : *initial, intermediate dan final*, yang akan dijelaskan di bagian berikut.

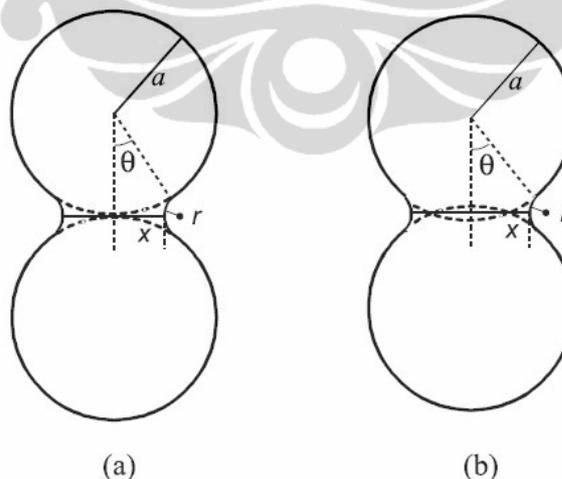
Sinter fasa cair terjadi bila suatu fasa cair hadir saat serbuk yang dikompaksi sedang disinter.

Sinter aliran viskos terjadi bila volume fraksi cairan cukup tinggi sehingga densifikasi penuh bakalan dapat dicapai oleh suatu aliran viskos campuran cair-butiran tanpa ada perubahan bentuk butir saat densifikasi.

Sinter transien fasa cair adalah suatu kombinasi antara sinter fasa cair dan sinter kondisi padat. Di sinter teknik ini suatu fasa cair terbentuk di bakalan pada tahap awal sinter, tetapi cairan itu hilang seiring berjalannya proses dan densifikasi selesai di keadaan padat.



Gambar 2.18 Kurva densifikasi dan 3 tahap sinter^[47].



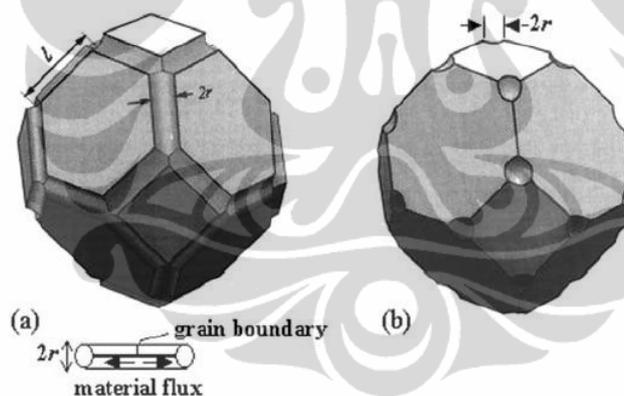
Gambar 2.19 Ilustrasi model 2 partikel untuk tahap awal sinter. (a) tanpa penyusutan. (b) terjadi penyusutan^[47].

Tahapan sinter fasa padat :

(a) Tahap Awal (*initial*). Terjadi pembentukan leher antar partikel, dan berkontribusi terhadap penyusutan bakalan sekitar 2–3%. Pada gambar

2.19(a), jarak antar partikel tidak berubah namun ukuran leher bertambah sejalan dengan waktu sinter. Pada model gambar 2.19(b) dimana terjadi penyusutan, ukuran leher bertambah sejalan dengan waktu sinter, disertai dengan transpor material antar partikel, sehingga terjadilah penyusutan.

(b) Tahap Intermediate. Densifikasi layak diperhitungkan karena sudah mencapai tingkatan 93% dari densiti relatif, terjadi sebelum isolasi pori. Model mikrostuktur Coble untuk tahap sinter *intermediate* didasarkan pada butiran *bcc-packed tetrakaidecahedral* dengan pori-pori berbentuk silinder sepanjang seluruh batas butir, seperti ditunjukkan di gambar 2.20(a). Model tahap *intermediate* ini berasumsi penyusutan sama di arah radial. Meskipun model ini masih terbatas untuk menggambarkan sinter sesungguhnya, tetapi dapat menyederhanakan kerumitan proses sinter dan memungkinkan evaluasi efek variabel sinter pada kinetik sinter.



Gambar. 2.20. Ilustrasi model 2 partikel menurut Coble, untuk (a) tahap *intermediate* sinter. (b) tahap akhir sinter ^[47].

(c) Tahap Akhir. Melibatkan densifikasi dari keadaan pori terisolasi ke densifikasi final. Untuk memodelkan tahap akhir sinter, Coble mengambil butiran *tetrakaidecahedral* dengan pori-pori *spherical* dengan suatu radius r_i di sudut-sudutnya, seperti di gambar 2.20 (b).

Atmosfir sinter. Setelah kompaksi, komponen dimasukkan dalam suatu tungku sinter, umumnya jenis kontinyu ^[10]. Di proses ini 2 hal yang khas, yaitu ada 2 zone temperatur pemanasan; zone pertama untuk menyingkirkan pelumas, dan zone temperatur kedua (yang lebih tinggi) untuk memungkinkan terjadinya difusi

dan ikatan antar partikel serbuk. Operasi sinter ini selalu dilaksanakan di lingkungan atau atmosfer yang bersifat melindungi permukaan benda kerja terhadap oksidasi.

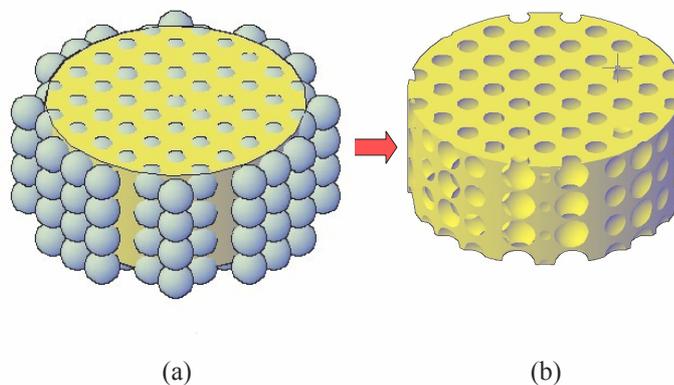
Beberapa atmosfer sinter, antara lain; gas nitrogen, uap ammonia, gas hidrogen, gas alam (CH_4), gas propana, dan lain-lain. Setiap pilihan atmosfer sinter, akan menghasilkan penyusutan bakalan yang berbeda-beda ^[12].

Temperatur Sinter. Komponen dipanaskan hingga temperatur sinter yang besarnya tergantung pada jenis logam. Pencatatan kontrol kecepatan pemanasan, waktu, temperatur, dan atmosfer diperlukan untuk reproduksi hasil terbaik.

Temperatur sinter antara 60 – 90% dari titik lebur logam atau paduan yang bersangkutan. Pada kenaikan temperatur ini, atom-atom bebas berdifusi, sehingga terjadi rekristalisasi, dan batas antar partikel menjadi batas butir. Sambungan menyerupai leher terbentuk antar partikel sebagai tanda hadirnya rekristalisasi, seperti telah ditunjukkan di gambar 2.17.

4.2 Pelarutan

Proses pelarutan adalah tahapan setelah proses sinter. Merupakan tahapan proses yang khas pada fabrikasi logam busa dari wujud serbuk. Pelarutan bertujuan melarutkan bahan pengisi (*fillers*) yang dikompaksi dan disinter bersama bakalan. Namun bahan pengisi ini sudah dipilih dari jenis unsur atau senyawa yang tidak akan bereaksi dengan bakalan. Ruang kosong yang ditinggalkan oleh *fillers* yang larut, inilah yang disebut sel logam busa.



Gambar 2.21 Ilustrasi pelarutan. (a) sebelum. (b) sesudah.