

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

2.1.2 Proses Produksi *aluminium foam*

Penelitian yang dilakukan Vinay (2012) adalah membuat *aluminium foam* melalui tiga teknik yang berbeda yaitu DP (Die Pouring), SSM (Sand Salt Mold), SP (Simultaneous Pouring) dan menentukan densitas masing-masing menggunakan prinsip *archimedes*. Hasilnya terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai Densitas dan % Porositas *Aluminium Foam* yang diproduksi dengan metode *melt route* yang berbeda, (Vinay, 2012).

SI. No.	Metode	Volume awal air dalam pipa, cc	Volume akhir air dalam pipa, cc	Volume aktual spesimen, cc	Massa m, g	Densitas $\rho = m/v, \text{ g/cc}$		% Porositas. $\frac{\rho_{Al} - \rho_f}{\rho_{Al}} \times 100$
						Densitas <i>foam</i> yang diperoleh. ρ_f	Densitas Aluminium, ρ_{Al}	
1	DP	500	520	20	47,8	2,39	2,7	11,48
2	SSM	500	520	20	40	2,0	2,7	25,92
3	SSM	500	530	30	58,30	1,94	2,7	28,14
4	SP	500	510	10	23,40	2,34	2,7	13,33

Hasil dari penelitian Vinay (2012) menyatakan bahwa dari ketiga metode, hanya metode SP diperoleh bentuk *foam*, tetapi strukturnya tidak memuaskan. *Aluminium foam* disintesis oleh *foaming agent* (NaCl) kristal. Masalah utama adalah bahwa fluiditas aluminium rendah ketika menuangkan dalam cetakan dengan cepat akan memadat, yang menghasilkan koagulasi partikel garam di dalam cetakan dan struktur *foam* yang diperoleh masih belum memuaskan. Dalam hal kepadatan struktur *foam* diperoleh dengan baik dengan cara menuangkan secara simultan, tapi kepadatan bukan menjadi parameter yang menentukan kualitas *foam* atau bahan. Oleh karena itu upaya lebih, diperlukan dalam pengembangan *aluminium foam* dan metode karakterisasinya. Tantangan utama

yang ditimbulkan oleh busa logam adalah mendapatkan porositas yang, homogen (Vinay, 2012).

Kemudian berbeda dengan penelitian yang dilakukan Banhart & Baumgartner (2002) keuntungan pertama dari proses TiH_2 dengan menggunakan teknik *powder compaction* adalah bagian *metal foam* berbentuk kompleks bisa mudah diproduksi dengan memperluas *foam* di dalam cetakan yang terbatas. Bobot yang ringan pada *aluminium foam* dapat menggantikan bagian aluminium cor tradisional dan menghemat 30% berat karena struktur komposit *aluminium foam* dan logam dapat dibuat tanpa menggunakan perekat. Keuntungan dari *compact powder router* tercantum dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Karakteristik dari metode *powder compaction*, (Banhart.J & Baumgartner, 2002).

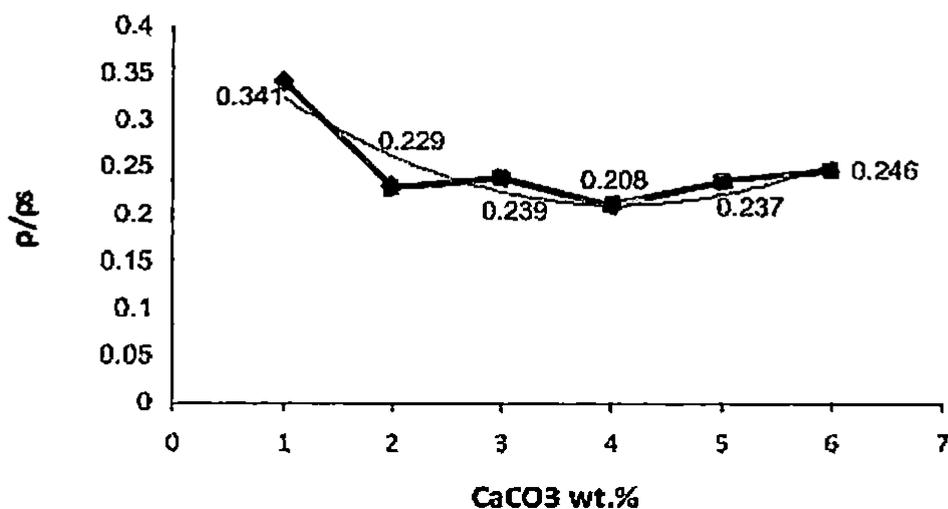
Kelebihan	Permasalahan	Kelemahan
Dimungkinkan untuk dilakukan pembentukan <i>foam</i>	Keseragaman struktur pori masih belum memuaskan	Harga powder yang mahal
Komposit dapat diproduksi	Pengendalian proses harus ditingkatkan	Bagian volume yang sangat besar sulit untuk membuat
Bagian tertutupi oleh kulit logam	Permeable (lubang)	Proses pelapisan membutuhkan penyegelan
Nilai porositas dapat dicapai	Sulit dikontrol	
Fleksibilitas untuk pilihan paduan		
Tidak ada partikel penstabil yang ditambahkan		
Keramik dan serat dapat ditambahkan		

Menurut Rossella dkk (2010) secara alami, ada juga beberapa kelemahan yang terdapat pada *compact powder router*. Ukuran pada *aluminium foam* yang dapat diproduksi dibatasi oleh ukuran dari komponen pendukung yaitu alat kompaksi. Berbeda, rute-logam cair memungkinkan untuk membuat panel dengan panjang 15m (Cymat Corporation, 2002), dan 100 cm tebal (Miyoshi dkk,1999).

Kita bisa mengambil informasi bahwasanya harga dari powder TiH_2 tersebut sangat mahal, kemudian untuk komponen dengan ukuran yang lebar sangat sulit untuk diproduksi menggunakan teknik *powder compaction* dan proses pelapisan membutuhkan penyegelan. Dari penelitian tersebut metode *melt route* lebih memberikan keuntungan dikarenakan untuk bentuk komponen tidak akan terbatas dalam hal ukurannya. Maka penelitian kali ini mengenai cara pembuatannya, akan menggunakan metode *melt route* dengan menggunakan metode penambahan *foaming agent* (Alporas).

2.1.2 Bahan *foaming agent* atau *blowing agent* yang digunakan.

Penelitian yang dilakukan oleh Aboraia dkk (2011) menyatakan bahwa deformasi dan karakteristik penyerapan energi dari *Aluminium foam* diproduksi dengan menambahkan $CaCO_3$ sebagai *foaming agent* dan diselidiki melalui *uniaxial compression testing*. Sampel *foam* diproduksi dengan densitas yang berbeda.



Gambar 2.1 Efek penambahan $CaCO_3$ pada densitas *foam* (Aboraia, 2011).

Hasil dari penelitian tersebut sebagai berikut :

1. Kalsium karbonat dapat menjadi *foaming agent* yang efisien untuk memproduksi sel tertutup *Aluminium foam* dengan sifat mekanik yang baik.
2. Kepadatan terendah diperoleh pada sekitar 4% penambahan $CaCO_3$.

3. Penyerapan energi dan *Plateau stress* meningkat, seiring dengan meningkatnya densitasnya.

Penelitian yang dilakukan Curran (2003) CaCO_3 sebagai *foaming agent* dengan menggunakan metode *melt route*, memiliki efek ganda yaitu menstabilkan dan meniup gas oksida logam. Jamie dkk (2013) menggunakan CaCO_3 sebagai bahan alternatif pengganti TiH_2 untuk memproduksi *aluminium foam* dengan metode *melt route*. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Surace (2008) yaitu menggunakan aluminium serbuk dan NaCl, dengan variasi fraksi massa, serta variasi penekanan ketika kompaksi dengan menggunakan metode SDP untuk membuat *aluminium foam*.

Kemudian penelitian yang dilakukan Razmi dkk (2013) yaitu penelitian untuk mengetahui korelasi sifat mekanik *aluminium foam* dalam hal pengaruh antara densitas dan porositas serta antara kuat tekan dan penyerapan energi. *Aluminium foam* yang diproduksi menggunakan teknik *Conventional Casting*, menggunakan NaCl sebagai *space holder*. Menggunakan variasi pada ukuran mesh yaitu: (a) Aluminium padat (b) NaCl ukuran mesh 5-10mm (c) NaCl ukuran mesh antara 10-15mm (d) NaCl ukuran mesh 10-15 mm dengan kompaksi. Hasil dari penelitian tersebut yaitu :

1. Semakin tinggi porositas, semakin rendah densitasnya.
2. Pengecoran konvensional menggunakan metode *Space holder*, dapat mencapai kepadatan *aluminium foam* rendah dengan nilai $0,7 \text{ g/cm}^3$.
3. *Aluminium foam* menggunakan NaCl berbagai ukuran dari 10-15mm memiliki kekuatan dan energi penyerapan terbesar karena ketebalan dinding yang tinggi.
4. *Aluminium foam* dihasilkan pengecoran konvensional digabungkan dengan metode *space holder* dapat menjadi bahan penyerapan energi tetapi memiliki kuat tekan yang rendah.

Penelitian yang dilakukan Fida (2008) yaitu pembuatan *Aluminium foam* dengan *foaming Agent* CaCO_3 menggunakan rute *melt based process* didapatkan hasil densitas pada suhu 650°C sebesar $0,406 \text{ gram/cc}$, 700°C sebesar $0,401 \text{ gram/cc}$ dan 750°C sebesar $0,416 \text{ gram/cc}$. Kemudian penelitian yang dilakukan

oleh Effendi (2008) pembuatan *aluminium foam* dengan NaCl dengan metode SDP (Sintering and Dissolution Process) dengan variasi 0%, 30%, 50%, 70% dan 90% dari penelitian tersebut menghasilkan porositas variasi 0% sebesar 16,71%, dan variasi 90 % sebesar 91,70% dan nilai densitas variasi 0% sebesar 0,22 gram/cm³ dan variasi 90% sebesar 2,25 gram/cm³. Penelitian yang dilakukan oleh Indra (2012) yaitu pengaruh penambahan magnesium terhadap densitas, kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tekan *aluminium alloy foam* yang menggunakan CaCO₃ sebagai *blowing agent* dari hasil pengujian diketahui gaya tekan untuk aluminium dengan variasi 4% Mg, 6% Mg dan 8% Mg adalah 38,95 MPa, 45,19 MPa dan 50,82 MPa. Sedangkan densitas untuk setiap komposisi adalah 2,62 gr/cm³, 1,94 gr/cm³ dan 3,44gr/cm³.

Penggunaan *foaming agent* urea juga dapat digunakan sebagai *foaming agent* seperti penelitian yang dilakukan oleh Prasetyo (2013) pengaruh variasi fraksi massa *space holder urea* dengan ukuran *mesh* 16/18 terhadap porositas dan kuat tekan *aluminium foam* menggunakan metalurgi serbuk. Dari penelitian tersebut dihasilkan fraksi massa 50% porositas 62,68%, tegangan luluh 0,27 MPa, modulus elastisitas 0,53 MPa. Fraksi massa 60% porositas 72,50% tegangan luluh 0,25 MPa, modulus elastisitas 0,40 MPa. Fraksi massa 70% porositas 80,81%, tegangan luluh 0,15 MPa, modulus elastisitas 0,21 MPa, fraksi massa 80% porositas 80,77%, tegangan luluh 0,13 MPa modulus elastisitas 0,21 MPa. Kemudian Tri (2013) memfabrikasi *aluminium sandwich foam panel* dengan metode metalurgi serbuk dengan *space holder* urea. Dari penelitian tersebut dihasilkan fraksi 50% tegangan luluh 10,08 MPa, fraksi 60% tegangan luluh 6,64 MPa dan fraksi 70% tegangan luluh 3,27 MPa. Sedangkan penelitian Fadli (2013) memfabrikasi aluminium berpori menggunakan metode metalurgi serbuk dengan urea sebagai *space holder*. Dari penelitian tersebut dihasilkan pada fraksi 0% tegangan luluh sebesar 138,44 MPa, modulus elastisitas 2,71 MPa. Pada fraksi 60 % tegangan luluh sebesar 27,25 MPa dan modulus elastisitas 0,35 MPa.

Berbeda dengan Pramono (2013) menggunakan paduan Pb-Sn sebagai *space holder* pada fabrikasi aluminium berpori menggunakan metode metalurgi serbuk. Dari penelitian tersebut dihasilkan pada fraksi 0% porositas 8,9%,

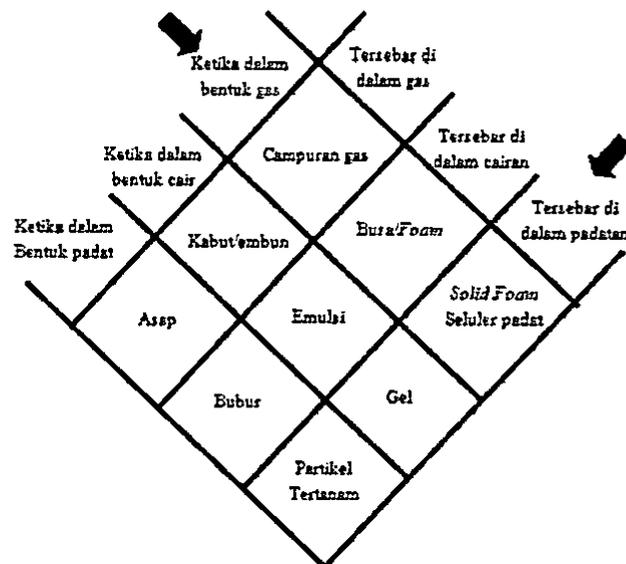
tegangan luluh 138,44 MPa, modulus elastisitas 1521,32 MPa. Kemudian pada fraksi 53,34%, porositas 22,75 % , tegangan luluh 1,31 MPa, modulus elastisitas 33,59 MPa.

Dari beberapa hasil penelitian di atas *foaming agent* yang digunakan yaitu CaCO_3 , paduan PbSn, TiH_2 , Urea dan NaCl masing-masing memiliki karakteristik *aluminium foam* yang berbeda namun dihasilkan perbandingan kenaikan dan penurunan fraksi dan nilai porositas, tegangan luluh dan modulus elastisitas yang sama. Dari ketiga *foaming agent* tersebut penelitian kali ini akan menggunakan NaCl namun berbeda dengan penelitian (Razmi dkk 2013). Pada penelitian kali ini memiliki perbedaan yaitu pada variasi dari segi perbandingan fraksi massanya. Penggunaan NaCl kristal sebagai *foaming agent* merupakan alternatif yang baik dalam penelitian ini karena disamping harganya lebih murah, NaCl kristal tersedia banyak dipasaran dan yang terpenting ramah lingkungan.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Definisi *Metal Foam*

Menurut Matijasevic (2006) pada Gambar 2.2 menunjukkan jenis-jenis koloid yang dapat terbentuk melalui dua fasa. *Solid foam* didefinisikan sebagai material yang terbentuk dari fasa gas yang terdispersi dalam fasa solid, sumber dimana pembentukan fasa campuran tersebut ditampilkan pada Gambar 2.2. Morfologi *foam* dapat dipertahankan selama pemadatan, sehingga mendapatkan apa yang disebut "*solid foam*". *Metal foam* umumnya disebut sebagai busa padat, yang lebih umum disebut *solid cellular* (Baumgärtner, 2000). *Solid foam* sering juga disebut dengan solid seluler, hal ini dikarenakan, fasa gas yang terdispersi dalam solid membentuk konstruksi ber-sel sehingga disebut dengan *cellular foam*. Ketika *solid foam* berasal dari material logam (metal), maka dinamakan dengan *metal foam*. *Metal foam* dibedakan dari logam berpori (porous metal) melalui nilai densitas yang lebih kecil, dan jumlah % fasa gas sebesar 30-98 % volume.



Gambar 2.2 Klasifikasi jenis koloid berdasarkan fasa pembentuk (Matijasevic, 2006)

2.2.2 Porositas Metal Foam

Pemodelan sifat bahan berpori yang sangat bergantung pada karakterisasi struktur material karena *metal foam* atau logam berpori memiliki susunan yang kompleks dan mikro, pengukuran dan parameterisasi karakteristik struktural masih merupakan tantangan sangat penting. Selain densitas dan ukuran pori, sifat-sifat materi sangat banyak dipengaruhi oleh parameter struktural seperti bentuk pori-pori, ukuran porositas, distribusi, bentuk dan kepadatan, kekasaran permukaan, luas permukaan, dll. Porositas didefinisikan sebagai persentase ruang kosong dalam padatan (Ashby dkk, 2000).

Logam berpori atau dikenal dengan istilah *metal foam* merupakan suatu *advance material* yang memiliki struktur berongga pada material logam yang solid dengan fraksi volume antara 75%-95%, (Kennedy, 2012). Logam berpori disebut juga dengan *cellular material* yang didefinisikan sebagai suatu "ruang" dalam material yang dibagi dalam *cell* tertentu yang memiliki batas-batas antar *cell* yang terbentuk dari logam padat dan memiliki struktur dalam yang berongga.

Metal *foam* memberikan kombinasi unik dari beberapa sifat yang tidak dapat diperoleh melalui logam konvensional misalnya kepadatan rendah, kekuatan tinggi, kemampuan untuk menyerap energi dan konduktivitas termal yang rendah, (Degischer, 2002).

Tabel 2.3 Nilai porositas dari berbagai macam proses pembuatan *metal foam* (Banhart.J, 2001).

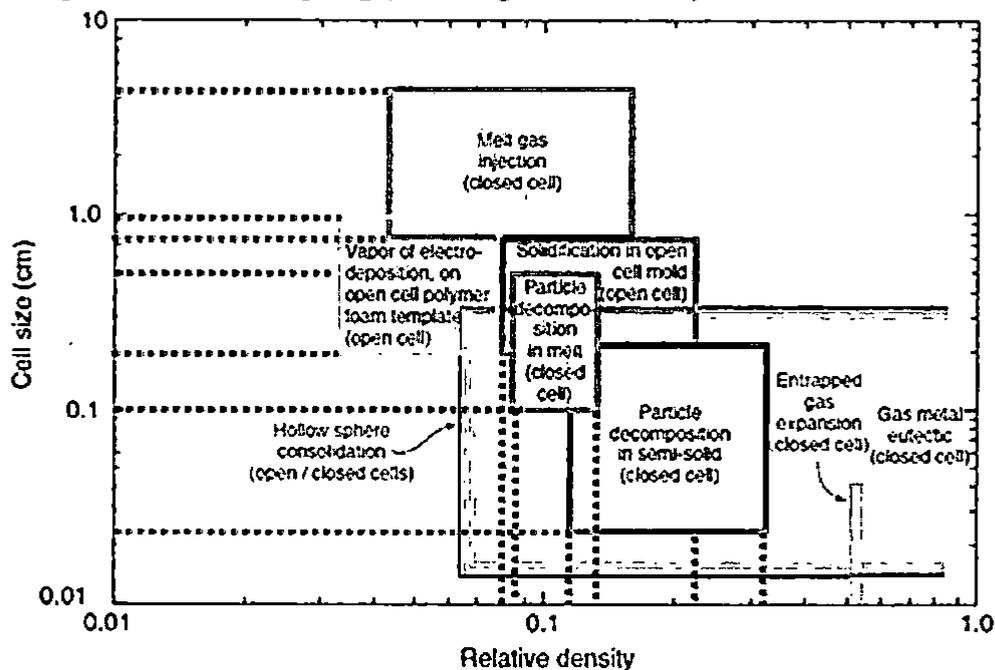
Kategori	Proses	Porositas yang dicapai (%)	Logam (Contoh)	Ketersediaan komersial
Proses cair	Direct Foaming dengan injeksi gas	80-97,5	Al, Zn	ya
	Direct Foaming dengan zat penutup	91-93	Al, Zn	ya
	Gasars	Mei-75	Ni, Cu, Al, Mg	tidak
	Kompaksi dengan pelelehan powder	60-90	Al, Zn, Pb	ya
	Casting dengan busa polimer	80-97	Al, Zn	ya
	Blok kisi material	-	Al	tidak
	Space holder dengan casting	≤65	Al, Zn, Pb, Cu	ya
	penyemprotan foaming	≤60	Steel, Cu	tidak
Proses Padat	Sintering of powders and fibres	20-80	Bronze, steel	ya
	Gas entrapment	≤45	Ti	tidak
	Foaming of slurries	≤93	Al	tidak
	Powderpressing around space holders	≤70	Ti	tidak
	Hollow sphere structures	≤80	Steel	tidak
	Powder/binder techniques	-	Fe, Cu	tidak
	Reaction sintering	≤50	Ti, Al, Fe, Al	tidak
	Electro-deposition	Electro-deposition	92-95	Ni, Cu
Vapour deposition	Vapour deposition	93-97,5	Ni, Ni-Cr, Cu	ya

2.2.3 Proses Produksi *Metal Foam*

Menurut Wadley (2002) sifat *metal foam* tergantung pada sifat asli logam, densitas relatif dan topologi sel (misalnya sel terbuka atau sel tertutup, ukuran sel, dll). *Metal foam* dibuat dengan salah satu dari sembilan proses, yang tercantum di bawah ini. Logam yang telah dibuat *metal foam* dengan salah satu proses, kemudian digambarkan pada Gambar 2.3.

1. Membuat gelembung gas ke dalam campuran Al-SiC atau Al - Al₂O₃ cair, (untuk logam Al & Mg).
2. Pengadukan *foaming agent* (seperti TiH₂) menjadi paduan cair (biasanya paduan aluminium) dan mengendalikan tekanan saat pendinginan (untuk logam Al).
3. Penyempurnaan serbuk logam (umumnya paduan Al) dengan partikel *foaming agent* (TiH₂) diteruskan dengan pemanasan sampai keadaan sangat lunak, ketika *foaming agent* melepaskan gas hidrogen, maka material tersebut akan mengembang (untuk logam Al, Zn, Fe, Pb, Au).
4. Pembuatan cetakan keramik dari lilin atau polimer-*foam* prekursor, diteruskan dengan pembakaran prekursor dibantu dengan tekanan bersama dengan logam yang dicairkan atau serbuk logam yang meleleh yang kemudian disinter (untuk logam Al, Mg, Ni-Cr, *Stainless Steel*, Cu).

5. Deposisi logam dari fasa uap atau dengan elektrodposisi ke permukaan prekursor polimer-*foam* dan kemudian dibakar, sehingga meninggalkan struktur berlubang (*hollow cores*), (untuk logam Ni, Ti).
6. Dengan menggunakan *Hot Isostatic Pressing* (HIP) untuk memperangkap gas inert bertekanan tinggi, yang diikuti dengan ekspansi gas pada kenaikan temperatur tertentu (untuk logam Ti).
7. Sintering bola berongga (*hollow spheres*), dibuat dengan proses atomisasi dimodifikasi, atau dari logam-oksida atau bola hidrida diteruskan dengan mereduksi atau *dehydration*, atau dengan cara deposisi uap dari logam ke polimer (untuk logam Ni, Co, Ni-Cr paduan).
8. Penekanan bersama antara serbuk logam dengan serbuk yang mudah terlarut (seperti NaCl), atau infiltrasi serbuk yang mudah terlarut kedalam logam cair, yang diikuti dengan pelarutan sehingga didapatkan rangka *metal foam* (untuk logam Al dengan NaCl sebagai serbuk terlarut).
9. Pelarutan gas (seperti hidrogen) kedalam logam cair pada keadaan bertekanan, yang kemudian untuk melepaskan gas yang diatur saat pembekuan berlangsung (untuk logam Cu, Ni, Al).

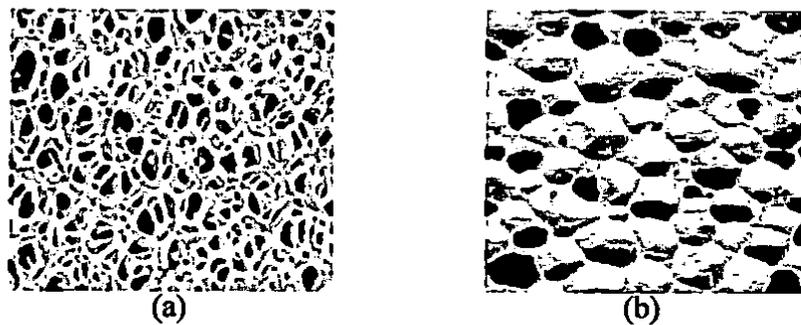


Gambar 2.3 Kisaran ukuran sel dan densitas relatif dengan metode yang berbeda (Wadley,2002)

Dari 9 proses tersebut hanya 5 proses yang teratas yang digunakan untuk produksi komersial. Gambar 2.3 menerangkan secara ringkas kisaran dari rentang ukuran sel, tipe sel (terbuka atau tertutup) dan densitas relatif yang dapat dibuat dengan metode-metode di atas.

2.2.4 Klasifikasi *Metal Foam*

Dilihat dari struktur porinya, logam busa ini memiliki dua jenis yaitu *Closed-Cell foam* dan *Open-Cell foam*. *Closed-Cell foam* adalah *cellular material* yang tiap cell-nya tertutup dengan lebar tiap cell-nya 3 mm. Sedangkan *Open-Cell foam* adalah *cellular material* yang tiap cell-nya terhubung dengan lebar cell-nya sekitar 5 mm. Jenis-jenis dari logam busa dapat diilustrasikan pada gambar dibawah.



Gambar 2.4 Jenis-jenis *metal foam* : (a) *Open-Cell foam*; (b) *Closed-Cell foam*, (Asbhy, 2000).



Gambar 2.5 Mikrograf (a) busa sel tertutup dan (b) busa sel terbuka, atau lebih tepatnya, logam seluler (Zhou,2006).

Busa logam bersel terbuka/*Open-Cell Foam* memiliki berbagai aplikasi termasuk penukar panas (elektronik pendingin kompak, tangki cryogen, penukar panas PCM), penyerapan energi, difusi aliran dan optik ringan. Karena tingginya

biaya bahan umumnya digunakan dalam teknologi canggih, kedirgantaraan, dan manufaktur. Untuk *metal foam* bersel terbuka skala yang sangat halus, terdiri dari sel-sel yang lebih kecil sedikit terlihat dengan mata telanjang, yang digunakan sebagai filter suhu tinggi dalam industri kimia. *Metal foam* digunakan dalam bidang *compact heat exchanger* untuk meningkatkan perpindahan panas dengan penurunan tekanan (Topin.F, dkk 2006, Banhart.J 2011, De Groot.C.T, dkk 2009). Namun, penggunaannya memungkinkan pengurangan substansial dalam ukuran fisik dari penukar panas, serta pengurangan pada biaya fabrikasi. Untuk model bahan-bahan ini, sebagian besar menggunakan struktur ideal dan periodik atau sifat makroskopik rata-rata.

2.2.5 Pembuatan Aluminium Foam

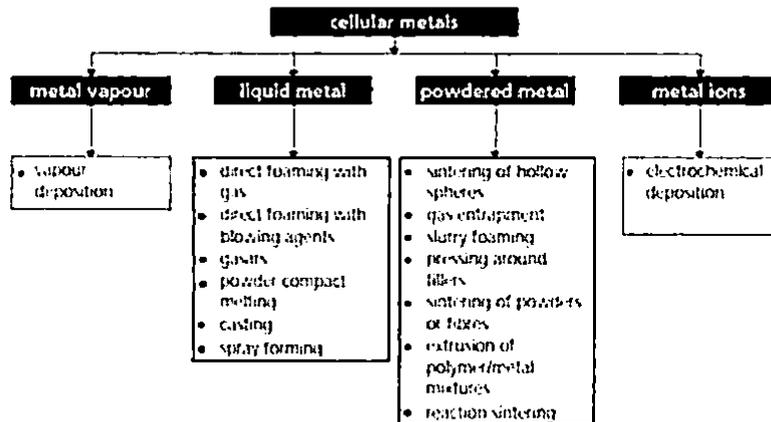
Saat ini ada dua metode utama untuk menghasilkan *metal foam*. Pertama adalah metode *direct foaming* dimana gas diinjeksikan terus-menerus dari luar ke dalam logam cair atau memasukkan *foaming agent* (agen pengembang) yang dapat membentuk gelembung gas untuk membuat *foam* (foaming), (Gergely & TW.Clyne,2000). Kemudian yang kedua yaitu metode *indirect foaming* yaitu metode pembuatan metal foam dengan cara pembuatan *solid precursor* yang terdiri dari matriks logam aluminium dan partikel *foaming agent* yang terdispersi merata (F. Baumgärtner dkk, 2000:168–174). Seperti pembuatan *aluminium foam* yang sering kali menggunakan hidrida dari unsur transisi seperti serbuk titanium atau zirkonium hidrida bubuk yang juga banyak digunakan sebagai serbuk (F. von Zeppelin dkk,2003:2293–2300). Ketika dipanaskan di atas suhu leleh *solid precursor* akan mengembang akibat adanya pelepasan gas dari *precursor* sehingga membentuk *foam*.

Tabel 2.4 Klasifikasi rute pembuatan *Aluminium foam*, *direct* dan *indirect foaming* (Matijasevic, 2006).

direct foaming	indirect foaming
melt alloy	prepare foamable precursor
make alloy foamable	remelt precursor
create gas bubbles	create foam
collect foam	solidify foam
solidify foam	

manufacturers (products)	Cymat, Canada (<i>SAF</i>) Foamtech, Korea (<i>Lazom</i>) Hume Kleinschneiders (HKB), Austria (<i>Metcomb</i>) Shuiko-Wae, Japan (<i>Alporas</i>) (Distributor: Gleich, Germany)	manufacturers	alm, Germany (<i>AFS</i>) Alulight, Austria (<i>alulight</i>) Gleich-JWE, Germany Schwik, Germany
-----------------------------	---	---------------	--

Metode klasifikasi lainnya dalam pembuatan *aluminium foam*, dibedakan menjadi 4 bagian yaitu sebagai berikut:



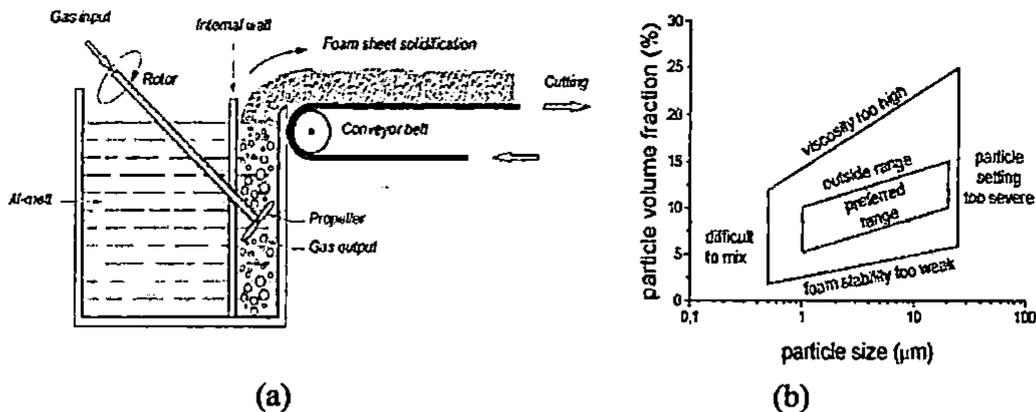
Gambar 2.6 Berbagai macam metode untuk membuat *metal foam* (Banhart, J, 2001).

2.2.6 Proses Pembuatan *Metal Foam* dengan *Liquid State* (Melt Route).

Yaitu proses pembuatan struktur *metal foam* dari logam cair. Logam cair diolah menjadi bahan berpori (foam) baik dengan metode berbusa langsung (direct foaming) atau menggunakan metode tidak langsung (indirect foaming) melalui *polymer foam* atau dengan *casting* logam cair dengan menggunakan bahan pengisi kemudian dilakukan peleburan secara bersama-sama.

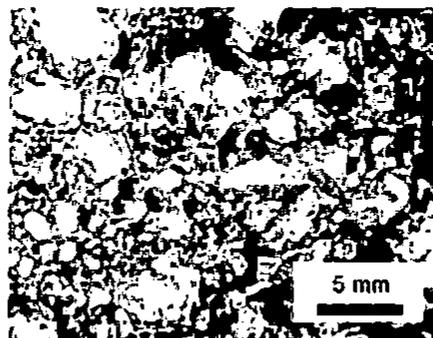
2.2.6.1 *Foaming Melts* dengan Injeksi Gas (Cymat, Alcan)

Cara pertama membentuk *aluminium foam* saat ini sedang dimanfaatkan oleh perusahaan Alcan Aluminium di Norwegia dan oleh perusahaan Cymat Aluminium di Kanada, namun proses tersebut dipatenkan oleh perusahaan Alcan, (P. Åsholt, 1997). Metode *direct foaming* ini dengan cara menyuntikkan gas ke dalam logam cair.



Gambar 2.7 (a) Leburan *foam* dengan Gas Injeksi (P. Åsholt, 1999).
(b) Ukuran bubuk penyetabil (O. Prakash dkk, 1995).

Proses tersebut seperti Gambar 2.7.a. Ini mencakup penambahan SiC atau Al_2O_3 (10% sampai 15%) ke dalam logam yang mencair untuk meningkatkan viskositasnya. Setelah itu gas (udara, nitrogen atau argon) disuntikkan ke dalam lelehan menggunakan impeller yang berputar. Kemudian *foam* mengembang, kemudian memisah dari permukaan yang mencair. Lembaran *foam* berukuran besar (misal 0,1 x 1 x 10 m) dapat diproduksi dengan ini cara. Fraksi volume partikel penguat biasanya berkisar dari 10% sampai 20% dan ukuran partikel rata-rata dari 5 sampai 20 μm . Pilihan ukuran partikel dilakukan secara empiris. Ukuran partikel terlalu tinggi atau terlalu rendah akan mengakibatkan beberapa masalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.b. Kepadatan busa aluminium yang dihasilkan berbagai cara ini 0,069-0,54 g/cm^3 . Produk teknologi ini adalah bahan lembaran berpori dengan porositas mulai dari 80% sampai 97%.

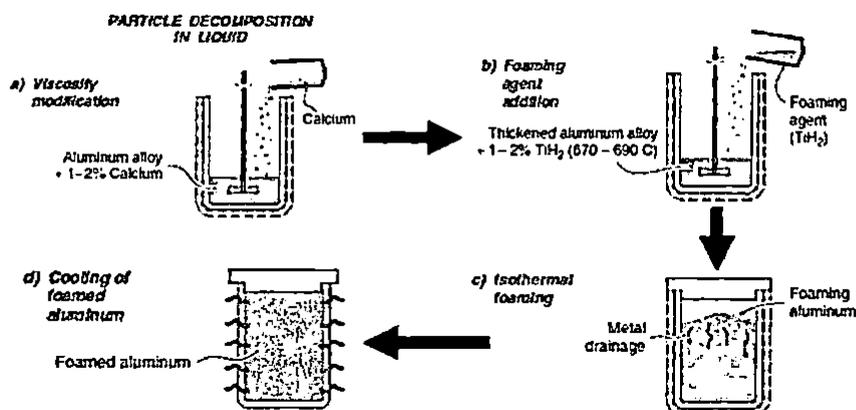


Gambar 2.8 Topologi *metal foam* dengan proses injeksi gas/Cymat/Alcan/, (Wadley, 2002).

Ukuran rata-rata pori dari 3 mm-25 mm, dan ketebalan dinding 50-85 μm . Ukuran sel rata-rata berbanding terbalik dengan baik dengan rata-rata ketebalan dinding sel dan besar densitas dapat dipengaruhi dari aliran gas, kecepatan *impeller* atau *nozzle* frekuensi getaran, dan parameter lainnya. Pada Gambar 2.8 menunjukkan Topologi *metal foam* dengan proses injeksi gas.

2.2.6.2 *Foaming Melts* dengan Zat Pengembang (Alporas).

Cara kedua untuk jenis *melt route/liquid metal direct foaming* adalah dengan menambahkan zat pengembang (blowing agent) berbentuk serbuk namun tidak menyuntikkan gas ke dalamnya (Banhart, 2000). *Blowing agent* terurai di bawah pengaruh panas dan mengeluarkan gas yang kemudian mendorong proses pembentukan *foam*.

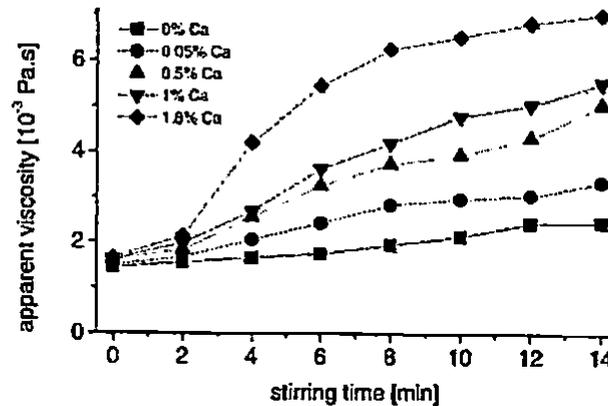


Gambar 2.9 Proses *melt route* dengan zat pengembang/*blowing agent* (Asbhy, 2000).

Kebanyakan *foaming agent* menggunakan titanium hidrida (TiH_2). Prosesnya dimulai dengan terurainya TiH_2 menjadi Ti dan $\text{H}_2(\text{gas})$ ketika dipanaskan lebih dari 465°C. Dengan menambahkan partikel titanium hidrida ke lelehan aluminium, gas hidrogen dengan cepat akan menciptakan gelembung yang dapat menyebabkan terbentuknya *closed cell foam*.

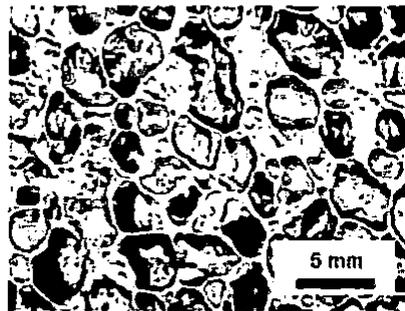
Shinko Wire.Co, Amagasaki (Jepang) telah memproduksi *foam* dengan cara ini sejak tahun 1986 dengan volume produksi, dilaporkan sampai dengan 1000 kg *foam* per hari. Langkah pertama sekitar 1,5wt% logam kalsium ditambahkan ke aluminium meleleh pada 670-690°C. Lelehan diaduk selama beberapa menit selama viskositasnya terus meningkat dengan faktor hingga 5

karena pembentukan kalsium oksida (CaO), oksida kalsium aluminium (CaAl_2O_4) atau bahkan mungkin Al_4Ca *intermetallics* yang mengentalkan cairan logam. Gambar 2.10 menunjukkan efek pengadukan pada viskositas aluminium meleleh dengan berbagai penambahan kalsium, (Maddock, 1998).



Gambar 2.10 Nilai viskositas tergantung dari waktu pengadukan (L.Maddock, 1998).

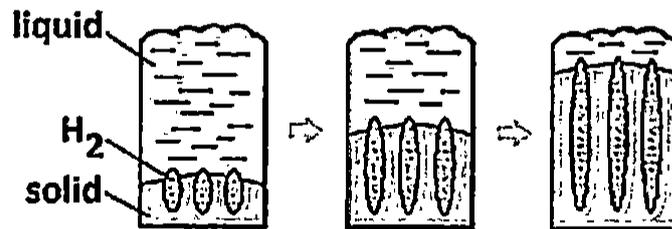
Setelah viskositas telah mencapai nilai yang diinginkan, titanium hidrida (TiH_2) ditambahkan (biasanya 1,6 wt% dengan diameter 5-20 μm) yang berfungsi sebagai *blowing agent* dengan melepaskan gas hidrogen dalam cairan kental panas. Begitu tersebar dan mencair, pengaduk ditarik, dan busa membentuk di atas campuran yang meleleh tersebut. Pengendalian proses ini dicapai dengan menyesuaikan *overpressure* tersebut, suhu dan waktu. Dibutuhkan waktu biasanya, sekitar sepuluh menit untuk benar-benar hidrida titanium terurai. Ketika *foaming* selesai lelehan didinginkan sampai memantapkan *foam* sehingga hidrogen dan gelembung menyatu atau runtuh. *Alporas foam* memiliki sel tertutup (*Closed-Cell Foam*).



Gambar 2.11 Topologi *metal foam* dengan proses *blowing agent* (Alporas), Wadley (2002).

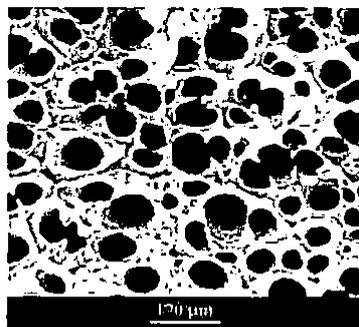
2.2.6.3 *Solid-Gas Eutectic Solidification (Gasars)*

Gas yang diperoleh pada proses ini rute dikontrol suhu sistem eutektik, Shapovalov (1993). Pertama, logam dilebur di bawah tekanan tinggi di atmosfer hidrogen, selanjutnya dengan mendinginkan campuran, sistem ini mengalami transisi eutektik. Sebagian suhu terus diturunkan, logam secara bertahap membeku dan hidrogen di dekat tempat pembekuan membentuk gelembung.



Gambar 2.12 Pertumbuhan pori di gas, (Anna M.S, 2012)

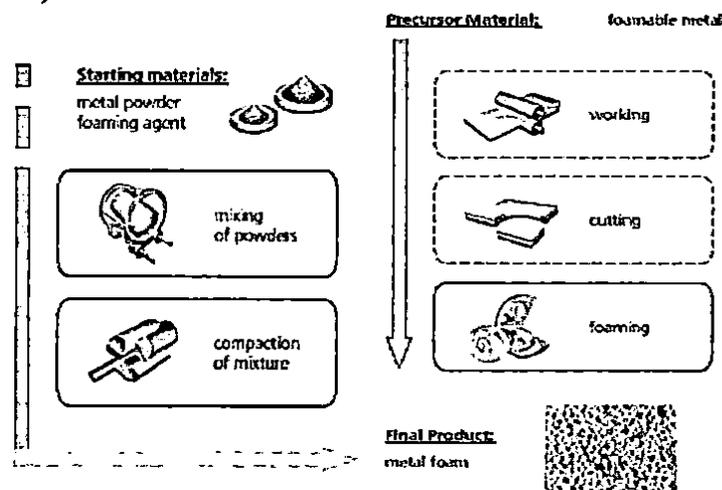
Gas dapat dibuat dari nikel, tembaga, magnesium, aluminium, baja, kobalt, kromium dan lain-lain. Teknik produksi dari jenis padatan seluler telah dan masih terus dikembangkan, karena pori-pori yang tidak merata dan bahan mempengaruhi sering tidak homogen. Umumnya, sebagian besar pori-pori memanjang yang berorientasi ke terbentuknya arah pembekuan. Diameter pori berkisar dari 10 μm sampai 10 mm, pori panjang dari 100 μm sampai 300 mm, dan porositas dari 5% hingga 75%. Distribusi ukuran pori-pori adalah non-homogen karena pertumbuhan bersamaan antara pori-pori kecil dan besar pada saat peleburan. Pori-pori berbentuk kerucut atau bahkan bergelombang. Untuk bahan berpori yang dibentuk oleh solid-gas pemadatan eutektik, kata "gasar" diciptakan dan memiliki arti "gas-diperkuat" dalam akronim Rusia.



Gambar 2.13 Topologi *metal foam* pada proses *Solid-Gas Eutectic Solidification* (Gasars), Gergely (2000).

2.2.6.4 Teknik *Powder Compact Melting*

Metal foam dapat diproduksi dengan metode yang dikembangkan di *Fraunhofer Institute* di Bremen, Jerman (Baumgärtner, 2000). Metode ini sering disebut "bubuk metalurgi" karena bahan awal berupa serbuk logam tetapi *foaming* yang sebenarnya terjadi dalam keadaan cair. Proses produksi dimulai dengan pencampuran serbuk logam, serbuk logam dasar, *alloy powder* atau bubuk logam campuran dicampur dengan *blowing agent*, setelah itu campuran dipadatkan untuk menghasilkan bentuk padat, produk setengah jadi (lihat proses di Gambar 2.14).



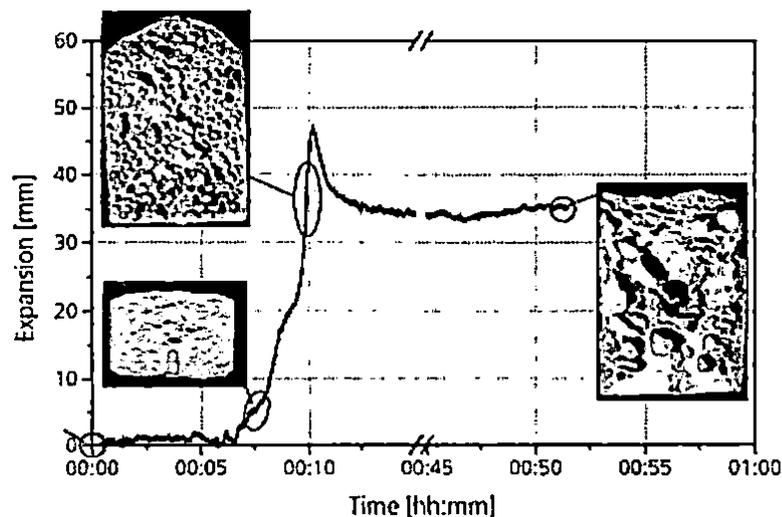
Gambar 2.14 Proses *Powder Compact Melting* (Banhart, 1995).

Pada prinsipnya, pemadatan dapat dilakukan dengan memastikan *blowing agent* dapat tertanam ke dalam matriks logam tanpa masing-masing porositas terbuka secara residual. Contoh metode pemadatan seperti panas uniaksial atau isostatik kompresi, batang ekstrusi atau *powder extrude* (Baumeister & Schrader, 1991). Metode kompaksi yang dipilih tergantung pada bentuk yang diperlukan dari bahan prekursor. Namun, ekstrusi menjadi metode yang paling ekonomis saat ini dan cara yang paling diminati (Baumgärtner, 2000). Profil persegi panjang dengan variasi *cross-sections* biasanya terbuat dari lembaran tipis yang dapat diperoleh dengan cara *di-rolling*.

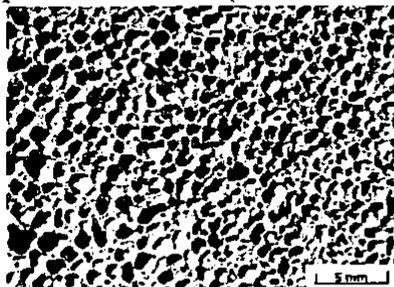
Pembuatan prekursor harus dilakukan sangat hati-hati karena setiap sisa porositas atau cacat lainnya akan menyebabkan hasil yang buruk pada proses lebih lanjut. Perlakuan panas pada suhu mendekati titik leleh pada bahan matriks

merupakan langkah selanjutnya. *Blowing agent* yang homogen terdistribusi dalam matriks logam padat, akan terurai. Gas akan keluar kemudian akan memaksa prekursor menekan bahan untuk memperluas area, sehingga membentuk struktur porositas yang tinggi. Waktu yang dibutuhkan untuk ekspansi penuh tergantung pada suhu dan ukuran prekursor dan berkisar dari beberapa detik hingga beberapa menit. Gambar 2.15 menunjukkan kurva perluasan aluminium/TiH₂ *compact powder*. *Volume foam* diperluas dengan ditampilkan sebagai fungsi dari waktu bersama dengan beberapa morfologi dalam berbagai tahap ekspansi.

Ekspansi maksimum ditunjukkan dengan morfologi *foam* yang sesuai dan cukup seragam, setelah *foam* mengalami penurunan. Tingkat ekspansi maksimum, oleh karena itu densitas busa logam padat, dapat dikontrol dengan menyesuaikan *blowing agent* dan beberapa parameter *foaming* lainnya, seperti tingkat suhu dan pemanasan.



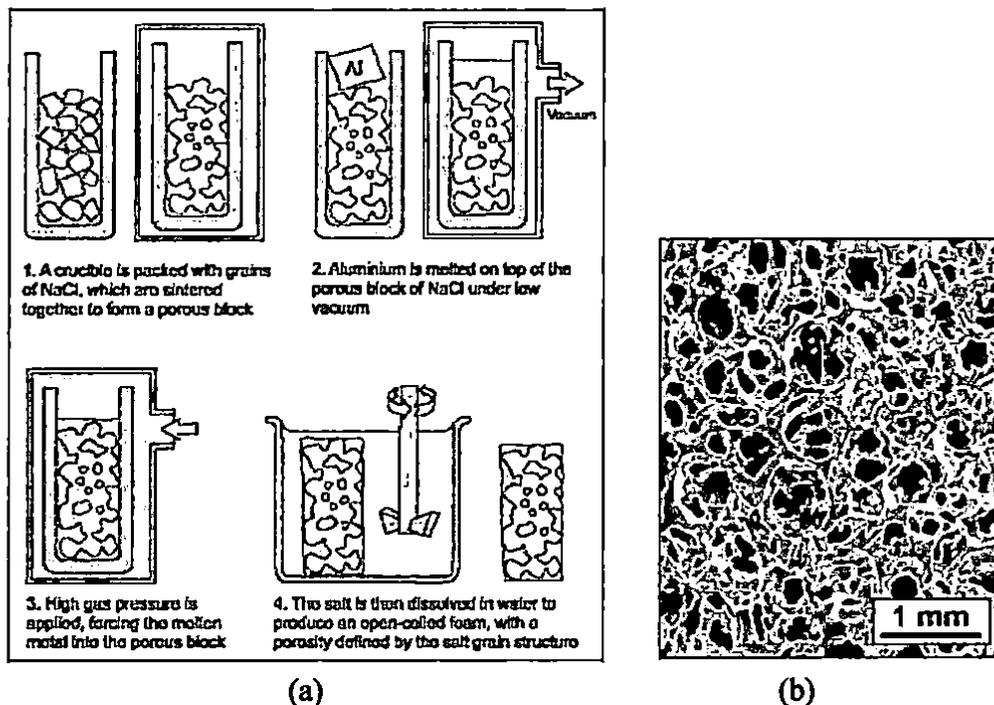
Gambar 2.15 Karakteristik perluasan aluminium+TiH₂ secara kompaksi ketika *foaming* pada suhu 750°C (Duarte dkk, 1999).



Gambar 2.16 Penampang *cross-sections foam* dengan teknik *powder compact melting* lebih mendominasi (Banhart J dkk, 1995).

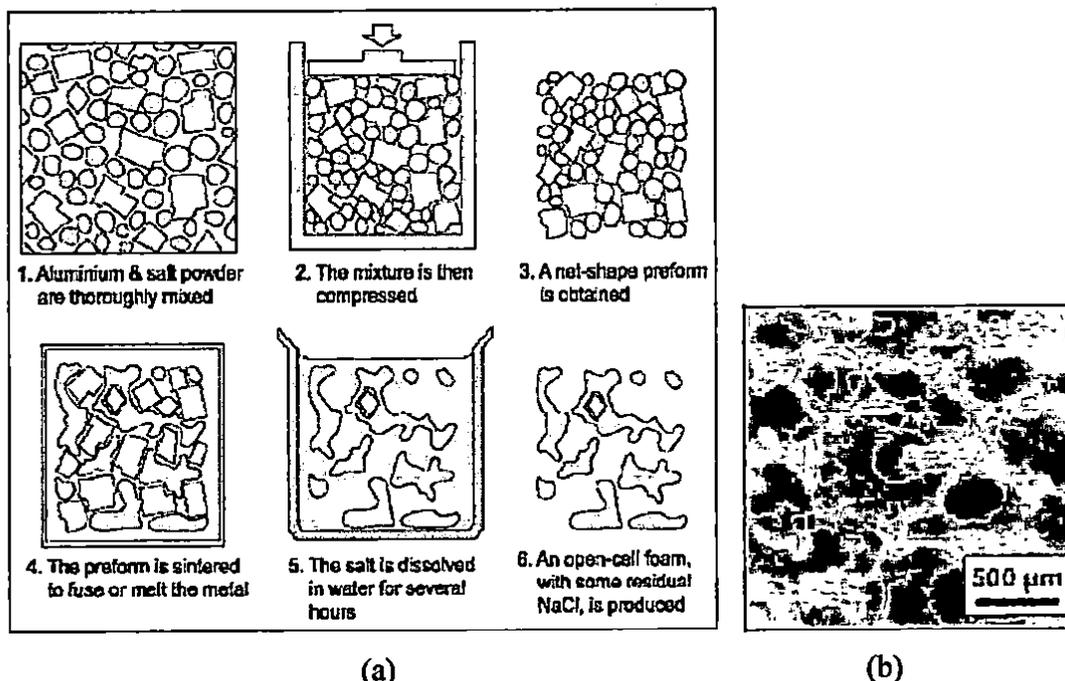
2.2.6.5 Infiltrasi pada pola yang dapat dibuang (Investment Casting)

Menurut Curran (2003) variasi proses *casting*, terutama untuk pembuatan *foam* dengan sel terbuka, didasarkan pada cetakan yang dapat dibuang (*disposable*), diperlihatkan pada Gambar 2.17. Cetakan yang lazim digunakan adalah garam (NaCl) yang disinter pada udara atmosfer selama beberapa jam agar terjadi panggabungan butir. Kemudian aluminium cair dituangkan agar terjadi infiltrasi kedalam pori cetakan. Setelah aluminium membeku, cetakan garam kemudian dilarutkan kedalam air sehingga terbentuklah *foam* dengan sel yang terbuka, dengan ukuran sel 3-4 mm. Hal yang perlu diperhatikan dalam proses infiltrasi adalah pemanasan awal cetakan, sehingga dapat mengurangi kecenderungan aluminium cair untuk membeku terlalu cepat sebelum memenuhi semua rongga cetakan. Diperlukan juga kombinasi antara keadaan vakum pada cetakan sebelum dituang dan ketika tekanan tinggi, yang digunakan selama proses infiltrasi. Hal ini digunakan untuk mendapatkan struktur sel yang lebih halus. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.17, *foam* yang dihasilkan dapat mempunyai ukuran sel sekecil 400 mikro meter dengan ρ^*/ρ sebesar 0,2-0,3.



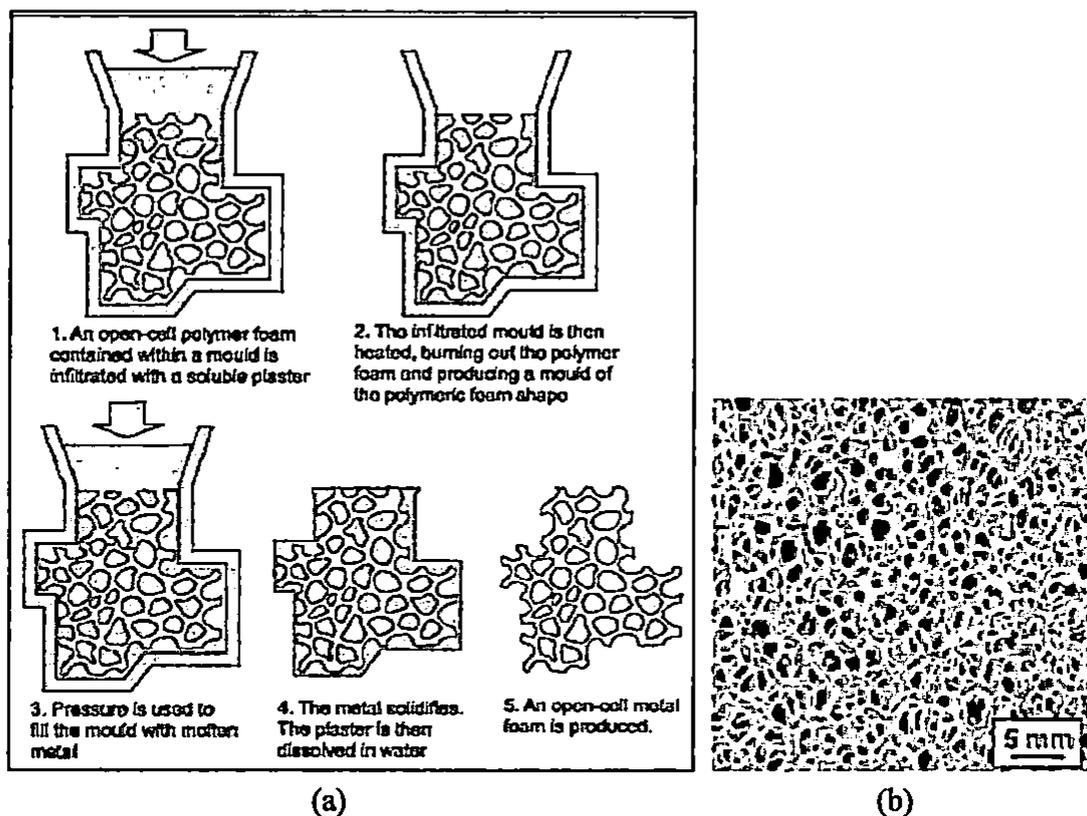
Gambar 2.17 (a) Rute proses *investment casting* dengan penggunaan pola garam; (b) penampang melintang aluminium hasil proses (Curran, 2003).

Proses infiltrasi tidak memerlukan serbuk atau serat logam yang mahal. Bentuk produk juga dapat diatur secara seksama dengan pengaturan cetakan, serta dapat memiliki keseragaman struktur yang tinggi. Proses ini relatif kompleks, mensyaratkan proses sintering dan pelarutan cetakan. Jenis ukuran sel terbesar dan terkecil dapat diatur dengan menentukan proses infiltrasi dari pola cetakan yang rumit serta teknik untuk melarutkannya. Jenis proses lainnya diperlihatkan pada Gambar 2.18.a, serbuk logam dicampur dengan serbuk garam, lalu dikompaksi sehingga didapatkan blok yang padat. Kemudian blok tersebut disinter pada temperatur diantara titik leleh aluminium dan garam. Setelah itu, proses ini diikuti dengan pelarutan garam sehingga didapatkan *foam* dengan $\rho^*/\rho > 0,2$. Akan tetapi, proses ini tidak digunakan untuk penggunaan yang luas. Proses ini cukup rumit, dan relatif mahal karena penggunaan serbuk aluminium. Hasil proses ini menghasilkan sambungan antara garam yang lebih sedikit, sehingga menghasilkan produk yang lebih padat, struktur pori yang kecil dan seringkali meninggalkan sisa NaCl.



Gambar 2.18 (a) Rute proses dengan penggabungan serbuk aluminium dengan serbuk garam, dilanjutkan dengan pelarutan; (b) Penampang melintang hasil rute proses (Curran, 2003).

Pada proses yang lain, digunakan partikel *polystyrene* yang dicampur dengan resin, dan kemudian dibakar untuk menghasilkan cetakan resin yang berlapis (*coating*). Aluminium cair lalu diinfiltrasikan dengan bantuan tekanan sebesar 460 MPa selama 0,2 detik, sebelum polimer terdekomposisi. *Polystyrene* kemudian terbakar habis sehingga dihasilkan *foam* dengan sel terbuka berukuran sel 1-3 mm dan ρ^*/ρ sebesar 0,14-0,27. Proses ini relatif mahal sehingga digunakan untuk sampel yang terbatas. Proses lain yang relatif lebih mudah adalah dengan menggunakan *foam* polymer bersel terbuka sebagai pola untuk memproduksi *aluminium foam* dengan 2 tahapan proses *investment casting*. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.19.a, polymer (*polyurethane*) diinfiltrasi dengan plester, lalu dibakar untuk menghilangkan polimer. Cetakan yang tersisa lalu diisi oleh aluminium cair, juga seringkali dibantu dengan kombinasi antara keadaan vakum dan tekanan eksternal. Pada akhir proses, plester kemudian dilarutkan.

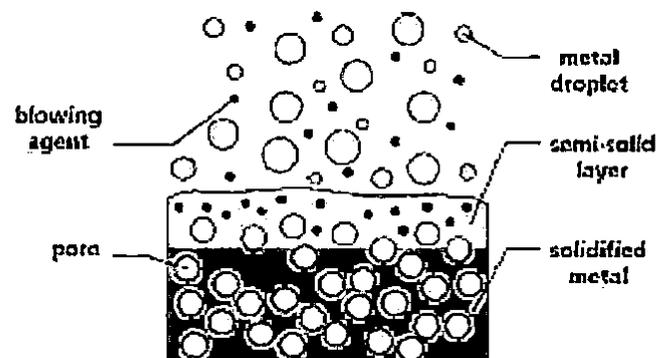


Gambar 2.19 (a) Rute proses dengan *template polymer*, *Duocell™*; (b) Penampang melintang *aluminium foam Duocell™* (Curran, 2003).

Foam dapat diproduksi untuk berbagai macam logam dan paduannya, dengan ρ^*/ρ sebesar 0,03. Proses ini tentunya mempunyai keuntungan dan kerugian dalam segi proses jika dibandingkan dengan penggunaan pola garam. Variasi porositas dapat diatur dengan penggunaan cetakan polimer. Duocel™ merupakan salah satu produk yang diproses dengan metode ini. Aplikasi penggunaannya antara lain sebagai *heat exchanger*, elektrode berpori, dan filter kimia.

2.2.6.6 *Spray forming (Osprey process)*

Pembentukan *foam* dengan penyemprotan adalah metode yang memungkinkan untuk memproses berbagai logam yang berbeda dan logam paduan. Lelehan logam secara kontinyu teratomisasi dan *spray* secara cepat menempel ke tetesan logam kecil yang dibuat. Tetesan dikumpulkan pada substrat dimana mereka tumbuh menjadi deposit padat dalam bentuk tertentu, misalnya *billet*, *sheet* atau tabung, asalkan proses parameter yang dipilih tepat. Karakteristik bahan *spray* yang terbentuk yaitu termasuk oksida rendah, ukuran butir halus atau kandungan tinggi dari logam stabil fasa paduan (Lavernia, 1998). Kombinasi sifat biasanya tidak dapat diperoleh dengan metode pengecoran konvensional.



Gambar 2.20 Pembuatan *Metal Foam* dengan *Spray Forming* (Kelley P, 1992)

Salah satu fitur utama yang membuat proses *spray* menarik yaitu kemungkinan untuk memodifikasi sifat deposit dengan menyuntikkan *powder* seperti oksida, karbida atau logam murni ke dalam *spray* dan memungkinkan mereka bereaksi dengan atau dibasahi oleh tetesan logam cair dan dimasukkan ke dalam logam seperti yang diendapkan pada substrat. Dengan cara ini MMC dapat dibuat jika serbuk ditambahkan dengan karbida atau oksida. Jika *powder*

disuntikkan adalah zat yang terurai pada kontak dengan logam cair dan melepaskan sejumlah besar gas, mereka dapat menghasilkan pori-pori di deposit (lihat keterangan schematical pada Gambar 2.20). Efek ini biasanya tidak diinginkan namun dapat digunakan untuk membuat bahan logam berpori. Kelley dkk (1993) telah menyelidiki pembentukan porositas di CuSn_6 paduan dengan menyuntikkan BaCO_3 powder. Banhart dkk (1998) telah menciptakan baja berpori dengan menyuntikkan silikon oksida atau oksida mangan kedalam *spray* baja karbon, sehingga menciptakan dalam jumlah besar karbon monoksida di area deposisi dalam reaksi kimia jenis $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$. Porositas yang dicapai dengan cara ini dapat berkisar 60% tapi pori morfologi masih kurang homogen.

2.2.7 Solid State Processing of Cellular Metals

Logam padat dalam bentuk bubuk dapat digunakan untuk membuat struktur *metal foam*. Serbuk padat dimasukkan kemudian dilanjutkan tahapan melalui *sintering treatment* atau operasi *solid state* lainnya.

Ini sangat penting untuk morfologi struktur *foam* yang dihasilkan ketika cairan tegangan permukaan tetap dan menyebabkan kecenderungan ke arah pembentukan pori-pori tertutup (*closed-cell*), sedangkan produk berpori disinter menunjukkan morfologi terbuka khas yang terisolasi, kurang lebih partikel berbentuk bola dengan metode sinter. Saat ini, hanya sintering besar, bubuk atau serat adalah cara termudah untuk mendapatkan logam berpori dan rute produksi digunakan pada perusahaan/industri manufaktur. Teknologi yang lebih canggih memungkinkan membuat porositas gas yang terperangkap dalam *powder compact*, dengan menggunakan *pace-holding filler* atau bola berongga (*hollow spheres*) atau terakhir dengan *foaming metal powder slurries*.

2.2.8 Material

2.2.8.1 Aluminium

Logam aluminium merupakan unsur ketiga terbanyak di dunia dan memiliki peranan yang sangat penting dalam aplikasi dibidang industri dan otomotif. Secara harfiah aluminium memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan logam lainnya. Aluminium merupakan unsur kimia

golongan IIIA dalam sistem periodik unsur-unsur. Aluminium mempunyai nomor atom 13, berat atom 26,9815 g/mol, struktur kristal FCC, temperatur lebur 660°C, temperatur didih 2467°C, modulus elastisitas 71 GPa, *yield strength* 25 MPa, *poisson ratio* 0,35, *hardness* 15 VHN, kekuatan luluh 25 MPa, konduktivitas termal 237 W/m.K, kapasitas panas 917 J/Kg.°C, ketahanan korosi yang sangat baik, kemampuan mekanik dan pembentukan yang baik. Karakteristik Logam Aluminium terdapat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Karakteristik Logam Aluminium (ASM Handbook 9th, 1984)

Sifat	Nilai
Komposisi	Al
Nomor Atom	13
Berat Atom (G/Mol)	27
Diameter Atom (Nm)	0,268
Densitas	2,7
Struktur Kristal	FCC
Temperatur Lebur (°C)	660
Temperatur Didih(°C)	2467
<i>Modulus Elastisitas</i> (Gpa)	71
<i>Yield Strength</i> (Mpa)	25
<i>Poisson Ratio</i>	0,35
<i>Hardness</i> (VHN)	12
Kekuatan Luluh (MPa)	25
Ketangguhan (MPam)	33
Konduktivitas Panas (W/Mok)	237
Kapasitas Panas (J/Kg ⁰ C)	917
Ketahanan Terhadap Korosi	Sangat baik
<i>Machinability</i>	baik
<i>Formability</i>	baik

2.2.8.2 NaCl

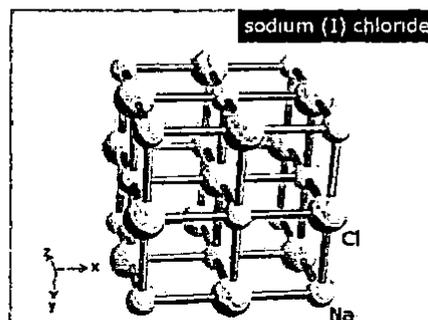
Sodium Chloride atau *Sodium Chloride* adalah senyawa anorganik, yang berarti senyawa tersebut tidak mengandung karbon dan hidrogen dalam satu molekul. Garam terbentuk dari atom bermuatan positif, yang disebut kation menarik atom bermuatan negatif yang dikenal sebagai anion. Atraksi ini dikenal sebagai ikatan ion, dan merupakan kunci dalam mempertahankan struktur kimia

garam. Salah satu dari garam-garam yang paling penting di alam dan sistem biologis adalah natrium klorida.



Formation of Sodium Chloride

Natrium klorida terbentuk ketika atom natrium berinteraksi dengan atom klorin. Ketika ini terjadi, natrium akan menyumbangkan elektron (yang merupakan partikel bermuatan negatif) klorin. Hal ini membuat natrium sedikit positif, dan klorin pada gilirannya menjadi sedikit negatif. Jadi ion natrium akan menarik ion klorida dan membentuk ikatan ion. Hasilnya adalah garam mengkristal yang memiliki sifat yang berbeda dari dua elemen induk (natrium dan klorin). Rumus kimia untuk sodium klorida adalah NaCl, yang berarti bahwa untuk setiap atom natrium, ada tepat satu atom klorida.



Gambar 2.21 Struktur *solid state* NaCl,

sumber: http://www.webelements.com/compounds/sodium/sodium_chloride.html

Tabel 2.6 Karakteristik NaCl,

sumber: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/519712/salt-NaCl>

Karakteristik NaCl	
Nama Senyawa	Sodium Chloride
Rumus Kimia	NaCl
Berat zat	58,443
Warna	Tanpa warna atau ketika murni; bercak-bercak berwarna (e.g., biru, abu-abu) ketika tidak murni
Lustre	seperti kaca
Bentuk Fisik	Tranparan

Kekerasan	2 ^{1/2}
Densitas	2.17 g/cm ³
Titik Lebur	801°C (1.474 F)
Titik Didih	1.465°C (2.669 F)
Daya Larut	Air (s); Gliserol (s);Alkohol (ss); <i>hydrochloric acid</i> (i);
	* (s) = <i>Soluble</i> (larut); (ss) = <i>slightly soluble</i> (sedikit larut); (i) = <i>insoluble</i> (tidak larut)

2.2.9 Metode Karakteristik *Aluminium Foam*

2.2.9.1 Pengukuran Porositas

Dari berbagai macam metode dalam pembuatan *aluminium foam* dapat diketahui nilai kisaran porositasnya, terlihat pada Tabel 2.3. Proses menentukan nilai porositas yaitu dengan cara perhitungan dengan mencari massa spesimen, volume spesimen dengan menggunakan gelas ukur. Hal terpenting yaitu mencari nilai densitas spesimen. Menurut Banhart.J (2001) densitas keseluruhan dari *metal foam* dapat ditentukan dengan berat dan mengukur volumenya menggunakan prinsip Archimedes, yaitu dengan mengukur daya apung di cairan.

Untuk mengetahui berapa prosentase porositas yg terjadi pada spesimen tersebut dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Porositas (\%)} = \frac{\rho_{Al} - \rho_{foam}}{\rho_{Al}} \times 100$$

Dimana : ρ_{Al} = densitas Aluminium (g/cm³)

ρ_{foam} = densitas *Aluminium foam* (g/cm³)

Atau menggunakan rumus yang lain, seperti dibawah ini :

$$\text{Porositas} = \left\{ 1 - \left(\frac{\text{Density}}{\rho_{Al}} \right) \right\} \times 100\%$$

2.2.9.2 *Mechanical Testing*

Sifat elastik dari beberapa *metal foam* komersial saat ini telah dipelajari secara luas. Secara umum, sifat tersebut memperlihatkan kesamaan kelakuan pada deformasi tarik dan tekan, terutama untuk regangan yang kecil. Sifat utama yang diinginkan dari *metal foam* adalah kemampuan untuk menyerap energi tekan plastis pada jumlah yang besar, kemudian mentransmisikan beban yang rendah

secara konstan. Oleh karena itu, saat ini deformasi tekan pada *metal foam* telah dipelajari secara mendalam dibandingkan dengan deformasi tarik. Evaluasi terhadap penentuan sifat tarik saat ini masih sulit untuk disimpulkan. Deformasi plastis pada pembebanan tarik, hanya memperlihatkan modus kegagalan dari *foam* saja.

Kekuatan luluh tarik pada *metal foam* biasanya sama atau lebih kecil daripada kekuatan luluh tekan. Semisal, beberapa penelitian menemukan bahwa kekuatan luluh tarik dan tekan dari *metal foam* AlporasTM, menunjukkan angka yang mirip.

Aluminium foam adalah bahan berpori isotropik dengan beberapa karakteristik yang luar biasa, yang membuat mereka sangat cocok untuk beberapa aplikasi. Karena kepadatan rendah antara $0,3 \text{ g/cm}^3$ dan $0,8 \text{ g/cm}^3$ sehingga busa dapat mengapung di air (dalam kasus porositas tertutup). *Aluminium foam* memiliki sifat konduktivitas sedikit berkurang untuk panas dan listrik. Kekuatan lebih rendah daripada aluminium konvensional padat dengan adanya penurunan kepadatan. Busa stabil pada suhu sampai titik leleh. *Aluminium foam* tahan api dan tidak beracun. Kebanyakan teknologi produksi busa, sifat dapat bervariasi pada kisaran yang lebar untuk mengendalikan parameter produksi. Beberapa contoh sifat yang diberikan dalam Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Karakteristik *Aluminium Foam* (IFAM, 1999 and Brochure MEPURA Ranshofen)

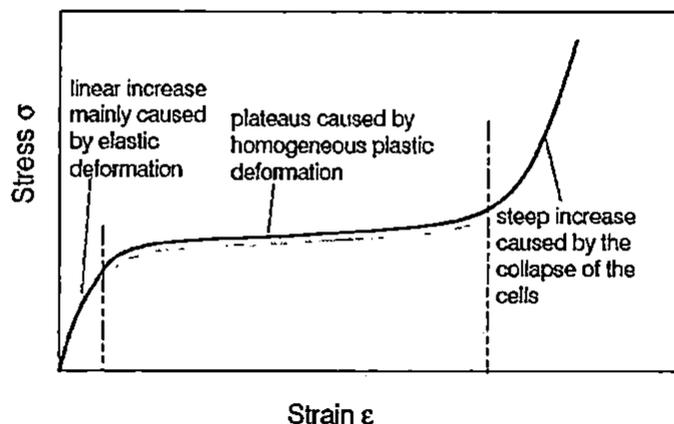
alloy	Al 99,5 dense	Al99,5	AlSi12	
foaming agent	-	TiH ₂	TiH ₂	
density g/cm ³	2,7	0,4	0,54	0,84
compression strength MPa	-	3	7	15
energy absorption at 30% compression MJ/m ³	-	0,72	2	4
kJ/kg	-	1,8	3,7	4,8
modulus of elasticity GPa	67	2,4	5	14
electrical conductivity m/(Ω mm ²)	34	2,1	n.a.	n.a.
thermal conductivity W/(mK)	235	12	13	24

Kebanyakan properti dari busa logam dapat diperkirakan atas dasar kepadatan relatif busa dan konstan untuk properti. Ini Properties utama dapat dihitung menurut sdengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Property Foam} = \text{Constant Property} \times \left(\frac{\rho_{\text{foam}}}{\rho_{\text{solid}}} \right)$$

2.2.9.3 Sifat mekanik

Karena busa struktur selular, metode dalam pengujian berbeda dibandingkan logam konvensional. Oleh karena itu metode pengujian konvensional tidak dapat digunakan, untuk contoh uji tarik. Tes dengan hasil yang paling signifikan adalah tes kompresi yang diberikan akibat diagram tegangan-regangan khas dengan pembagian menjadi tiga bagian. Perilaku ini adalah ditemukan khas untuk busa dengan kedua dinding sel terbuka atau tertutup.



Gambar 2.22 Kurva tegangan-regangan *aluminium foam* (uji tekan), (Kammer, 1999).

Karena busa struktur selular mereka berperilaku berbeda dalam pengujian bila dibandingkan dengan logam konvensional. Oleh karena itu metode pengujian konvensional tidak dapat digunakan, misalnya untuk pengujian tarik. Tes dengan hasil yang paling bermakna adalah tes kompresi yang memberikan akibatnya tekan diagram tegangan-regangan khas dengan pembagian menjadi tiga bagian. Perilaku ini ditemukan khas untuk busa dengan kedua dinding sel terbuka atau tertutup. Ini menunjukkan peningkatan linear stres (1) pada awal deformasi dan rezim dataran tinggi stres hampir konstan di tengah (2), yang diikuti oleh kenaikan tajam tegangan alir pada akhir (3).

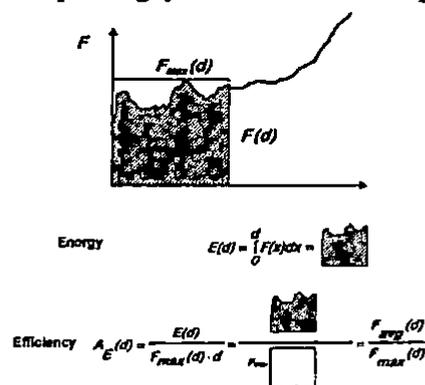
2.2.9.4 Sifat Thermal

Sifat thermal dari logam berpori menjadi lebih menarik apalagi dikombinasikan dengan sifat konduktifitas, permeabilitas dan besarnya luas area

untuk digunakan dalam berbagai aplikasi seperti alat penukar kalor, heat sink, heat pipes. Perpindahan panas dan konduksi dari logam berpori merupakan fenomena yang kompleks. Efisiensi dari perpindahan panas dipengaruhi oleh konduktifitas dari logam berpori, perpindahan panas antara logam berpori dan fluida yang digunakan, dan oleh penurunan tekanan di dalam saluran logam berpori tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar dari karakteristik tersebut dipengaruhi oleh parameter strukturnya (ukuran pori-pori dan distribusinya, porositas, konektifitas dari pori-pori dan kekasaran permukaan poripori), yang mana hal ini sulit untuk menentukannya secara menyeluruh. Oleh karena itu perkembangan dari riset di bidang ini masih sangat luas dan dapat menghasilkan alat bantu baru bagi perекayasa material.

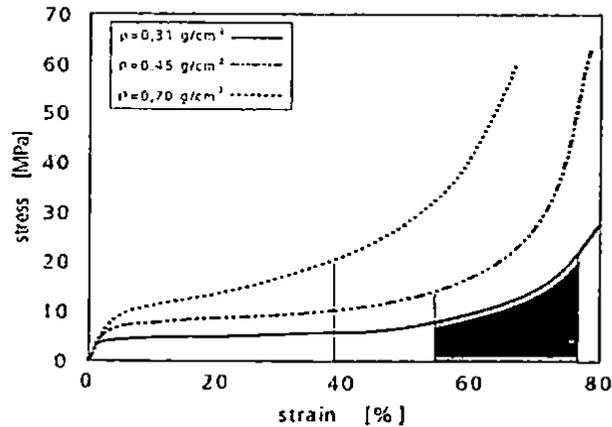
2.2.9.5 Energy Absorption

Penyerapan energi *metal foam* dapat ditentukan dengan melakukan pengujian tekan. Pada Gambar 2.23 menunjukkan kekuatan-kurva jarak kompresi untuk *metal foam*. Jumlah energi yang diserap adalah integral dari gaya tekan dengan jarak kompresi. Definisi efisiensi deformasi tersebut adalah hasil bagi antara energi yang diserap dan gaya maksimum serta panjang deformasi.



Gambar 2.23 Penyerapan energi dan perhitungan efisiensi (D.Rausch, dkk, 2006)

Komponen dapat diproduksi dengan *density foam* yang berbeda yang menghasilkan serapan energi yang berbeda pula (Gambar 2.24). Daerah yang diarsir di bawah merupakan kurva tegangan regangan yang menunjukkan jumlah yang sama dari energi yang diserap.

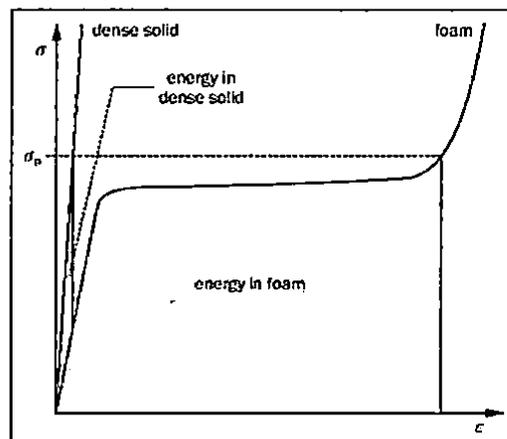


Gambar 2.24 Penyerapan energi dari *metal foam* dengan densitas yang berbeda (D.Rausch, dkk, 2006)

Energi yang diserap persatuan volume E_v dalam interval regangan tertentu adalah sama dengan daerah dibawah kurva tegangan-regangan dan dapat dinyatakan sebagai:

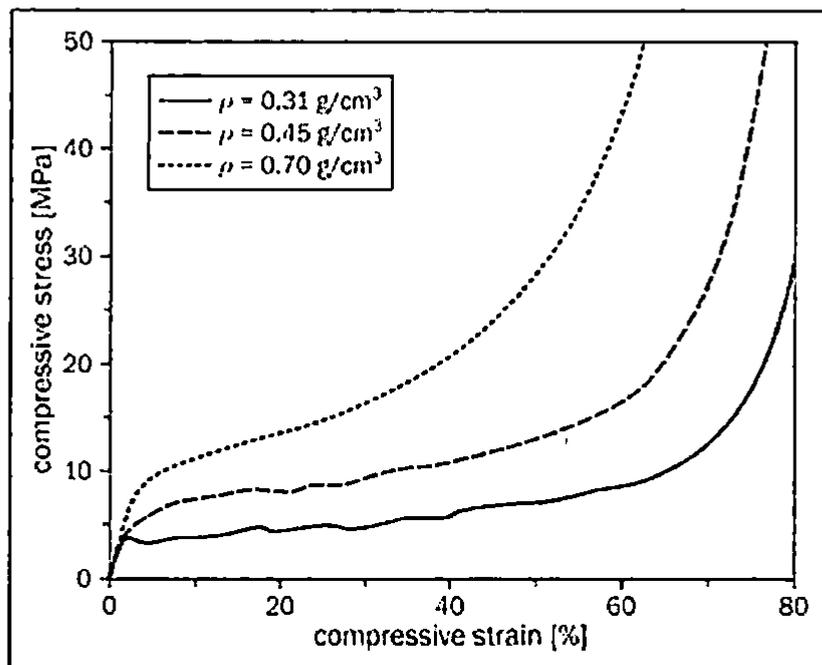
$$E_v = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma(\epsilon) d\epsilon$$

Perbandingan antara penyerapan energi dari elastis yang solid dan material berbuis sepenuhnya padat ditunjukkan pada Gambar 2.25 dalam bentuk diagram. *Foam* dapat menyerap lebih banyak energi pada tingkat tegangan puncak yang diberikan dalam bentuk *solid* (pada tingkat regangan padat akan menyerap lebih banyak energi tapi situasi ini tidak mewakili kondisi realistik). Karena kemampuan mereka untuk tetap menjaga tegangan puncak ketika menyerap energi kinetik. *Foam* secara umum adalah peredam energi yang sangat baik (Tingvall dkk, 2010).



Gambar 2.25 *Comparison energy absorption by foam and by a dense solid* (Tingvall, C. dkk, 2010).

Di sini, diasumsikan bahwa busa dekat-ideal menyerap energi yang diberikan pada tegangan minimum. Dalam Gambar 2.26 menunjukkan perilaku kompresi tiga busa berbagai kepadatan, fakta-fakta ini dijelaskan secara rinci. Daerah yang diarsir sesuai dengan jumlah yang sama energi E_v diserap oleh tiga busa. Margin kanan dari masing-masing daerah yang diarsir menandai kompresi yang diperlukan untuk menyerap sejumlah energi. Dalam kasus kepadatan terendah, kurva tegangan-regangan telah melewati daerah stres konstan sebelum energi E_v diserap. Oleh karena itu, stres mencapai nilai yang tinggi. Di sisi lain, busa kepadatan tertinggi hampir tidak menunjukkan daerah dataran tinggi dengan stres yang konstan dan juga memiliki tegangan maksimum tertinggi. Sebaliknya, untuk penyerapan energi E_v , busa kepadatan menengah sampai akhir daerah dataran tinggi. Oleh karena itu, penyerapan energi tertinggi ditunjukkan dengan puncak garis tegangan (stress) terendah.

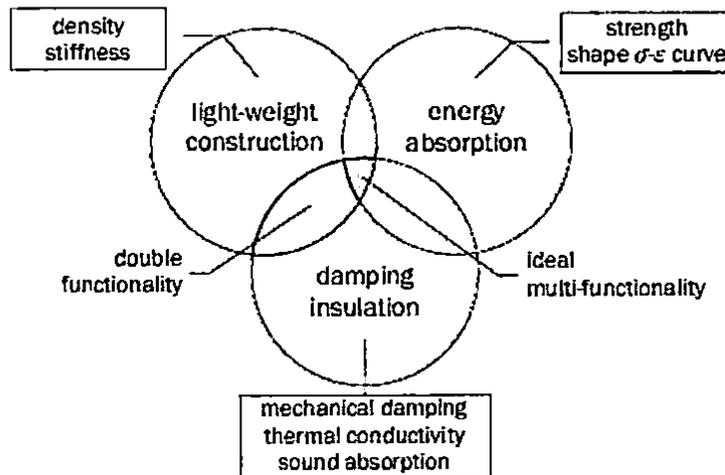


Gambar 2.26 Perbandingan tiga variasi densitas berbeda AlSi_2 membentuk area yang sama dalam menyerap energi E_v .

Dengan cara ini, untuk setiap energi dampak diberikan, busa dari kerapatan tertentu dapat ditentukan, menunjukkan kemungkinan tegangan maksimum terendah selama deformasi (Banhart. J, 1997).

2.2.10 Aplikasi dari *Aluminium Foam*

Penggunaan *aluminium foam* saat ini sangat banyak. Aluminium dapat menggantikan material yang lebih berat atau juga dapat menjadikan material yang sudah teraplikasi seperti aluminium. Dengan mempelajari proses tersebut, didapatkan beberapa konsep yang menjadi pertimbangan penerapan *aluminium foam* dalam beberapa hal seperti transportasi, industri dan yang lainnya.



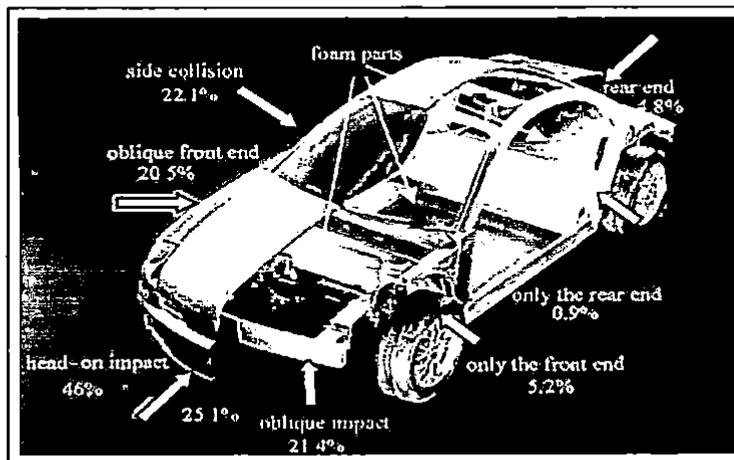
Gambar 2.27 Sifat dari *foam* yang digunakan dalam industri otomotif (Banhart, 2001).

Dari gambar 2.27 menjelaskan bahwa terdapat kotak yang berisi sifat dari *foam* yang dalam proses pembuatannya, berguna untuk salah satu dari tiga bidang aplikasi yang disajikan dalam lingkaran (Banhart, 2001). Konsep yang mendasari pertimbangan penerapan *aluminium foam* dalam desain sarana transportasi, industri dan yang lainnya didasarkan pada kombinasi unik dari sifatnya. Mempunyai kepadatan rendah ($0.3-1.0 \text{ g/cm}^3$), kemudian kemampuan penyerapan energi impact dan sifat isolasi Degischer, H.P (1997) & (Banhart,J, 2001). Dengan komposisi kimia dari bahan matriks, kepadatan dan struktur pori-pori *aluminium foam*, serta kemungkinan manfaat dari struktur komposit, seluruh spektrum kemungkinan aplikasi membuka (Tabel 2.8).

Tabel 2.8 Kemungkinan aplikasi busa aluminium dalam pembangunan sarana transportasi. (Grilec, dkk, 2011)

Application potentials for aluminium foam	
Weight reduction	Casting core element Floating body element Constructions with high stiffness at low weight
Energy absorber	Crash absorber for mobile and stationary transportation means Safety pads for lifting and conveying systems Protective covers Blast mitigation
Acoustic, electromagnetic and fire insulation	Casings/cover plates Filling material Absorption under different conditions (high temperatures, moisture, powder, vibrations etc.) Heat resistant, non-flammable constructions

Penurunan berat *body* kendaraan adalah persyaratan utama yang dihadapi oleh profesi desainer karena mempengaruhi langsung konsumsi bahan bakar, *transportasi payload* serta performa kendaraan.

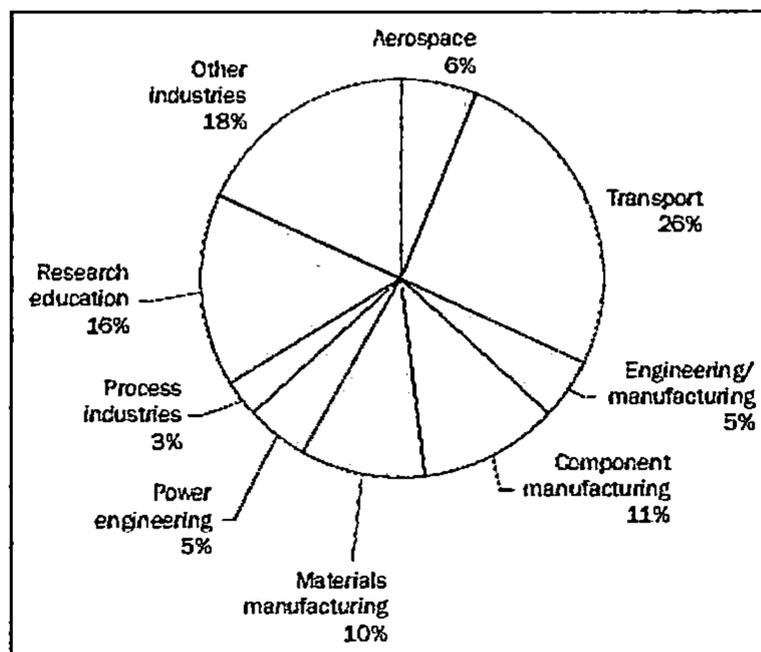


Gambar 2.28 Prototipe mobil Karmann dengan bagian-bagian yang terbuat dari aluminium foam (courtesy of: IFAM, -Bremen, Jerman) dan jenis tabrakan serta % biaya pengobatan akibat tabrakan.

Penerapan *metal foam* di peralatan kereta api berikut konseptual aturan yang sama seperti untuk industri otomotif mengenai tiga bidang aplikasi utama. Penyerapan energi adalah masalah terutama untuk model kereta api ringan dan trem yang beroperasi di daerah perkotaan dimana tabrakan dengan mobil yang lebih sering terjadi. Keuntungan dari elemen ringan berbusa adalah sama seperti

untuk mobil, perbedaan utama adalah bahwa struktur untuk kereta api jauh lebih besar.

Dalam teknologi ruang angkasa, *aluminium foam* dimaksudkan untuk pembuatan elemen pada landasan pendaratan ruang kendaraan, sebagai penguat untuk struktur bantalan beban di satelit, dll Tujuan mereka adalah untuk mengganti bahan yang menyebabkan masalah pada kondisi lingkungan yang merugikan dalam ruangan suhu mengalami perubahan, vakum, dll, (Banhart, J,2001).



Gambar 2.29 Rencana Permintaan dan Penggunaan *Aluminium Foam* (Strivastava, V.C, 2007)

Akibatnya, penerapan *aluminium foam* dalam pembangunan sarana transportasi perlu dilakukan pertimbangan berdasarkan aspek-energi ekologi dan keselamatan dan dalam kombinasi dengan seri lain dari sifat yang diinginkan juga peningkatan lalu lintas berarti efisiensi, yang akhirnya berarti juga peningkatan efisiensi lalu lintas dan transportasi teknologi. Aplikasi dari *metal foam* secara garis besar dibedakan menjadi dua, yaitu (1) aplikasi struktur, dan (2) aplikasi fungsional. Aplikasi struktur meliputi di bidang struktur ringan (*light weight*) untuk *aerospace* dan *automotive* seperti struktur *honeycomb* yang dibuat dari *aluminium foam* atau logam berpori lain yang dapat menurunkan biaya dan

menaikan performa. Boeing (USA) menggunakan komponen dari titanium *sandwich* berpori sedangkan inti aluminium berpori digunakan untuk komponen *tailboom* helikopter (Schwartz D.S dkk,1998).