

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Vinay dkk (2012) membuat *aluminum foam* dengan metode yang hemat biaya dengan menggunakan material yang mudah didapat, seperti NaCl. Fabrikasi aluminium menggunakan tiga metode yang berbeda, yaitu *die pouring* (DP), *sand salt mold* (SSM), dan *simultaneous pouring* (SP). Dari ketiga metode tersebut, dapat diketahui pada Tabel 2.1 nilai densitas dan porositas masing-masing *aluminum foam*.

Tabel 2.1 Nilai densitas dan % porositas Al foam yang diproduksi dengan metode yang berbeda (Vinay dkk, 2012).

| Sl. No | Method followed | Initial volume of water in pipe, cc | Final volume of water in pipe, cc | Actual volume of specimen V, cc | Mass m, g | Density $\rho = m/V, g/cc$ | | % of porosity $(\rho_{Al} - \rho_f) / \rho_{Al} \times 100$ |
|--------|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------|--|--------------------------------------|---|
| | | | | | | Density of the foam obtained, ρ_r | Density of the aluminium ρ_{Al} | |
| 1 | DP | 500 | 520 | 20 | 47.8 | 2.39 | 2.7 | 11.48 |
| 2 | SSM | 500 | 520 | 20 | 40 | 2 | 2.7 | 25.92 |
| 3 | SSM | 500 | 530 | 30 | 58.3 | 1.94 | 2.7 | 28.14 |
| 4 | SP | 500 | 510 | 10 | 23.4 | 2.34 | 2.7 | 13.33 |

Dari ketiga metode diatas, *aluminum foam* dengan metode SP memiliki struktur *foam* yang lebih baik dibanding metode yang lain. Akan tetapi metode ini memiliki kelemahan, yaitu penggumpalan garam kristal yang terjadi saat penuangan aluminium cair kedalam cetakan. Dalam segi kepadatan (*density*) struktur *aluminum foam* diperoleh hasil yang baik dengan cara menuangkan aluminium cair kedalam cetakan secara simultan. Kepadatan *foam* yang tinggi bukan parameter yang menentukan kualitas *aluminum foam*. Tantangan utama dari fabrikasi *metal foam* yaitu mendapatkan porositas yang homogen (Vinay dkk, 2012).

Penelitian Nikitha dkk (2015) mendiskripsikan tentang pembuatan *aluminum foam* dengan beberapa metode *melt route* yang berbeda-beda untuk mengetahui parameter fabrikasi terhadap densitas dan porositas *aluminum foam*. Sama halnya dengan penelitian yang dilakukan Vinay dkk (2012), penelitian ini bertujuan membuat *aluminum foam* dengan biaya produksi yang murah. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *direct pouring method* (salt method), *Foaming Method* (dengan *foaming agent*), dan *fusion Method*. Parameter fabrikasi dari masing-masing dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Rincian material, kuantitas dan temperatur dengan metode yang berbeda (Nikitha dkk, 2015).

| Process | Raw Materials | Quantity | Temperatur |
|-----------------------|--|---|-------------|
| Direct pouring method | Aluminium ingot NaCl crystal | 1 kg of Aluminium and 500 gms of NaCl crystal | 660°C-690°C |
| Foaming method | Aluminium ingot NaCl crystal CaCO ₃ | 1 kg of Aluminium, 200gms of CaCO ₃ crystal and NaCl crystal | 630°C-750°C |
| Fusion method | Aluminium ingot NaCl crystal | 1 kg of aluminium and 1 kg of NaCl crystal | 600°C-800°C |

Aluminum foam yang dihasilkan dari beberapa metode di atas, kemudian dilakukan proses selanjutnya yaitu proses *leaching*. Proses *leaching* bertujuan mengekstraksi mineral dari *foaming agent* yang digunakan. Dalam proses ini menggunakan kristal *citric acid* yang dilarutkan di dalam air panas. Pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 dapat diketahui nilai densitas dan porositas dari *aluminum foam* yang dihasilkan dengan beberapa metode *melt route*.

Tabel 2.3. Densitas Al foam (Nikitha dkk, 2015).

| Sl. No. | Method Followed for synthesis | Volume (cc) | Mass of that Specimen (g) | Density=(m)/(v) g/cc | |
|---------|-------------------------------|-------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| | | | | Density of specimen | Density of aluminium |
| 1 | Fusion method | 60 | 136 | 2.26 | 2.84 |
| 2 | Direct pouring method | 65 | 168 | 2.58 | 2.84 |
| 3 | With foaming agent | 45 | 116 | 2.32 | 2.84 |

Pada metode *fusion* menggunakan NaCl dapat menurunkan densitas aluminium. Dari penelitian ini dapat dihasilkan bentuk ireguler *aluminum foam*, akan tetapi sangat sulit untuk menghitung densitas dari ireguler *foam*. Akan tetapi dengan prinsip archimides densitas ireguler *foam* dapat dihitung.

Tabel 2.4. Porositas Al foam (Nikitha dkk, 2015).

| Sl. No. | Method followed for synthesis | Density = Mass /Volume (g/cc) | | % of porosity = $\frac{\rho_a - \rho_f}{\rho_a}$ |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|--|
| | | Density of specimen | Density of aluminium | |
| 1 | Fusion method | 2.26 | 2.84 | 20.42 |
| 2 | Direct pouring method | 2.58 | 2.84 | 9.15 |
| 3 | With foaming agent | 2.32 | 2.84 | 18.30 |

Porositas juga berperan penting pada densitas *foam*. Densitas dan porositas saling berkaitan satu dengan yang lain, ketika densitas turun, maka porositas meningkat. Tetapi meningkatnya porositas tidak mempengaruhi kualitas *foam*. Keseragaman porositas merupakan parameter yang terpenting. Hasil dari metode diatas, presentase porositas *foam* menurun (Nikitha dkk, 2015).

Fabrikasi *aluminum foam* pernah dilakukan oleh Firmansyah (2015) dengan memvariasikan ukuran *mesh* NaCl kristal dan fraksi massa NaCl terhadap nilai densitas, porositas, dan kuat tekan . Ukuran *mesh* yang digunakan adalah US

Mesh 4-16 (1,19 mm – 4,76 mm) dan fraksi massa NaCl 10%, 15%, dan 20%. Pada Tabel 2.5 dapat diketahui nilai densitas dan porositas *aluminum foam* yang terbentuk dengan metode *melt route*. Dan nilai kuat tekan *aluminum foam* dapat diketahui pada Tabel 2.6. Dalam penelitian ini menggunakan cetakan yang terbuat dari bahan tanah liat. Metode pengadukan aluminium cair menggunakan bantuan mesin bor tangan, dengan kecepatan pengadukan 500 rpm.

Tabel 2.5. Perbandingan nilai fraksi NaCl terhadap nilai densitas dan porositas (Firmansyah, 2015).

| Spesimen | Fraksi Massa NaCl (%) | Total Massa (gram) | Massa Al (gram) | Massa NaCl (gram) | Densitas (g/cm ³) | Porositas (%) |
|----------|-----------------------|--------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------|---------------|
| A | 0 | 250 | 250 | 0 | 2,63 | 2,8 |
| B | 10 | 250 | 225 | 25 | 2,31 | 14,6 |
| C | 15 | 250 | 212,5 | 37,5 | 2,04 | 24,4 |
| D | 20 | 250 | 200 | 50 | 1,82 | 32,8 |

Dari tabel di atas dapat dilihat, semakin tinggi fraksi NaCl maka nilai densitas semakin menurun. Berbeda halnya dengan porositas yang terbentuk, semakin tinggi fraksi NaCl, maka semakin tinggi nilai porositas *aluminum foam*.

Tabel 2.6. Nilai tegangan luluh, modulus elastisitas dan porositas pada masing-masing spesimen (Firmansyah, 2015).

| Spesimen | Tegangan Luluh (MPa) | E (MPa) | Porositas (%) |
|----------|----------------------|---------|---------------|
| A (0%) | 257,7 | 239,4 | 2,8 |
| B (10%) | 165,3 | 84,4 | 14,6 |
| C (15%) | 251,4 | 127,0 | 24,4 |
| D (20%) | 31,4 | 29,4 | 32,8 |

Nilai tegangan luluh pada tabel di atas, cenderung mengalami penurunan, meskipun pada spesimen C mengalami kenaikan nilai tegangan luluhnya.

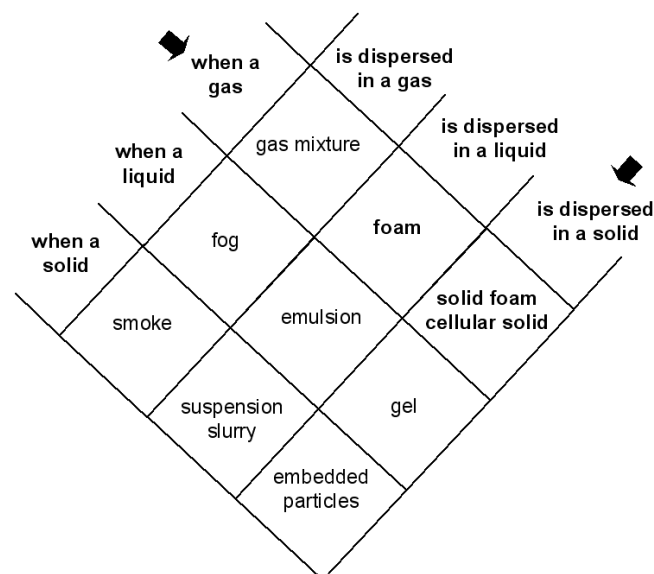
Dari beberapa penelitian di atas dapat disimpulkan, *foaming agent* NaCl dipilih karena harganya yang murah dan mudah diperoleh. Hal ini sangat mempengaruhi tujuan fabrikasi *aluminum foam* yang hemat biaya produksi.

Beberapa metode *melt route* juga mempengaruhi karakteristik *aluminum foam* yang terbentuk. Sangat perlu diperhatikan parameter - parameter yang mempengaruhi hasil *aluminum foam*, beberapa diantaranya yaitu suhu, *foaming agent*, cetakan, serta waktu pengadukan.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Pengertian *Metal Foam*

Istilah “busa” tidak selalu benar digunakan dan karena itu perlu didefinisikan. Berdasarkan Gambar 2.1 yang berisi daftar penunjukkan untuk semua penyebaran dari satu tahap ke tahap yang lain (dimana setiap fasa berada disalah satu dari tiga bagian), busa yang seragam menyebar dari fasa gas menjadi salah satu dari bentuk cair atau padat. Inklusi gas tunggal dipisahkan dari satu dengan yang lain oleh bagian cair atau padat secara berturut-turut. Dengan demikian sel seluruhnya tertutup oleh cairan atau padat dan tidak saling berhubungan. Istilah “ busa ” digunakan untuk penyebaran yang membuang gas dalam cairan. Morfologi busa tersebut dapat dipertahankan dengan membiarkan pengerasan cairan, sehingga memperoleh apa yang disebut “ busa padat ” (Banhart, 2001). Ketika berbicara tentang “ logam busa ” berarti busa yang padat (Rossella dkk, 2010).



Gambar 2.1. Tahapan penyebaran *foam* (Banhart, 2001).

2.2.2. Porositas *Metal Foam*

Pemodelan sifat bahan berpori yang sangat bergantung pada karakterisasi struktur material karena logam berpori memiliki susunan yang kompleks dan mikro. Porositas didefinisikan sebagai presentase ruang kosong dalam padatan (Ashby dkk, 2000). Logam berpori atau *metal foam* merupakan suatu rekayasa material yang memiliki struktur berongga pada material logam dengan fraksi volume antara 75% - 95% (Kennedy, 2012). *Metal foam* memiliki kombinasi unik dari beberapa sifat yang tidak dapat diperoleh melalui logam konvensional, seperti kepadatan rendah, kekuatan tinggi, kemampuan untuk menyerap energi dan konduktivitas termal yang rendah (Degischer, 2002). Pada Tabel 2.7 diuraikan beberapa nilai porositas *metal foam* dari berbagai macam proses fabrikasinya.

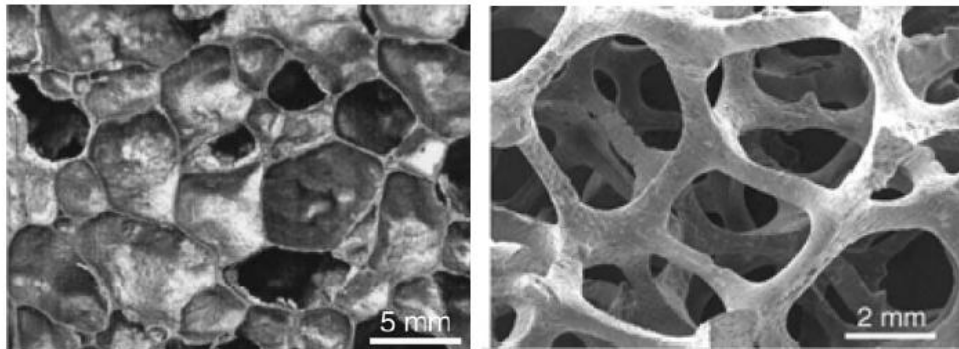
Tabel 2.7. Nilai porositas dari berbagai macam proses pembuatan *metal foam* (Banhart, 2001)

| 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 peniup | 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 | ya |
| Vapour deposition | Vapour deposition | 93-97,5 | Ni, Ni-Cr, Cu | ya |

2.2.3. Klasifikasi *Metal Foam*

Busa logam memiliki ciri struktur yaitu topologi sel (sel-sel terbuka dan sel-sel tertutup), kepadatan yang relatif rendah, ukuran sel, bentuk sel dan anisotropi (Ashby dkk., 2000). Busa sel tertutup, yang memiliki pori berisi gas dipisahkan dari satu dengan yang lain dengan dinding sel dan memiliki kekuatan yang baik, cocok digunakan untuk aplikasi struktural. Sedangkan busa sel terbuka, yang

memiliki jaringan kontinyu dari penyangga logam dan saling berhubungan. Sehingga lebih lemah dari sel tertutup (Kennedy, 2012).



Gambar 2.2. Mikrograf sel tertutup (kiri) dan sel terbuka (kanan) logam selular (Kennedy,2012).

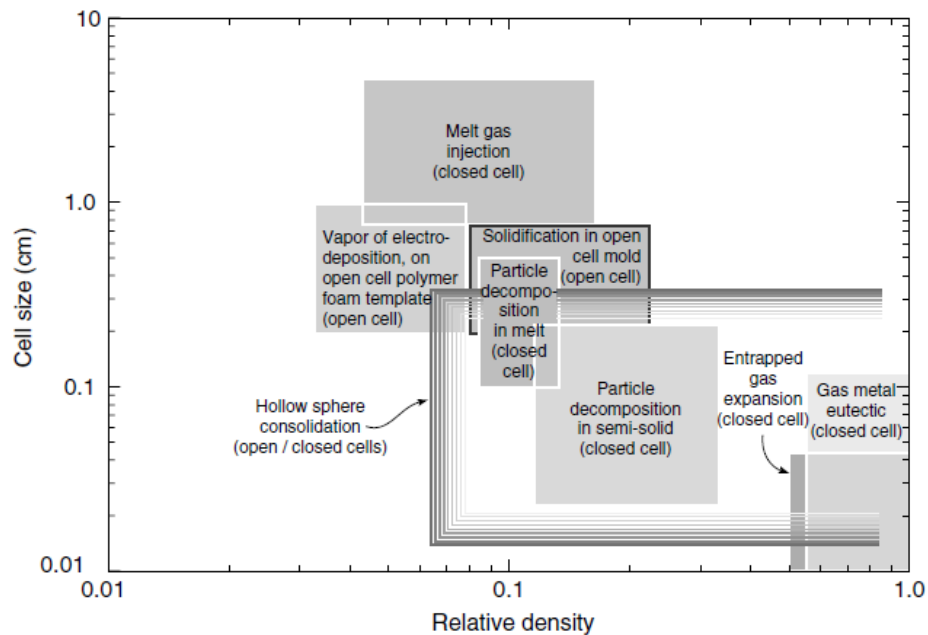
2.2.4. Proses Fabrikasi *Metal Foam*

Ada banyak metode berbeda untuk membuat *porous metals* dan *metallic foam*, dan metode tersebut dibedakan menjadi empat jenis produksi berbeda, yaitu menggunakan logam cair, serbuk logam, uap logam, dan ion logam (Kennedy, 2012). Sifat-sifat busa logam dan struktur selular logam lain tergantung pada sifat-sifat logam itu sendiri, kepadatan relatif dan topologi sel (terbuka atau tertutup, ukuran sel, dll). *Metal foam* yang dibuat dengan salah satu dari sembilan proses, tercantum di bawah ini. Logam yang telah dibuat *foam* dengan proses penambahan digambarkan pada Gambar 2.3 (Ashby dkk, 2000).

1. Membuat gelembung gas ke dalam campuran Al-SiC atau Al-Al₂O₃ cair (untuk Al & Mg).
2. Dengan pengadukan *foaming agent* (seperti TiH₂) ke dalam paduan cair (seperti paduan aluminium) dan mengendalikan tekanan saat pendinginan (untuk logam Al).
3. Penggabungan serbuk logam (biasanya paduan aluminium) dengan partikel *foaming agent* (TiH₂) diteruskan dengan pemanasan hingga keadaan lunak, ketika *foaming agent* melepaskan gas hidrogen, maka material tersebut akan mengembang (untuk logam Al, Zn, Fe, Pb dan Au).

4. Pembuatan cetakan keramik dari lilin atau prekursor polimer-*foam*, dilanjutkan dengan pembakaran prekursor dan dibantu dengan tekanan bersama logam yang dicairkan atau serbuk logam yang meleleh yang kemudian dipanaskan (untuk logam Al, Mg, Ni-Cr, *Stainless Steel*, dan Cu).
5. Deposisi logam dari fasa uap atau elektrodeposisi logam kedalam prekursor polimer yang kemudian dibakar, sehingga meninggalkan struktur berlubang (*hollow cores*), (untuk logam Ni dan Ti).
6. Memperangkap gas inert bertekanan tinggi dalam pori dengan menggunakan *Hot Isostatic Pressing* (HIP), yang diikuti dengan ekspansi gas pada kenaikan temperatur tertentu (untuk logam Ti).
7. Memanaskan bola berongga (*hollow cores*), dibuat dengan proses atomisasi dimodifikasi, atau dari logam oksida atau bola hidrida diteruskan dengan mereduksi atau *dehydration*, atau dengan deposisi uap dari logam ke bola polimer (untuk Ni, Co, paduan Ni-Cr).
8. Penekanan bersama antara serbuk logam dengan serbuk yang mudah terlarut (seperti NaCl), atau infiltrasi serbuk yang mudah terlarut ke dalam logam cair, yang diikuti dengan pelarut sehingga didapatkan rangka *metal foam* (untuk logam Al dengan NaCl sebagai serbuk terlarut).
9. Pelarutan gas (seperti hidrogen) ke dalam logam cair pada keadaan bertekanan, yang kemudian untuk melepaskan gas yang diatur saat pembekuan berlangsung (untuk logam Cu, Ni, dan Al).

Dari sembilan proses tersebut hanya lima proses yang teratas yang digunakan untuk produksi masal. Setiap metode dapat menggunakan subset kecil dari logam untuk membuat bahan berpori dengan kepadatan relatif terbatas dan ukuran-ukuran sel. Gambar 2.3 menjelaskan kisaran ukuran sel, jenis sel (terbuka atau tertutup), dan kepadatan relatif yang dapat diproduksi dengan metode saat ini (Ashby dkk, 2000).



Gambar 2.3. Kisaran ukuran sel dan densitas relatif dengan metode yang berbeda (Ashby dkk, 2000).

2.2.5. Fabrikasi *Aluminum foam*

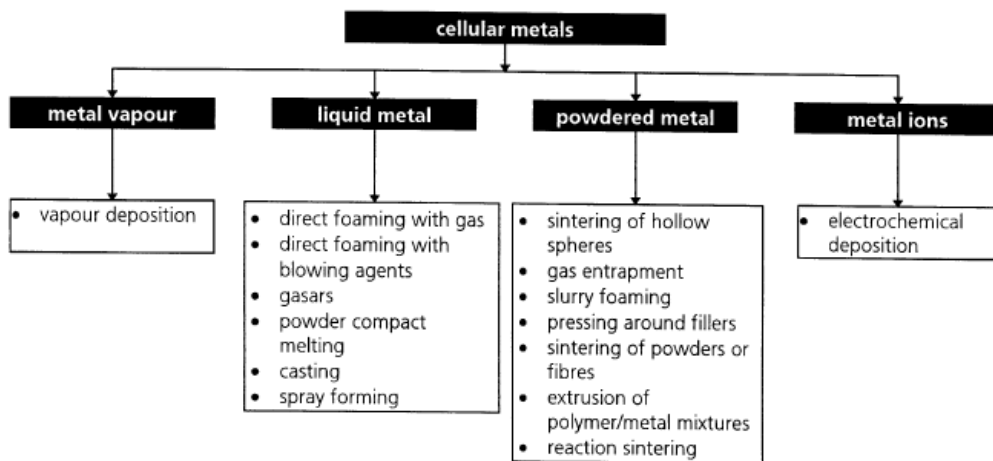
Aluminium busa saat ini diproduksi oleh beberapa perusahaan diseluruh dunia. Namun demikian, sulit untuk menilai berkelanjutan kegiatan produksi aluminium busa secara komersial, karena informasi tentang jumlah produksi dan pasar tidak tersedia. Beberapa negara, seperti Kanada, Austria, Korea, dan Cina memproduksi aluminium busa. *Shinko Wire* di Jepang merupakan produsen *aluminum foam* pertama sejak tahun 1990 (Lefebvre dkk., 2008). Saat ini ada dua metode utama untuk menghasilkan busa logam, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Yang pertama adalah metode *Direct Foaming*, dimana gas diinjeksikan secara terus-menerus dari luar ke dalam logam cair yang mengandung partikel nonlogam yang seragam atau menambahkan *foaming agent*. Kemudian yang kedua yaitu metode *indirect foaming* dimulai dari *solid precursor* yang terdiri dari matriks logam partikel *foaming agent* yang tersebar merata. Seperti paduan berbasis aluminium hidrida dari elemen transisi seperti titanium atau serbuk zirkonium hidrida yang biasa dipakai sebagai serbuk *blowing agent*. Ketika dipanaskan di atas suhu leleh *solid precursor* akan menegembang karena

adanya pelepasan gas dari *precursor* sehingga membentuk *foam* (Behrendt dkk., 2006).

| | | | |
|-----------------------------|--|-------------------------|--|
| direct foaming | melt alloy make alloy foamable create gas bubbles collect foam solidify foam | indirect foaming | prepare foamable precursor remelt precursor create foam solidify foam |
| manufacturers (products) | Cymat, Canada (<i>SAF</i>) Foamtech, Korea (<i>Lasom</i>) Hütte Kleinreichenbach (HKB), Austria (<i>Metcomb</i>) Shinko-Wire, Japan (<i>Alporas</i>) (Distributor: Gleich, Germany) | manufacturers | alm, Germany (<i>AFS</i>) Alulight, Austria (<i>alulight</i>) Gleich-IWE, Germany Schunk, Germany |

Gambar 2.4. Rute dasar *foaming* untuk *metal foam* dan manufaktur busa berbahan aluminium (Behrendt dkk., 2006).

Metode klasifikasi lain dalam pembuatan *aluminum foam*, pada Gambar 2.5 menurut (Banhart, 2001) klasifikasi tersebut dibagi menjadi empat bagian.



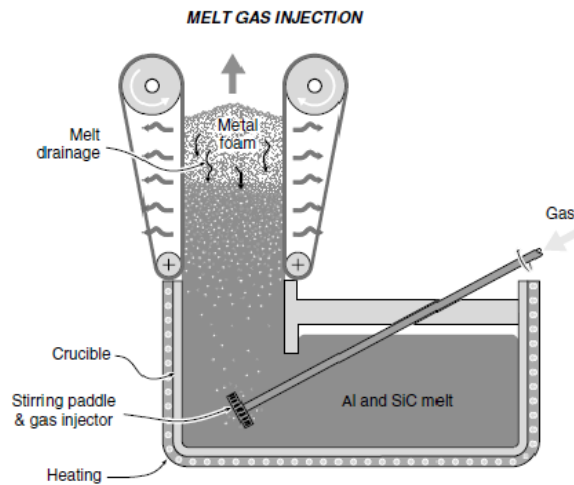
Gambar 2.5. Metode produksi untuk bahan logam selular (Banhart, 2001).

2.2.6. Jenis Proses Pembuatan *Metal Foam* dengan *Liquid State* (melt route)

2.2.6.1. *Foaming* dengan Injeksi Gas (Cymat/ Alcan and Hydro)

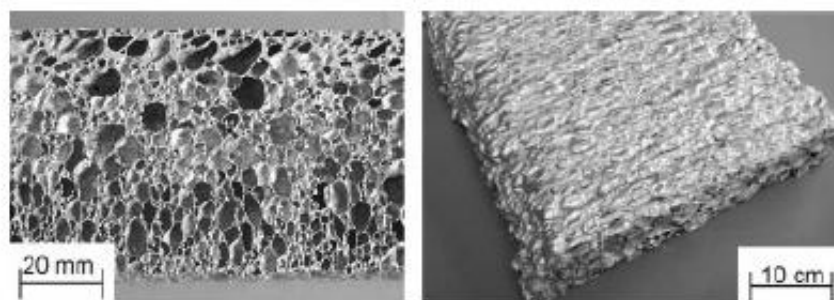
Cara pertama membuat *aluminum foam* saat ini dimanfaatkan oleh perusahaan Hydro Aluminium di Norwegia dan Cymat Aluminium di Kanada, akan tetapi proses tersebut dipatenkan oleh perusahaan Alcan (Banhart, 2001). Proses yang digunakan oleh Hydro aluminium, yaitu menggunakan bahan awal berupa logam metrik komposit (Al tempa atau Al cor + 10-30% volume partikel SiC atau Al_2O_3). Bahan awal adalah logam cair yang dilebur dengan peralatan pengecoran konvensional dan disuntikkan gas melalui nozel kecil yang dimasukkan ke dalam sebuah impeler berputar, sehingga membentuk dispersi gelembung gas kecil. Ukuran gelembung dapat dikendalikan dengan menyesuaikan laju aliran gas, desain impeler (jumlah nozel dan ukurannya) dan kecepatan putar impeler (Degischer dkk, 2002).

Proses gas injeksi mudah untuk diimplementasikan dengan paduan aluminium karena memiliki kerapatan yang rendah dan tidak mudah teroksidasi ketika terkena udara atau gas lain yang mengandung oksigen. Ada beberapa varian dari metode ini , salah satunya yang ditunjukkan dalam Gambar 2.6. Aluminium murni atau paduan aluminium cair ditambahkan 5 – 15 wt % partikel keramik. Partikel-partikel ini, biasanya berdiameter 0,5-25 μm terbuat dari alumina, zirkonia, silikon karbida, dan titanium diboride. Berbagai macam gas dapat digunakan untuk menciptakan gelembung dalam aluminium cair. Selain udara, karbon dioksida, oksigen, gas inert, dan air dapat disuntikkan ke dalam cairan aluminium untuk membuat gelembung (Ashby dkk, 2000).



Gambar 2.6. Manufaktur *aluminum foam* dengan metode injeksi gas (CYMAT and HYDRO) (Ashby dkk, 2000).

Porositas *aluminum foam* dari metode ini berkisar 80-98%, sesuai dengan kepadatan antara 0,069 dan 0,54 g/cm^3 . Rata-rata ukuran pori-pori dari 25 turun sampai 3 mm, dan ketebalan dinding dari 50-85 μm (Banhart, 2001). Fasilitas produksi yang diatur oleh Cymat mampu mencetak panel *foam* secara kontinyu pada tingkat rata-rata 900 kg/jam hingga lebar 1,5 m dengan rata-rata ketebalan 25-150 mm. Hal ini menunjukkan bahwa proses ini relatif mudah dan ekonomis. Tantangan yang mungkin perlu lebih diperhatikan adalah variasi ukuran sel, gradien kepadatan, dan anisotropi struktur sel dari hasil kekuatan mekanik *conveyor* (Gambar 2.7) (Degischer dkk, 2002).

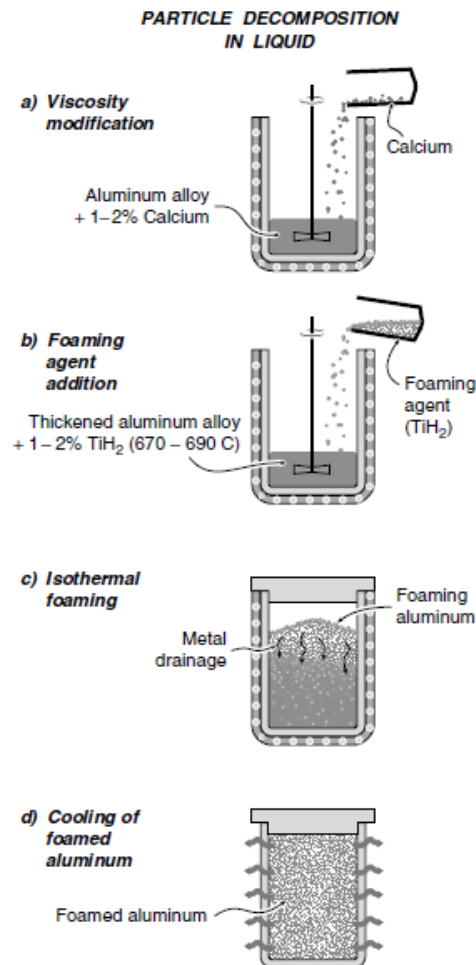


Gambar 2.7. Mikrograf optik dari produksi Cymat *foam* dengan metode injeksi gas. kiri: struktur sel (kepadatan sekitar 0,3 g/cm^3), kanan: permukaan *foam* (kepadatan sekitar 0,05 g/cm^3) (Degischer dkk, 2002).

2.2.6.2. *Foaming Melts* dengan Zat Penegembang (*Foaming agent*)

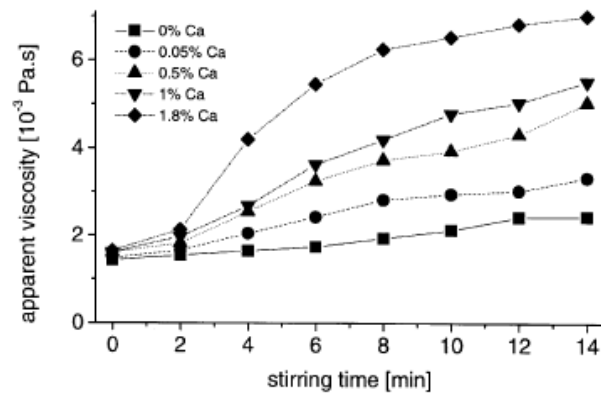
Cara kedua untuk jenis *liquid metal direct foaming* adalah dengan menambahkan zat pengembang (*blowing agent*) ke dalam logam cair. *Blowing agent* terurai di bawah temperatur lebur dan mengeluarkan gas yang menyebabkan terbentuknya *foam* (Banhart, 2001). *Foaming agent* yang sering digunakan adalah titanium hidrida (TiH_2). Titanium hidrida akan terurai menjadi Ti dan gas H_2 ketika dipanaskan sekitar di atas $465^\circ C$. Dengan menambahkan titanium partikel hidrida ke dalam aluminium cair, volume gas hidrogen akan cepat terbentuk, menciptakan gelembung yang dapat menyebabkan penutupan sel busa, aliran *foam* cukup lambat, dan viskositas cairan yang tinggi. Perusahaan *Shinko Wire* telah mengembangkan aluminium busa ini dengan merek dagang bernama Alporas (Ashby dkk, 2000). Skema proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.8.

Proses ini dimulai dengan peleburan aluminium dan menjaga suhu lebur antara 670 dan $690^\circ C$. Kekentalan dinaikkan dengan menambahkan 1-2% kalsium yang cepat teroksidasi dan tersebar dalam bentuk partikel-partikel halus CaO dan $CaAl_2O_4$. Lelehan aluminium kemudian diaduk secara merata dan 1-2 % TiH_2 ditambahkan dengan ukuran diameter 5-20 μm . Segera setelah tersebar dan mencair, pengadukan dihentikan dan *foam* akan terbentuk diatas cairan. Pengendalian dapat dilakukan dengan menyesuaikan tekanan berlebih, suhu, dan waktu. Dibutuhkan kurang lebih sepuluh menit untuk mengurai titanium hidrida. Ketika proses *foaming* telah selesai, kemudian didinginkan untuk memadatkan *foam* sebelum gas hidrogen lolos (Ashby dkk, 2000). Fraksi volume kalsium dan titanium hidrida yang ditambahkan ke dalam aluminium cair menentukan kepadatan relatif, kombinasi saat kondisi pendinginan, dan ukuran sel. Ukuran sel dapat bervariasi dari 0,5 -5 mm dengan mengubah konten TiH_2 dan kondisi pendinginan. *Aluminum foam* yang terbentuk memiliki kepadatan relatif dari 0,2-0,07.

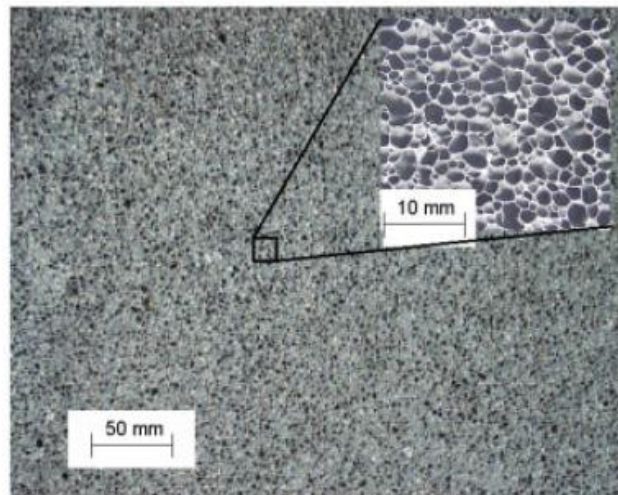


Gambar 2.8. Tahap proses pembuatan *aluminum foam* (Alporas proses) (Ashby dkk, 2000).

Pada Gambar 2.9, menunjukkan pengaruh pemanasan terhadap viskositas aluminium cair dengan variasi penambahan kalsium. Seperti yang dihasilkan, busa Alporas memiliki ciri bersel tertutup (Gambar 2.10), meskipun begitu saat ini semakin banyak pengembangan yang dilakukan pada dinding sel untuk meningkatkan redaman. Meskipun volume kalsium dan titanium hidrida yang digunakan kecil, proses ini cenderung lebih mahal dari pada metode injeksi gas. Untuk saat ini, hanya paduan aluminium yang dibuat dengan metode ini, karena dekomposisi TiH₂ terjadi terlalu cepat pada titik leleh paduan yang lebih tinggi. Penelitian menggunakan *foaming agent* (karbonat, nitrat) dengan suhu dekomposisi tinggi menawarkan metode yang menjanjikan untuk *foam* besi, baja, dan paduan nikel (Ashby dkk, 2000).



Gambar 2.9. Pengaruh waktu pemanasan terhadap viskositas aluminium cair setelah ditambahkan kalsium (Banhart, 2001).



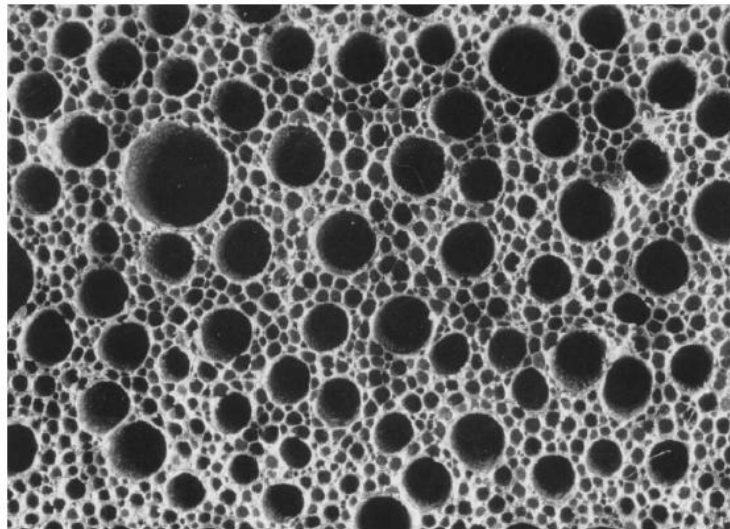
Gamabr 2.10. Tipe struktur sel Alporas (Degischer dkk., 2002).

2.2.6.3. *Solid – Gas Eutectic solidification (Gasars)*

Salah satu metode pembuatan *metal foam* yang dikembangkan sekitar satu dekade yang lalu, dimana beberapa logam cair dibentuk dengan menggunakan sistem eutektik gas hidrogen. Metode ini dimulai dengan peleburan logam pada tekanan di bawah atmosfer hidrogen (hingga 50 atm), kemudian diturunkan suhunya, maka logam cair mengalami transisi eutektik menuju dua sistem fasa heterogen, “padat + gas”. Jika susunan sistem cukup dekat dengan konsentrasi eutektik, akan ada reaksi pemisahan pada satu suhu. Karena komposisi eutektik tergantung pada sistem tekanan, tekanan eksternal dan konten hidrogen harus

dikoordinasikan. Menghilangnya panas pada logam cair akan menjadikan logam cair menjadi padat (Banhart, 2001).

Perubahan dari padat menjadi cair, terjadi pada kecepatan 0,05-5 mm/s. Hidrogen akan meningkat dan menyebabkan terbentuknya gelembung gas. Parameter proses harus dipilih sedemikian rupa, supaya gelembung tidak mengapung di atas cairan dan menghilang, tetapi tetap berada pada zona padat. Morfologi pori-pori yang dihasilkan sebagian besar memanjang ke arah bentuk padat. Akan terlihat bulat ketika diamati dalam arah yang ditunjukkan Gambar 2.11. Diameter pori-pori berkisar 10 μm – 10 mm, panjang pori-pori dari 100-300 mm, aspek rasio berkisar 1-300 dan porositas 5-75%. Distribusi ukuran pori-pori tidak seragam, karena pertumbuhan pori-pori terjadi secara bersamaan, antar pori-pori kecil, besar, dan paduan (Banhart, 2001).

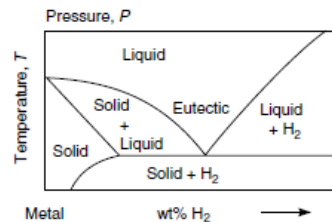


Gambar 2.11. Struktur pori “gasar” (Banhart, 2001).

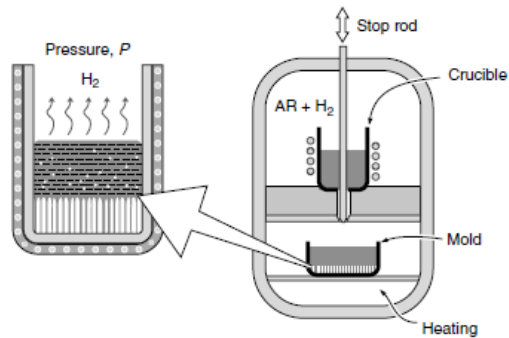
Bentuk pori bisa berbentuk kerucut atau bahkan bergelombang. Untuk bahan berpori dibentuk dengan solidifikasi padat-gas eutektik. Kata “gasar ” dalam bahasa rusia berarti diperkuat gas. Skema praktis dari proses *gasar* digambarkan dalam Gambar 2.12. Pori-pori berbentuk silinder, radial, dan aksial dapat dibuat tergantung bagaimana sempel didinginkan. *Gasar* biasa terbuat dari nikel, tembaga, aluminium, dan magnesium. Keseragaman *gasar* kadang-kadang tidak memuaskan dan perbaikan lebih lanjut perlu pada aplikasi material. Sifat

mekanik dari *gasar* adalah kekuatan kompresi, tegangan, modulus *young*, dan rasio *poisson* (Banhart, 2001).

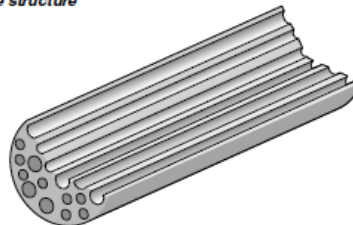
a) Metal - Hydrogen binary phase diagram



b) Directional solidification



c) Final pore structure

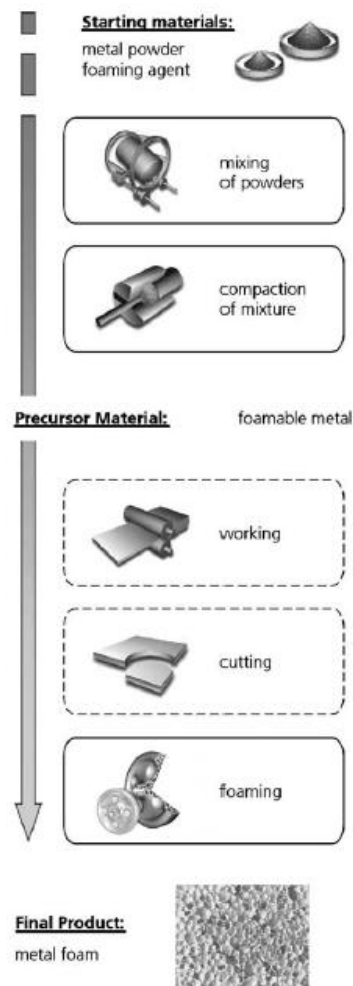


Gambar 2.12. Proses manufaktur *gas metal eutectic solidification* “gasar” (Ashby dkk, 2000).

2.2.6.4. Teknik *Powder Compact Melting*

Busa logam dapat diproduksi dengan metode yang dikembangkan di *Fraunhofer institute* di Bremen, Jerman. Ide-ide mendasar untuk proses ini sudah lama, tetapi metode ini telah dikembangkan lebih maju. Metode ini sering disebut “metalurgi serbuk” karena bahan awal terbuat serbuk logam, walaupun terbentuknya *foam* berlangsung dalam keadaan cair. Proses produksi dimulai dengan mencampur serbuk logam murni atau serbuk paduan dengan *blowing*

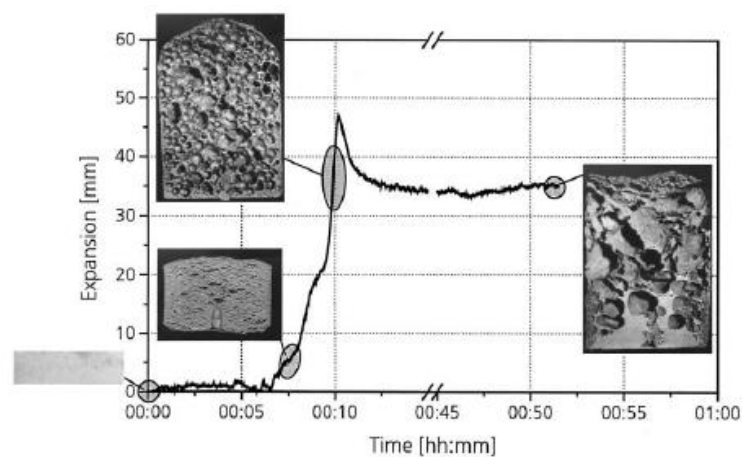
agent, setelah itu campuran dipadatkan untuk menghasilkan produk yang padat atau bahan setengah jadi (Gamabr 2.13). Pada prinsipnya, pemadatan dapat dilakukan dengan berbagai teknik yang memastikan *blowing agent* tertanam ke dalam matrik logam tanpa sisa porositas terbuka.



Gambar 2.13. Proses *Powder Compact Melting* (Banhart, 2001).

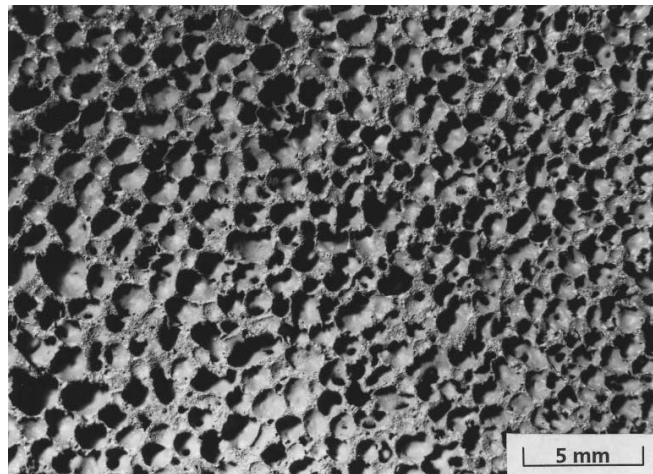
Contoh metode pemadat tersebut adalah unaksial atau isostatik, ekstrusi batang atau serbuk bergulir. Metode pemadatan yang dipilih tergantung pada bentuk dan bahan pendahulu. Namun, ekstrusi menjadi metode yang paling ekonomis. Bentuk pesegi panjang bisanya terbuat dari lembaran tipis yang kemudian dirol. Pembuatan bahan pendahulu harus dilakukan dengan sangat hati-hati karena porositas sisa apapun atau cacat lainnya akan menyebabkan hasil

buruk dalam proses selanjutnya. Langkah selanjutnya adalah perlakuan pemanasan pada suhu dekat titik lebur material. *Blowing agent* yang homogen didistribusikan dalam matriks logam padat. Penggunaan tekanan gas digunakan untuk memperluas dan memadatkan bahan pendahulu, sehingga membentuk struktur yang sangat berpori. Waktu yang diperlukan untuk ekspansi penuh tergantung pada suhu dan ukuran material. Gambar 2.14 menunjukkan ekspansi kurva aluminium/ TiH_2 serbuk. Volume busa terlihat memperluas yang menunjukkan hubungan dari waktu dengan sifat morfologi dalam tahap ekspansi.



Gambar 2.14. Laju pengembangan aluminium/ TiH_2 padat ketika berbusa pada suhu 750°C (Banhart, 2001).

Pada ekspansi maksimum terlihat busa cukup seragam. Kepadatan busa logam padat dapat dikendalikan dengan menyesuaikan *blowing agent* dan beberapa parameter lainnya, seperti suhu dan nilai pemanas. Untuk paduan seng dan aluminium, menggunakan titanium atau zirkonium hidrida (TiH_2 , ZrH_2) sebagai *blowing agent*. Dalam berbagai kasus, penggunaan hidrida logam sebagai *blowing agent*, berkisar kurang dari 1%. Paduan merupakan material yang paling umum digunakan untuk *foam*, namun aluminium murni atau paduan, seperti paduan 2xxx atau 6xxx dapat digunakan. Gambar 2.15 menunjukkan penampang *foam*.



Gambar 2.15. Penampang *foam* dengan *powder compact melting* (Banhart, 2001).

2.2.7. Material

2.2.7.1. Aluminium

Aluminium merupakan unsur kimia golongan IIIA dalam sistem periodik. 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 strenght* 25 Mpa, *poisson ratio* 0,35. *Hardness* 15 VHN, kekuatan luluh 25 MPa, konduktivitas termal 237 W/mK , kapasitas panas 917 $J/kg^{\circ}C$, dan mudah dibentuk. Karakteristik aluminium dapat dilihat pada Tabel 2.8.

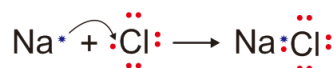
Tabel 2.8 Karakteristik logam aluminium (ASM Handbook 9th, 1985)

| 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 |

| Sifat | Nilai |
|---|-------------|
| <i>Yield Strenght</i> (Mpa) | 25 |
| <i>Poisson Ratio</i> | 0,35 |
| Hardness (VHN) | 12 |
| Kekuatan Luluh (Mpa) | 25 |
| Ketangguhan (Mpam) | 33 |
| Konduktivitas Termal (W/M ^o K) | 237 |
| Kapasitas Panas (J/Kg ^o C) | 917 |
| Ketahanan Trhadap Korosi | Sangat baik |
| <i>Machinability</i> | Baik |
| <i>Formability</i> | Baik |

2.2.7.2. NaCl

Natrium Chloride atau *Sodium Chloride* merupakan senyawa organik, yang tidak mengandung karbon dan hidrogen dalam satu molekul. Garam terbentuk dari atom bermuatan positif, yang disebut kation menarik atom bermuatan negatif (anion). Hal ini disebut sebagai ikatan ion, dan merupakan kunci dalam mempertahankan struktur kimia garam. Pada Gambar 2.16 menunjukkan natrium klorida terbentuk ketika atom natrium berinteraksi dengan atom klorin. Ketika ini terjadi, natrium akan menyumbangkan elektron (bermuatan negatif) klorin. Hal ini membuat natrium sedikit positif, dan klorin menjadi sedikit negatif. Rumus kimia untuk natrium klorida adalah NaCl.



Gambar 2.16. Ikatan ion NaCl

Sumber: (<http://rumushitung.com/2014/10/30/sifat-kegunaan-dan-sumber-unsur-halogen/>).

Tabel 2.9. Properti NaCl.

Sumber : (<https://www.britannica.com/science/salt>)

| Karakteristik Garam | |
|----------------------------|---|
| Nama senyawa | Sodium Chloride |
| Rumus kimia | NaCl |
| Berat zat | 58,443 |
| Warna | Tanpa warna ketika murni; berwarna (biru,abu-abu) ketika tidak murni |
| Lustre | seperti kaca |
| Bentuk fisik | Transparan |
| Kekerasan | 2 ^{1/2} |
| Densitas | 2,17g/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); hydrochloric acid (i) |
| | *(s)= <i>soluble</i> (larut); (ss)= <i>slightly soluble</i> (sedikit larut); (i)= <i>insoluble</i> (tidak larut). |

2.2.8. Metode Karakteristik *Aluminum foam*

2.2.8.1. Pengukuran Porositas *Aluminum foam*

Berdasarkan berbagai macam metode pembuatan *aluminum foam*, dapat diketahui nilai dari porositasnya, seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.7. Untuk mengetahui nilai porositas *aluminum foam*, hal pertama yang harus diketahui adalah nilai dari densitas material tersebut. Karena densitas dan porositas saling berkaitan. Kerapatan dari *porous material* dapat ditentukan dengan menimbang dengan mengukur volumenya dengan prinsip *Archimedes* (Banhart, 2001).

2.2.8.2. *Mechanical Testing*

Sifat elastis dari beberapa *metal foam* komersial saat ini telah dipelajari secara luas. Secara umum, sifat tersebut memperlihatkan kesamaan pada deformasi tarik dan tekan. Sifat utama yang diinginkan dari *metal foam* adalah kemampuan untuk menyerap energi tekan plastis pada jumlah yang besar,

kemudian mentransmisikan beban yang kecil secara konstan. Oleh karena itu, saat ini deformasi tekan pada *metal foam* telah dipelajari secara mendalam dibandingkan dengan deformasi tarik. Kekuatan luluh tarik pada *metal foam* biasanya sama atau lebih kecil dari pada kekuatan luluh tekan. *Aluminum foam* adalah material berpori isotropik dengan beberapa karakteristik, yang membuat *aluminum foam* sangat cocok untuk digunakan di beberapa aplikasi (Firmansyah, 2015).

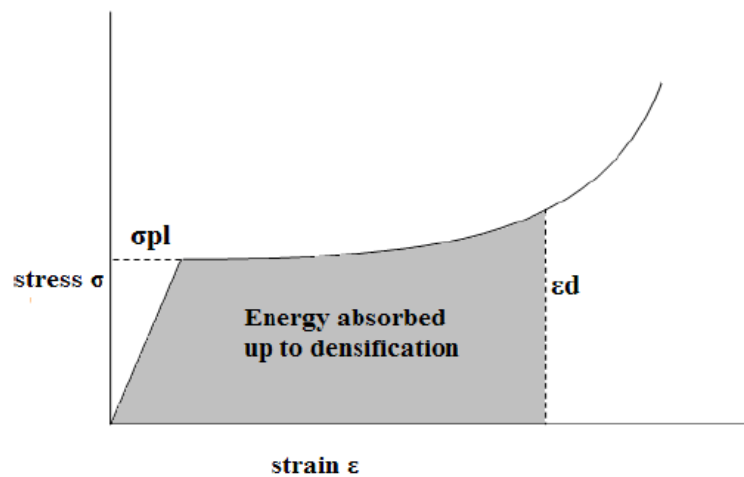
Data mekanik diperlukan untuk evaluasi dari aplikasi tertentu atau untuk membangun data base yang dibutuhkan untuk membantu pemodelan material selular atau komponen yang mengandung bahan-bahan tertentu. Salah satunya yaitu yang menyangkut tentang statistik, jika logam busa dari paduan diuji, sifat mekanik yang dihasilkan dari jumlah sampel dengan kepadatan busa keseluruhan akan menunjukkan hasil yang lebih besar dari pada bahan konvensional. Berbagai tes mekanik dibedakan menjadi dua, yaitu: jenis tegangan terapan, cara pemuatan, dan waktu pembebanan. Untuk jenis tegangan terapan terdiri dari: uniaxial, multiaksial, dan hidrostatis. Sedangkan cara pemuatan, terdiri dari: kompresi, tegangan geser, tekuk, dan torsi. Dan untuk waktu pembebanan terdiri dari, konstan, perlahan-lahan meningkat, dinamik, dan siklis (Banhart, 2001).

2.2.8.3. Energy Absorption

Salah satu hal yang penting dalam teknologi properti untuk estimasi aplikasi dari *metal foams* adalah kapasitas penyerapan energi. Logam busa dapat meredam energi dengan luluh, tekuk, patah dari struktur sel, gesekan antara fragmen dinding sel, dan aliran panas dari gas yang terperangkap di dalam busa. Dari kompresi kurva tegangan-regangan (σ - ϵ) menentukan properti kompresif (puncak tegangan σ_{pl} , densifikasi regangan ϵ_d , dan kapasitas penyerapan energi) dari *aluminum foam*. Penyerapan energi persatuan volume (U), adalah area dibawah kurva tegangan-regangan hingga permulaan densifikasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17 (Aboraia dkk., 2011). Energi yang diserap persatuan volume dalam interval regangan tertentu dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$U = \int_0^{\epsilon_d} \sigma d\epsilon \dots\dots\dots (2.2)$$

Perilaku spesifik dibawah kompresi tegangan *metal foams* memiliki kemampuan untuk menyerap dengan jumlah yang tinggi terhadap energi *impact*. Nilai rata-rata penyerapan energi *impact* persatuan volume dari *ALPORAS foam* selama deformasi 55% untuk beban statatik yaitu $1,0 \text{ MJ/m}^3$, dan untuk beban dinamik sebesar $1,51 \text{ MJ/m}^3$. Kemampuan penyerapan energi *impact* yang tinggi berhubungan dengan kerapatan relatif dan jenis struktur selnya (Bauer dkk., 2013).



Gambar 2.17. Kurva kompresif dari *metal foam* (Aboaraia, 2011).

2.2.8.4. Sifat *Thermal*

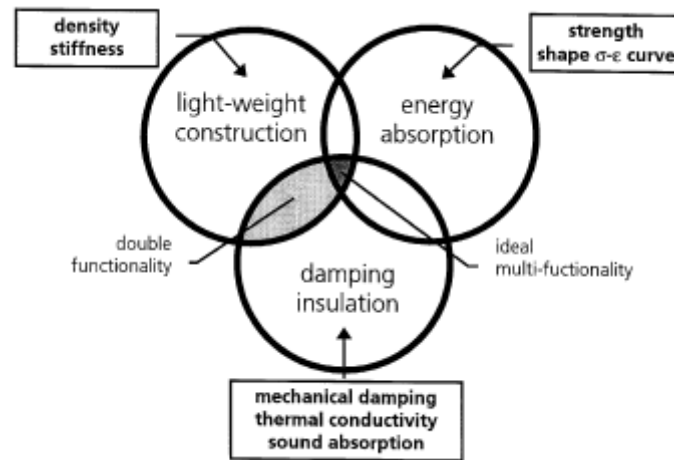
Sifat termal dari logam berpori menjadi menarik jika dikombinasikan dengan sifat konduktifitas, permeabilitas dan besar luasa area. Perpindahan panas dan konduksi dari logam berpori merupakan fenomena yang kompleks. Efisiensi dari pemindahan panas dipengaruhi oleh konduktifitas dari logam berpori, perpindahan 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 strukturnya (ukuran pori-pori dan distribusinya, porositas, konektifitas pori-pori, dan keksaran permukaan pori-pori) (Nugroho, 2013).

2.2.9. Aplikasi *Aluminum foam*

2.2.9.1. Industri Otomotif

Meningkatnya permintaan untuk keselamatan mobil telah menyebabkan berat kendaran bertambah. Masalah ini dituntut untuk menjadikan mobil dengan konsumsi bahan bakar yang rendah, sehingga perlu langkah-langkah untuk mengurangi berat kendaran. Di Eropa dan Jepang, diberlakukan pengurangan dimensi mobil. Bagaimanapun, pengurangan ini tidak boleh mengurangi kenyamanan penumpang. Oleh karena itu, beberapa pihak mencoba mengurangi struktur lain untuk mempertahankan kenyamanan penumpang. Hal ini, menciptakan masalah baru dengan pemborosan panas di ruang mesin, karena semua agregat sangat berdekatan dengan keselamatan penumpang, karena panjang kendaraan berdampak terhadap zona kecelakaan. Sehingga perlu terobosan dengan menciptakan stuktur mobil yang ringan dan kuat, salah satunya dengan menggunakan *metal foam* (Banhart, 2001).

Gambar 2.18 menunjukkan tiga aplikasi busa logam dalam industri otomotif. Lingkaran dalam mewakili tiga bidang yang harus dibedakan dan kotak luar menggambarkan sifat busa dari tiga bidang tersebut. Suatu aplikasi multifungsi yang ideal, akan menjadi bagian yang disajikan sebagai panel ringan, penyerapan energi dalam situasi kecelakaan dan membawa fungsi penyerapan suara atau penyerapan panas (persimpangan ketiga lingkaran). Aplikasi multifungsi tersebut, tentu saja sulit ditemukan. Sering kali ditemukan dua aplikasi saja, misalnya struktur ringan dengan penyerapan suara pada saat yang sama.



Gambar 2.18. Aplikasi otomotif dari struktur *metal foam* (Banhart, 2001).

2.2.9.2. Pembuatan Kapal

Konstruksi yang ringan sangat penting dalam pembuatan kapal. Kapal penumpang modern dapat dibangun sepenuhnya dari aluminium ekstruksi, lembaran aluminium, dan aluminium struktur sarang lebah. Aluminium busa yang besar dengan aluminium inti merupakan unsur penting dalam beberapa struktur. Jika permukaan lembaran aluminium terikat pada materi inti dengan perekat poliuretan, membuat sangat elastis, ringan dan kaku dengan perilaku redaman yang baik, bahkan pada frekuensi yang rendah dalam kapal (Banhart, 2001).