

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Hussain dan Suffin (2011) melakukan penelitian untuk membuat *aluminium foam* dengan salah satu metode *solid route process* yaitu *Sintering Dissolution Process* (SDP) menggunakan NaCl sebagai *space holder*. *Space holder* adalah bahan yang digunakan sebagai penghasil gas yang membentuk pori pada aluminium saat dilakukan proses *sintering*. Bahan dasar yang digunakan adalah serbuk aluminium murni dengan kemurnian 99,8% dengan ukuran partikel 35 μm dan NaCl dengan ukuran partikel rata-rata 1 mm sebagai *space holder*. Serbuk aluminium dicampur dengan NaCl dengan menggunakan *ball mill* selama 1 jam sesuai dengan variasi perbandingan serbuk aluminium dan NaCl. Selama pencampuran berlangsung ditambahkan sedikit *ethanol* untuk mencegah terjadinya segregasi. Kemudian campuran ditekan dengan 200 MPa sehingga membentuk silinder. Kemudian *green compact* di-*sinter* pada temperatur 570°C. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin banyak pemberian NaCl akan semakin meningkatkan porositas. Porositas yang didapat yaitu 2,59% pada 0% NaCl, 21,11% pada 20% NaCl, 34,81% pada 40% NaCl, 48,15% pada 60% NaCl, dan 69,63% pada 80% NaCl. Porositas tertinggi yang diperoleh sebesar 69,63% yaitu pada penambahan 80% NaCl. Sedangkan densitas akan menurun seiring dengan bertambahnya persentase NaCl. Densitas yang didapat yaitu 2,63 g/cm^3 pada 0% NaCl, 2,12 g/cm^3 pada 20% NaCl, 1,76 g/cm^3 pada 40% NaCl, 1,4 g/cm^3 pada 60% NaCl, dan 0,82 g/cm^3 pada 80% NaCl. Ukuran rata-rata pori pada aluminium meningkat seiring bertambahnya persentase NaCl yaitu 403,75 μm pada 20% NaCl, 422,50 μm pada 40% NaCl, 446,86 μm pada 60% NaCl, dan 500,25 μm pada 80% NaCl. Kekuatan tekan akan menurun seiring bertambahnya persentase NaCl yaitu 370,968 MPa pada 0% NaCl, 271,107 MPa pada 20% NaCl, 245,692 MPa pada 40% NaCl, 222,524 MPa pada 60% NaCl, dan 19,718 MPa pada 80% NaCl.

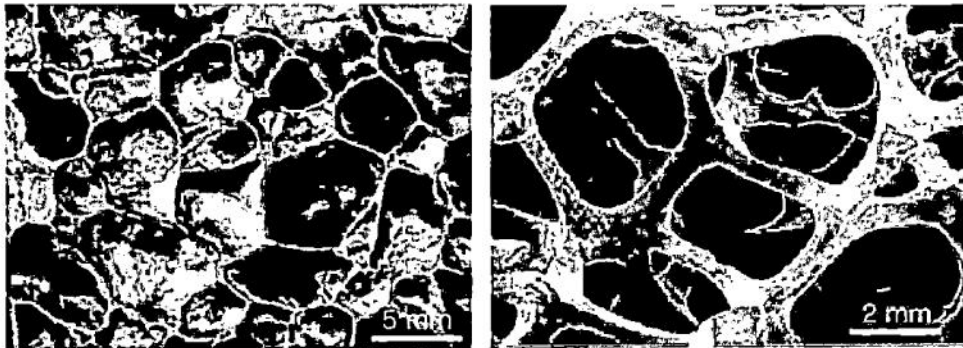
Malekjafarian, dkk. (2011) melakukan penelitian untuk membuat *aluminium foam* dengan metode *melt route process* dan mengetahui pengaruh persentase volume partikel silikon karbida (SiC) pada struktur sel serta sifat mekanik pada *aluminium foam*. Material yang digunakan sebagai bahan dasar adalah aluminium paduan seri A356 dan partikel keramik berupa SiC dengan kemurnian 98% digunakan sebagai partikel penstabil gelembung gas. Partikel SiC yang digunakan adalah 5%, 10%, 15%, dan 20%. Suhu peleburan yang digunakan yaitu 650-700°C dengan kecepatan pengadukan 1400 rpm. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa ukuran sel pada *aluminium foam* akan meningkat seiring meningkatnya persentase volume partikel SiC dengan ukuran sel terbesar pada variasi 20% volume SiC yaitu 20,5 mm. Kekuatan tekan akan meningkat seiring meningkatnya persentase volume partikel SiC dengan nilai kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada variasi 20% volume SiC yaitu sebesar 0,35 MPa. Sedangkan porositas semakin menurun seiring bertambahnya SiC dengan porositas terendah sebesar 88% pada variasi 20% volume SiC dan porositas tertinggi sebesar 96% pada variasi 5% volume SiC.

Vinay dan Rao (2012) melakukan penelitian dengan cara *melt route process* namun menggunakan metode yang berbeda-beda dengan NaCl sebagai *foaming agent*. Metode yang dilakukan adalah dengan penuangan aluminium cair ke dalam cetakan pasir atau *sand mold* dan menggunakan NaCl sebagai *foaming agent* yang sebelumnya telah ditambahkan ke dalam cetakan pasir. Hasil penelitian tersebut menjelaskan bahwa penggunaan NaCl sebagai *foaming agent* mampu menghasilkan *foam* namun dengan hasil yang tidak memuaskan. Hal ini dapat dilihat dari porositas yang didapat hanya berkisar antara 11,48% - 28,14% dengan densitas (massa jenis) berkisar antara 1,94 gr/cm³ - 2,39 gr/cm³.

2.2. Metal Foam

Metal foam adalah suatu logam dengan pori-pori yang sengaja dipadukan dalam strukturnya. Istilah logam berpori adalah sebutan umum yang mengacu pada logam dengan porositas yang tinggi, sedangkan istilah logam busa berlaku untuk logam berpori yang dihasilkan dari proses *foaming* atau pembusaan

(Lefebvre, 2008). Dilihat dari struktur porinya, *metal foam* diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu *closed-cell foam* dan *open-cell foam*. *Closed-cell foam* adalah material seluler yang tiap selnya tertutup dengan lebar tiap selnya 3 mm. Sedangkan *open-cell foam* adalah material seluler yang tiap selnya terhubung dengan lebar selnya sekitar 5 mm (Kennedy, 2012). Jenis *metal foam* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. *Closed-cell Foam* (kiri) dan *Open-cell Foam* (kanan)
(Sumber: Kennedy, 2012)

2.3. *Aluminium Foam*

2.3.1. Aplikasi *Aluminium Foam*

Dengan sifatnya yang unik, *aluminium foam* banyak digunakan dalam industri contohnya dalam industri otomotif, penerbangan, perkapalan. *Aluminium foam* juga banyak diaplikasikan dalam konstruksi dan bangunan seperti jembatan dan juga dalam industri rumah tangga serta *furniture*.

2.3.1.1. Aplikasi *Aluminium Foam* Dalam Bidang Otomotif

Aplikasi *aluminium foam* di bidang otomotif banyak diterapkan pada mobil. *Aluminium foam* digunakan untuk konstruksi atau rangka mobil demi meningkatkan keselamatan pengemudi mobil pada saat terjadi kecelakaan. Sifat *aluminium foam* yang mampu menyerap energi mekanik yang baik inilah yang dimanfaatkan pada rangka kendaraan. Ada tiga aplikasi *aluminium foam* pada mobil yaitu penyerap energi mekanik, konstruksi yang ringan, dan sebagai peredam suara.

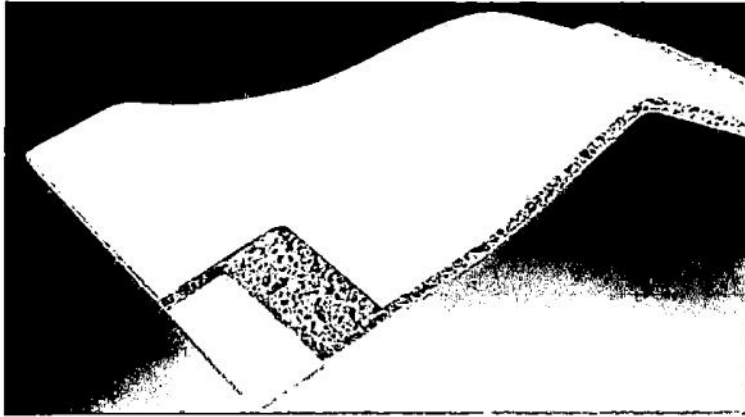
Aplikasi pertama dapat diilustrasikan pada saat terjadi kecelakaan pada mobil. Peran *aluminium foam* pada kasus ini adalah sebagai penyerap energi mekanik yaitu pada rangka atau sasis mobil yang terbuat dari *aluminium foam* atau *Aluminium Sandwich Foam (ASF)*. Contohnya dapat dilihat pada Gambar 2.2, gambar tersebut merupakan produk *aluminium foam* yang dapat diaplikasikan pada rangka mobil.



Gambar 2.2. Macam-macam Profil Rangka Mobil dengan *Metal Foam*
(Sumber: Kammer, 1999)

Aplikasi lain yaitu sebagai peredam suara yang digunakan untuk penutup mesin. Hal ini diterapkan untuk mengurangi kebisingan suara pada mesin mobil yang mungkin masuk ke bagian kabin mobil sehingga pengemudi akan merasa nyaman dan tidak akan terganggu oleh suara pada mesin.

Aplikasi yang juga digunakan pada mobil adalah untuk bagian atap mobil, pintu mobil, penutup bagasi, dan bagian-bagian lain yang memerlukan material lembaran yang cukup banyak. *Aluminium foam* digunakan pada bagian-bagian tersebut karena sifatnya yang ringan dapat mengurangi berat keseluruhan kendaraan. Contohnya dapat dilihat pada Gambar 2.3, gambar tersebut adalah produk *aluminium sandwich foam*.



Gambar 2.3. Profil Lembaran *Aluminium Sandwich Foam (ASF)*
(Sumber: Kammer, 1999)

2.3.1.2. Aplikasi *Aluminium Foam* Dalam Bidang Dirgantara

Sifat *aluminium foam* yang ringan menjadi sangat penting penggunaannya dalam industri kedirgantaraan. Contohnya yaitu penggunaan *aluminium foam* atau *aluminium sandwich foam* pada pesawat terbang dapat menggantikan penggunaan struktur sarang lebah yang relatif lebih mahal. Keuntungan penggunaan *aluminium foam* dalam bidang ini yaitu dapat menghemat biaya dan juga sebagai material yang tahan api. Hal ini dapat berguna pada saat terjadi kebakaran pada pesawat terbang. Namun hingga saat ini masih perlu dilakukan penelitian tentang perilaku kelelahan *aluminium foam* dan *aluminium sandwich foam*.

2.3.1.3. Aplikasi *Aluminium Foam* Dalam Bidang Perkapalan

Penggunaan *aluminium foam* dalam pembuatan bagian-bagian kapal juga dirasa penting. Karena *aluminium foam* mempunyai sifat yang ringan dapat mengurangi berat kapal secara keseluruhan. Terlebih pada kapal memerlukan banyak bahan sehingga jika menggunakan *aluminium foam* akan mengurangi bobot kapal.

2.3.1.4. Aplikasi *Aluminium Foam* Untuk Konstruksi dan Bangunan

Aluminium foam biasanya digunakan pada konstruksi jembatan seperti yang terlihat pada Gambar 2.4, gambar tersebut adalah jembatan layang yang

menggunakan produk *aluminium foam* pada beberapa bagian konstruksinya.

Pada bangunan seperti gedung, *aluminium foam* digunakan pada bagian dinding sebagai peredam suara dan juga bermanfaat pada saat terjadi kebakaran. Selain itu *aluminium foam* juga dapat digunakan sebagai struktur peredam suara pada terowongan kereta api dan dapat menyerap suara bising yang dapat diaplikasikan pada bagian bawah sebuah jembatan layang (Kammer, 1999).



Gambar 2.4. Jembatan Layang (*Foam* Alporas, Shinko Wire, Jepang)
(Sumber: Kammer, 1999)

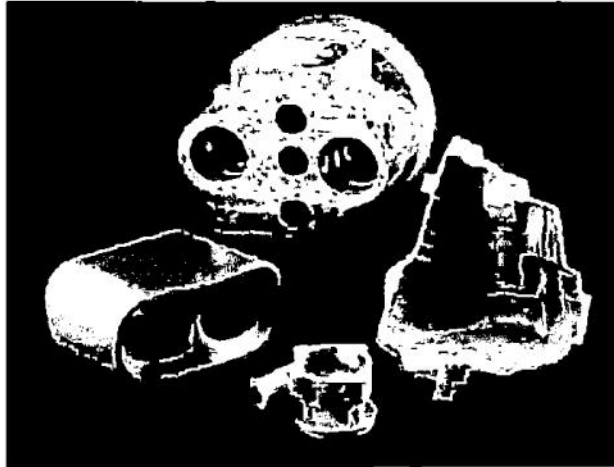
2.3.1.5. Aplikasi *Aluminium Foam* Dalam Industri Rumah Tangga dan Furniture

Aluminium foam sangat menarik bagi para disainer, oleh sebab itu banyak disainer membuat berbagai macam bentuk produk properti rumah tangga. Aplikasinya dalam industri rumah tangga dan *furniture* dapat berupa lampu, meja, dan properti lainnya. Jika dikombinasikan dengan kayu maka *aluminium foam* dapat membawa efek baru dalam ruangan dan tentunya keadaan di dalam ruangan baik rumah maupun kantor menjadi lebih menarik dan unik.

2.3.1.6. Aplikasi *Aluminium Foam* Dalam Teknik Rekayasa

Aluminium foam juga dapat diaplikasikan untuk produk-produk teknik. Misalnya pada alat penukar kalor, juga dapat diaplikasikan pada langit-langit dan

dinding kamar yang berisi peralatan elektronik (Kammer, 1999). Beberapa contoh peralatan teknik dari *aluminium foam* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Peralatan Teknik dari *Aluminium Foam* (Sumber: Kammer, 1999)

2.3.2. Proses Pembuatan *Aluminium Foam*

Material logam yang paling sering digunakan untuk pembuatan *metal foam* adalah aluminium. *Aluminium foam* mempunyai karakteristik yang unik sehingga banyak diaplikasikan pada industri manufaktur. Pada dasarnya *aluminium foam* dapat dibuat dengan dua cara yaitu *solid route process* atau metalurgi serbuk (*powder metallurgy*) dan metode cair (*melt route process*).

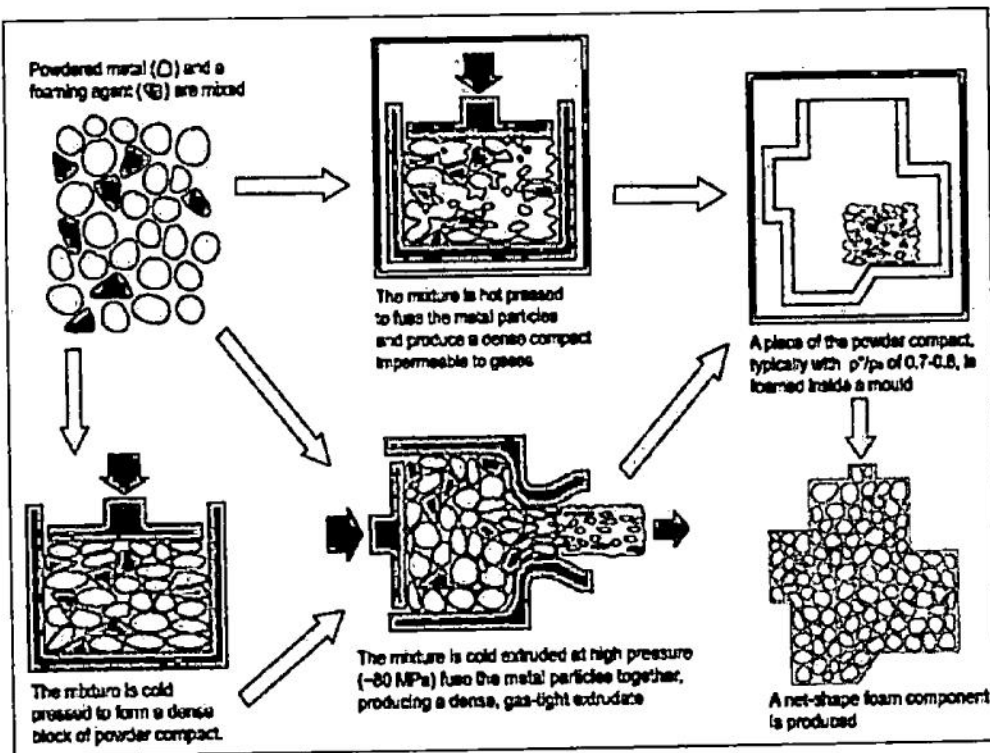
2.3.2.1. Pembuatan *Aluminium Foam* dengan *Solid Route Process*

Pembuatan *aluminium foam* dengan metode *solid route process* sebenarnya ada beberapa cara dan berbeda-beda penyebutannya, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Kompaksi antara Serbuk Aluminium dengan *Foaming Agent (Foamingal)*

Proses pembuatan *aluminium foam* dengan metode ini diawali dengan mencampurkan serbuk logam (logam murni, paduan, atau pun campuran) dengan serbuk *foaming agent*. Setelah itu campuran tersebut dikompaksi sampai padat sehingga didapatlah produk setengah jadi (*precursor*). Kompaksi harus dilakukan

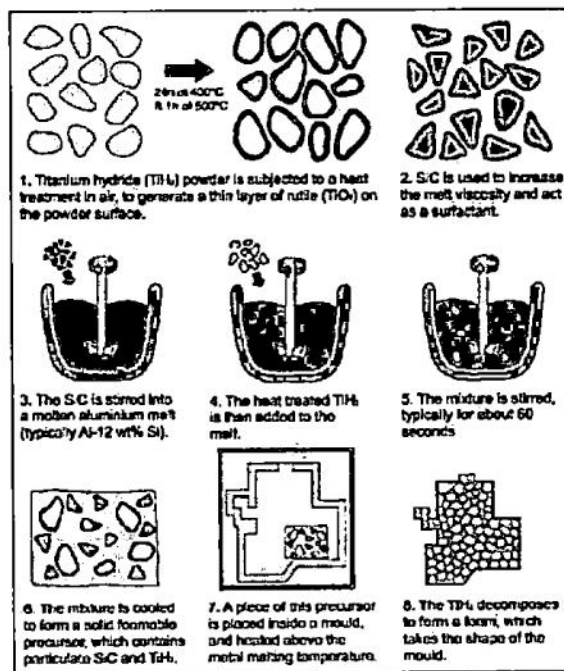
dengan teknik tertentu sehingga *foaming agent* akan menempel pada matriks logam tanpa adanya sisa porositas. Contoh metode kompaksi yang lazim digunakan adalah dengan *uniaxial* atau *isostatic compression*, *rod extrusion* atau *power rolling*. Pembuatan *precursor* harus dilakukan dengan hati-hati karena sisa-sisa porositas atau cacat lain akan menyebabkan hasil yang buruk setelah dilakukan proses lanjutan. Langkah selanjutnya adalah dengan melelehkan matriks logam yang sekaligus menyebabkan *foaming agent* terdekomposisi. Gas yang dilepaskan akan menghasilkan gaya untuk mengekspansi *precursor* sehingga terbentuklah struktur dengan ukuran pori yang relatif besar. Waktu yang diperlukan untuk mengekspansi tergantung parameter temperatur dan ukuran *precursor*. Material aluminium dan paduannya, seng, kuningan, timah, emas, dan logam lainnya dapat dibentuk menjadi *foam* dengan memilih *foaming agent* dan parameter proses yang cocok (Helmi, 2008). Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Skema Metode Kompaksi antara Serbuk Aluminium dengan *Foaming Agent* (Sumber: Helmi, 2008)

2. *Foaming of Ingots Containing Foaming Agents (Foamgrip)*

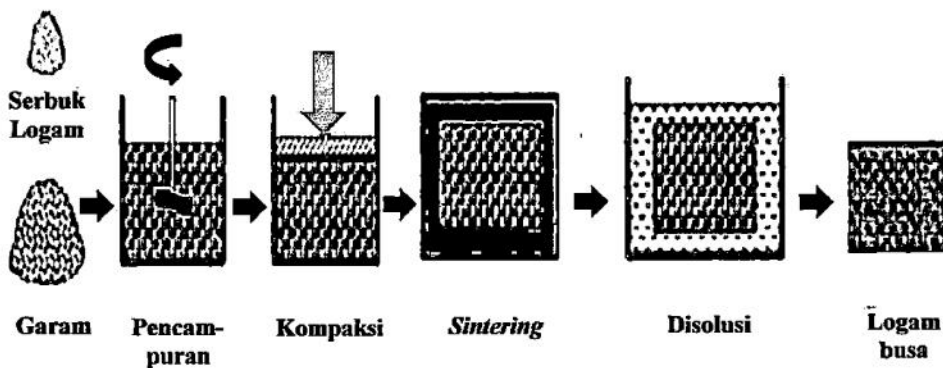
Material *precursor* juga dapat dibuat tanpa menggunakan serbuk logam. Caranya adalah dengan mencampurkan partikel *titanium hydride* (TiH_2) ke dalam logam cair, sesaat setelah cairan logam akan membeku. Hasil *precursor* yang didapatkan selanjutnya diproses dengan metode yang sama dengan yang sebelumnya. Untuk menghindari pembentukan dini gas hidrogen saat pencampuran, maka pembekuan harus dilakukan dengan cepat atau dengan menggunakan *foaming agent* yang “dipasifkan” sehingga mencegah pelepasan gas yang berlebihan dalam tahapan ini. Salah satu metodenya adalah dengan menggunakan mesin *die-casting*. Serbuk hidrida diinjeksikan ke dalam cetakan (*die*) bersamaan dengan logam cair. Tantangan permasalahan yang harus dihadapi adalah cara untuk mendapatkan distribusi serbuk TiH_2 yang terdistribusi secara homogen. Sebagai alternatif, serbuk TiH_2 dapat ditambahkan ke dalam cairan logam dengan pengadukan lambat dan pendinginan lanjutan. Untuk mendapatkan *foam* yang stabil, maka sering digunakan partikel SiC sekitar 10-15 % volume (Helmi, 2008). Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Skema *Foaming of Ingots Containing Foaming Agents*
(Sumber: Helmi, 2008)

3. *Sintering Dissolution Process (SDP)*

Metode ini merupakan proses pembuatan *aluminium foam* melalui *solid route process* dengan sepenuhnya menggunakan proses metalurgi serbuk dan diikuti proses disolusi untuk pembentukan porinya. Kelebihan dari metode ini adalah produk memiliki bentuk yang hampir sama dengan cetakan. Namun tentunya juga memiliki kekurangan seperti banyaknya faktor yang mempengaruhi hasil *aluminium foam*. Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Skema Metode *Sintering Dissolution Process*
(Sumber: Effendi, 2008)

2.3.2.2. Pembuatan *Aluminium Foam* dengan *Melt Route Process*

Pembuatan *aluminium foam* dengan metode cair atau *melt route process* ada beberapa cara, diantaranya yaitu:

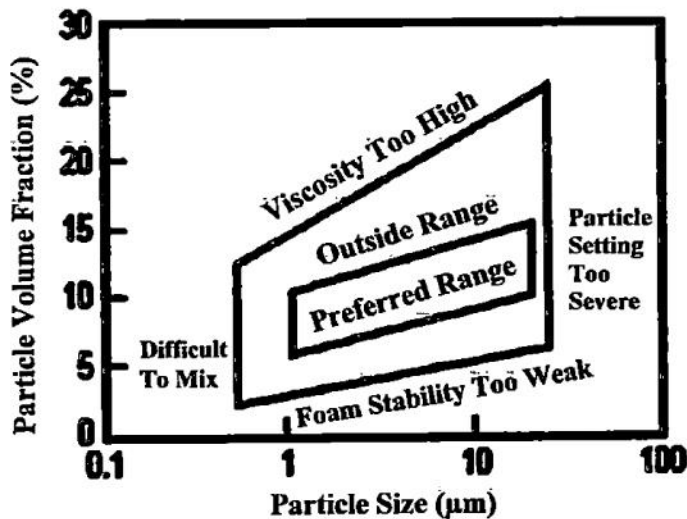
1. Dengan menginjeksikan gas ke dalam logam cair yang berfungsi untuk pemerataan gelembung gas di dalam cairan aluminium dan metode ini disebut *Alcan* atau *Norsk Hydro Process*,
2. Dengan mempresipitasikan gas yang sebelumnya telah terlarut di dalam fasa cair yang dikenal dengan sebutan *Gasar*,
3. Dengan infiltrasi pada pola yang dapat dibuang (*investment casting*), dan
4. Dengan menambahkan *foaming agent* ke dalam logam cair sebagai pengganti gas atau biasa disebut metode *Alporas*.

1. Injeksi Gas Secara Langsung (*Alcan/Norsk Hydro Process*)

Metode ini pertama kali digunakan untuk membuat *aluminium foam* oleh perusahaan Hydro Aluminium di Norwegia, dan Cymat Aluminium Corporation di Kanada.

Pada metode ini, untuk meningkatkan nilai kekentalan aluminium cair biasanya digunakan partikel penguat seperti, *aluminium-oxide*, *silicon carbide* (SiC), atau *magnesium oxide* sehingga kecenderungan gelembung gas yang terdapat pada aluminium cair untuk naik ke permukaan cairan aluminium dapat dihambat. Tahapan yang dilakukan pada metode ini adalah mencairkan aluminium yang telah mengandung salah satu partikel. Campuran ini biasa disebut sebagai *metal matrix composite*. Akan tetapi untuk dapat memperoleh distribusi partikel yang merata di dalam cairan aluminium sangat sulit sehingga biasanya digunakan aluminium yang telah dipadukan atau aluminium paduan.

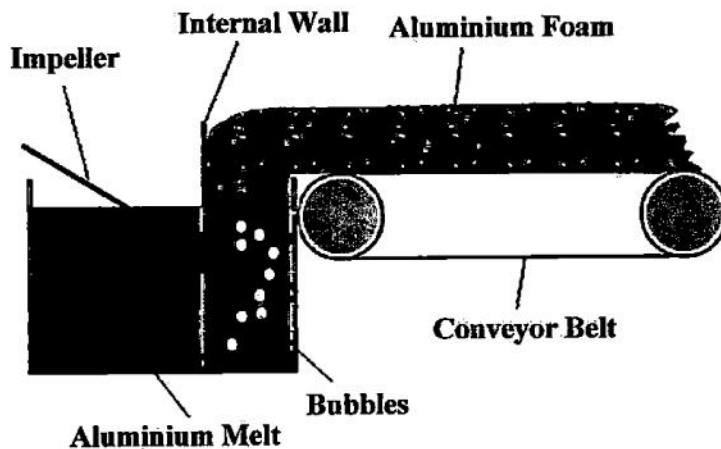
Fraksi volume dari partikel penguat adalah 10% - 20% dengan ukuran partikel rata-rata 5 μm - 20 μm . Apabila ukuran partikel terlalu kecil atau terlalu besar maka akan muncul masalah pada kemampuan pencampuran (*difficult to mix*), kekentalan lelehan logam dan kestabilan *metal foam* yang terbentuk. Oleh karena itu ukuran dan fraksi volume partikel penguat harus berada pada rentang yang diperbolehkan (Agustian, 2012). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.9.



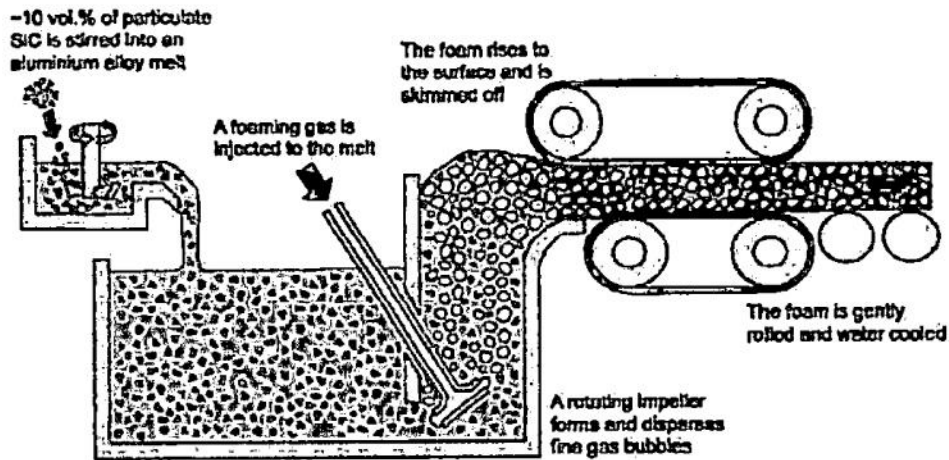
Gambar 2.9. Rentang Ukuran dan Fraksi Volume yang diperbolehkan untuk *Metal Foam* (Sumber: Agustian, 2012)

Tahapan selanjutnya yaitu injeksi gas (udara, nitrogen atau argon) dengan menggunakan *vibrating nozzle* atau *rotating impeller* yang akan membantu untuk pemerataan gelembung gas di dalam cairan aluminium. Campuran aluminium cair dan gelembung gas akan mengapung ke bagian atas cairan aluminium kemudian akan mengalami proses pembekuan.

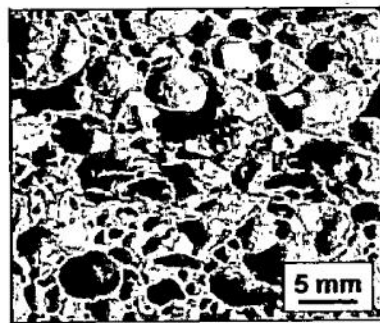
Densitas *aluminium foam* yang dihasilkan $0,069 \text{ gr/cm}^3 - 0,54 \text{ gr/cm}^3$, ukuran pori-pori yang dihasilkan antara 3 mm - 25 mm dan ketebalan *aluminium foam* yang bisa dihasilkan mulai dari 50 μm (Agustian, 2012). Produk yang dihasilkan berupa *aluminium foam* dengan metode ini mempunyai porositas berkisar antara 80% - 97% (Kammer, 1999). Adapun parameter yang mempengaruhi hasil pada metode ini adalah kecepatan aliran gas, kecepatan *impeller*, dan frekuensi getaran *nozzle*. Gaya gravitasi juga mempengaruhi proses pengeringan sehingga akan mempengaruhi produk *aluminium foam*. Produk cenderung memiliki gradien pada densitas, ukuran pori-pori, dan pemanjangan pori-pori (*pores elongation*). Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.10 dan lebih detail pada Gambar 2.11 serta hasil *aluminium foam* pada Gambar 2.12.



Gambar 2.10. Skema Metode Injeksi Gas Secara Langsung
(Sumber: Kammer, 1999)



Gambar 2.11. Skema Detail Metode Injeksi Gas Secara Langsung
(Sumber: Agustian, 2012)



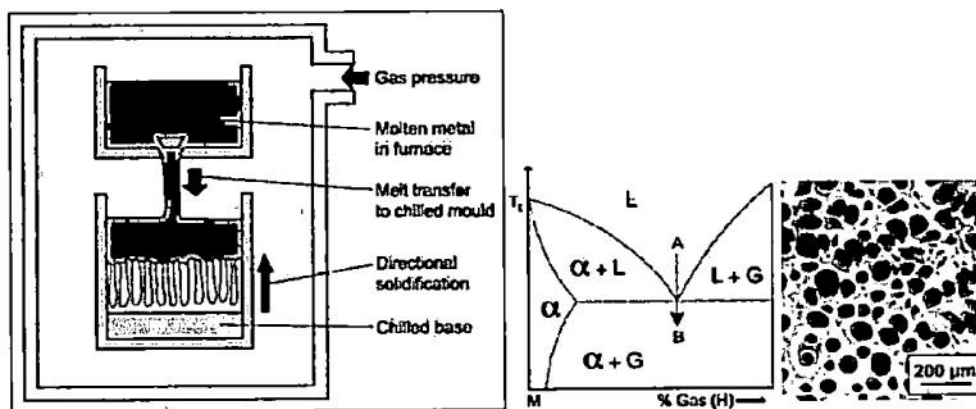
Gambar 2.12. Penampang Melintang Hasil *Aluminium Foam* dengan Metode Injeksi Gas Secara Langsung (Sumber: Helmi, 2008)

2. *Solid-Gas Eutectic Solidification (Gasar)*

Metode ini telah dikembangkan sejak beberapa dekade yang lalu, dengan berlandaskan pada teori bahwa ada beberapa jenis logam yang memiliki sistem *eutectic* bersama dengan gas hidrogen. Jika logam ini dilelehkan pada kondisi lingkungan mengandung hidrogen dan tekanan tinggi (di atas 50 bar), maka diperoleh lelehan logam dan hidrogen yang homogen. Kemudian jika temperatur diturunkan di bawah temperatur leleh logam, maka akan tumbuh presipitat gas. Lelehan logam akan mengalami transisi *eutectic* yaitu menjadi lelehan yang memiliki fasa heterogen (*solid + gas*). Pada saat logam mengalami proses

pembekuan, gas-gas akan berusaha keluar dari lelehan. Namun gas-gas tersebut terperangkap di dalam lelehan sehingga akan diperoleh suatu logam yang mengandung pori-pori. Morfologi yang diperoleh tergantung pada tekanan lelehan logam, kandungan gas, komposisi kimia dari lelehan logam, dan laju pelepasan panas.

Pada umumnya, bentuk pori yang akan didapat berupa pori besar yang memanjang sesuai arah pembekuan. Diameter pori berkisar antara $10\ \mu\text{m}$ - $10\ \text{mm}$ dan panjang pori berkisar antara $100\ \mu\text{m}$ - $300\ \text{mm}$ (Helmi, 2008). Porositas yang dapat diperoleh yaitu 5% - 75% (Kammer, 1999). Sementara itu, kata “*Gasar*” berasal dari akronim Rusia yang berarti “*gas-reinforced*”. Saat ini metode ini telah diadaptasi oleh Jepang dengan sebutan “*lotus-structure*” karena menyerupai akar *lotus* (teratai). Skema dan hasil *aluminium foam* dari metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.13.

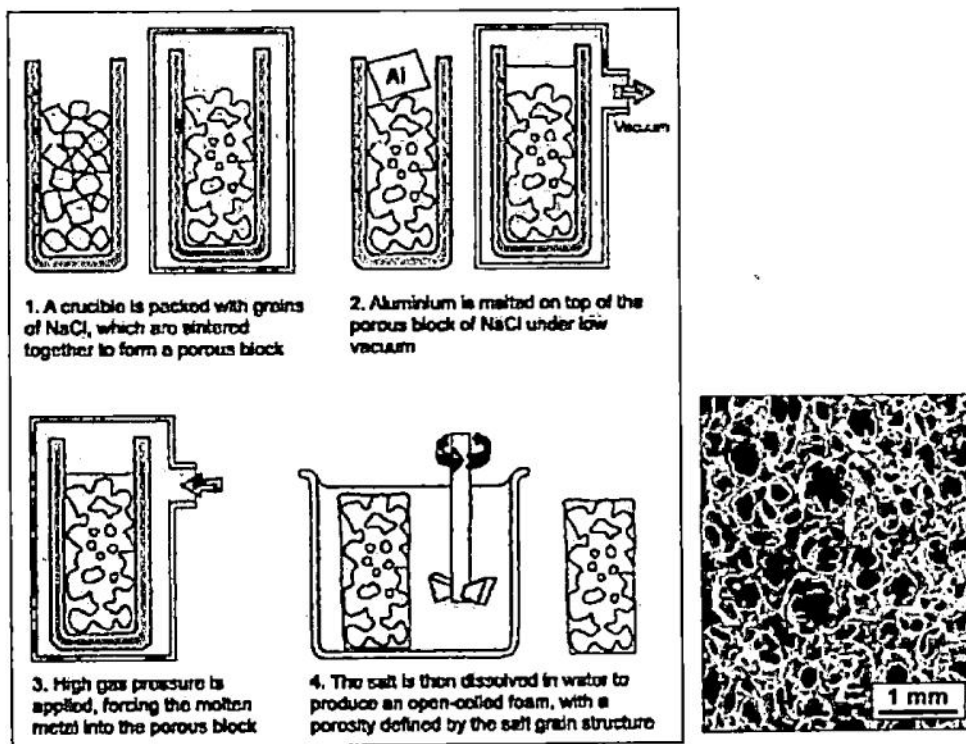


Gambar 2.13. Skema Metode *Solid-Gas Eutectic Solidification* dan Hasil *Aluminium Foam* (Sumber: Helmi, 2008)

3. Infiltrasi Pada Pola yang Dapat Dibuang (*Investment Casting*)

Metode ini merupakan salah satu cara pembuatan *aluminium foam* dengan sel terbuka menggunakan pola yang dapat dibuang (*disposable*). Pola yang sering digunakan adalah garam (NaCl). Ada 3 cara yang dapat dilakukan pada metode *investment casting* ini. Pertama, menggunakan NaCl yang disinter pada atmosfer udara selama beberapa jam agar terjadi penggabungan butir pada NaCl .

Aluminium dicairkan kemudian dituang ke dalam pori pola NaCl agar terjadi proses infiltrasi. Setelah itu pembekuan akan terjadi dan pola/cetakan garam dilarutkan ke dalam air sehingga diperoleh *aluminium foam* dengan sel terbuka dengan ukuran sel 3–4 mm. Yang perlu diperhatikan adalah pemanasan awal pola NaCl. Hal ini untuk mengurangi kecenderungan aluminium cair membeku terlalu cepat sebelum memenuhi semua rongga-rongga pola NaCl. Selain itu juga diperlukan kombinasi antara keadaan vakum pada pola sebelum penuangan dan tekanan tinggi selama proses infiltrasi. Hal ini untuk mendapatkan struktur sel yang lebih halus. Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.14.



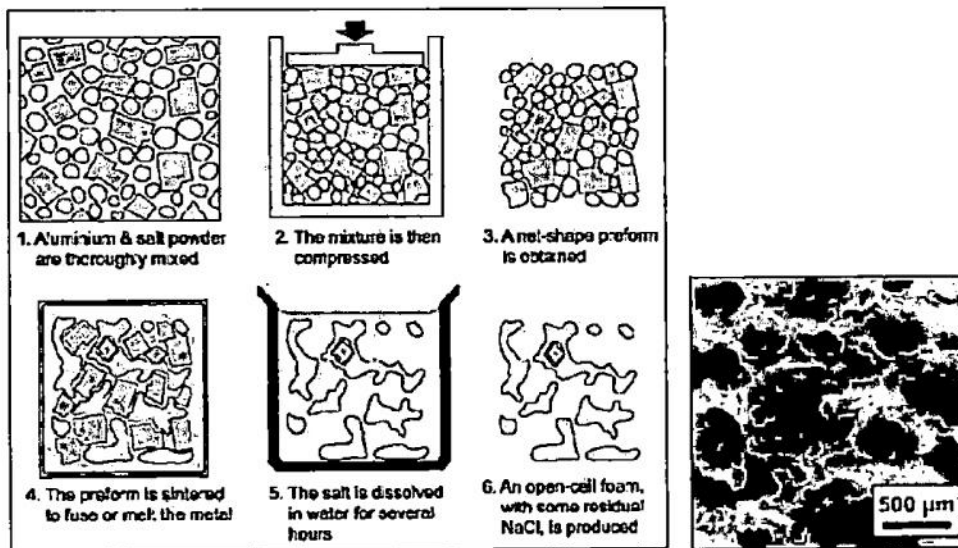
Gambar 2.14. Skema Metode *Investment Casting* dengan Pola Garam dan Hasil *Aluminium Foam* (Sumber: Helmi, 2008)

Foam yang dihasilkan dapat mempunyai ukuran sel sekecil 400 μm dengan ρ^*/ρ sebesar 0,2-0,3. 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 (Helmi, 2008).

Cara ke-dua dari metode *investment casting* adalah menggunakan serbuk aluminium dan serbuk garam. Kemudian keduanya dicampur lalu dikompaksi sehingga terbentuk "blok" padat dan disinter pada temperatur di antara titik leleh aluminium dan garam. Setelah itu, dilanjutkan dengan pelarutan garam dan akan diperoleh *foam*. Proses ini tidak digunakan untuk penggunaan yang luas karena prosesnya cukup rumit dan relatif mahal karena menggunakan serbuk aluminium.

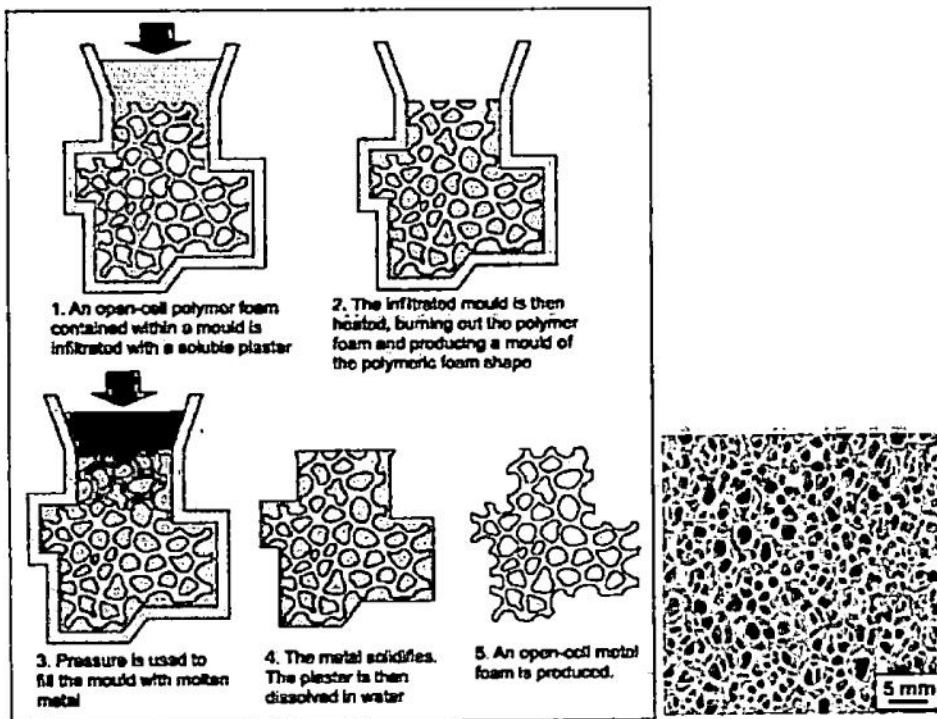
Proses ini menghasilkan *foam* dengan $\rho^*/\rho > 0,2$ dan hasil proses ini menghasilkan sambungan antara garam yang lebih sedikit, sehingga menghasilkan produk yang lebih padat, struktur pori yang kecil dan sering kali meninggalkan sisa NaCl (Helmi, 2008). Skema dan hasil *aluminium foam* dari metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Skema Metode *Investment Casting* dengan Pencampuran Serbuk Aluminium dan Serbuk Garam dilanjutkan dengan Pelarutan dan Hasil *Aluminium Foam* (Sumber: Helmi, 2008)

Cara ke-tiga dari metode *investment casting* adalah dengan menggunakan *foam polymer* bersel terbuka sebagai pola. Prosesnya yaitu *polymer (polyurethane)* diinfiltrasi dengan plester kemudian dibakar untuk menghilangkan *polymer*. Cetakan yang tersisa diisi oleh aluminium cair, sering kali dibantu dengan kombinasi antara keadaan vakum dan tekanan eksternal. Kemudian pada akhir proses, plester dilarutkan.

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 pola garam. Variasi porositas dapat diatur dengan penggunaan cetakan *polymer*. Duocel™, merupakan salah satu produk yang diproses dengan metode ini. Aplikasi penggunaannya antara lain sebagai *heat exchanger*, elektroda berpori, dan filter kimia (Helmi, 2008). Skema dan hasil *aluminium foam* dari metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.16.

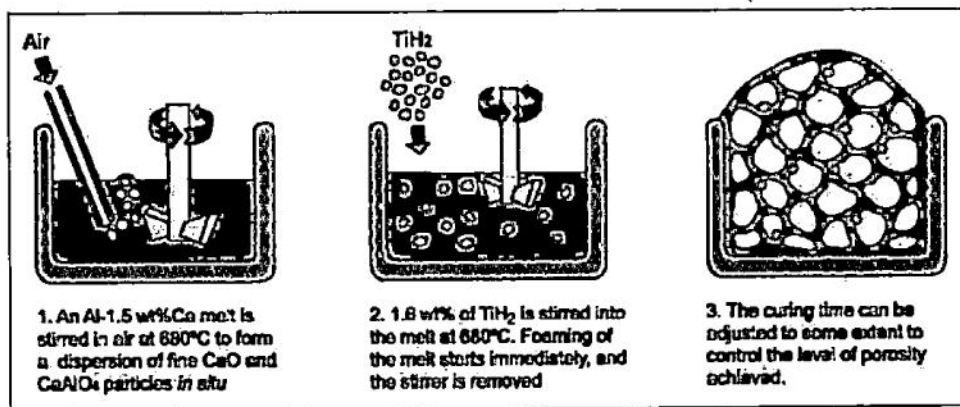


Gambar 2.16. Skema Metode *Investment Casting* dengan Pola *polymer* dan Hasil *Aluminium Foam* (Sumber: Helmi, 2008)

4. Menggunakan *Foaming Agent* (*Alporas*)

Metode ini merupakan salah satu cara untuk membuat *aluminium foam* yaitu dengan menambahkan *foaming agent* atau agen penghasil gas ke dalam aluminium cair. *Foaming agent* akan terdekomposisi karena terpengaruh oleh temperatur, sehingga akan melepaskan gas. Gas inilah yang dimanfaatkan untuk proses *foaming*.

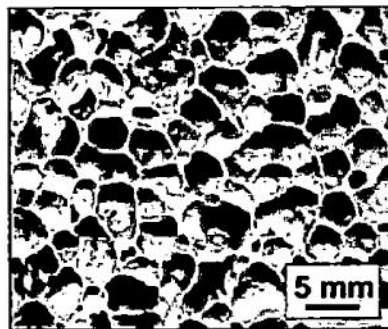
Shinko Wire Co, Amagasaki (Jepang) telah memproduksi *aluminium foam* dengan cara ini sejak tahun 1986, dengan kapasitas produksi yang dilaporkan sebesar 1 ton per hari. Selain itu, perusahaan Cina, *Jiangsu Tianbo Light-Weight Materials* di Nanjing juga telah dapat memproduksi hal yang serupa (Helmi, 2008). Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17. Skema Metode *Foaming Agent* (Sumber: Helmi, 2008)

Pada skema di atas, proses pertama yang dilakukan adalah memasukkan kalsium sebanyak 1,5% ke dalam aluminium cair dengan temperatur 680°C. Kemudian aluminium cair yang sudah ditambahkan kalsium ini diaduk beberapa menit. Hal ini untuk meningkatkan viskositas atau kekentalan secara bertahap karena terbentuknya oksida (CaAl_2O_4). Setelah itu titanium hidrida (TiH_2) ditambahkan (sekitar 1,6% berat) ke dalam aluminium cair. Kemudian dilakukan pengadukan (*stirring*) selama beberapa menit. *Stirring* dilakukan dengan tujuan agar TiH_2 dapat tercampur secara merata dengan cairan aluminium. TiH_2 berfungsi sebagai *foaming agent* untuk melepaskan gas hidrogen. Aluminium cair

akan mengembang secara perlahan dan secara bertahap akan mengisi bejana proses. Proses ini membutuhkan waktu sekitar 15 menit. Setelah bejana mendingin di bawah temperatur leleh, maka akan diperoleh *aluminium foam*. Kemudian *aluminium foam* dikeluarkan dari cetakan untuk dilakukan proses selanjutnya. Pembuatan *aluminium foam* dengan metode ini mempunyai brand dagang Alporas™, dan *aluminium foam* yang dihasilkan mempunyai struktur pori yang relatif merata seperti yang terlihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18. Hasil *Aluminium Foam* dengan Metode *Foaming Agent*
(Sumber: Helmi, 2008)

2.4. Material

2.4.1. Aluminium

Logam aluminium adalah unsur ketiga terbanyak di dunia yang memiliki peranan sangat penting dalam aplikasi di bidang industri dan otomotif. Aluminium memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan logam lain, khususnya baja. Tetapi jika aluminium dipadukan (*alloying*) dengan unsur lain seperti silikon (Si), magnesium (Mg), atau tembaga (Cu) akan memiliki sifat fisik dan mekanik yang baik diantaranya:

1. *Yield strength* meningkat.
2. Lebih tahan korosi.
3. *Thermal conductivity* yang baik.

Secara umum karakteristik atau sifat-sifat fisik dan mekanik aluminium dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik Aluminium (Sumber: Effendi, 2008)

Karakteristik Aluminium	
Nama senyawa	Aluminium
Rumus kimia	Al
Nomor atom	13
Berat atom	27 g/mol
Diameter atom	0,268 Nm
Densitas	2,7 g/cm ³
Struktur kristal	FCC
Temperatur lebur	660°C
Temperatur didih	2467°C
Modulus Elastisitas	71 GPa
<i>Yield strength</i>	25 MPa
<i>Poisson Ratio</i>	0,35
<i>Hardness</i>	15 VHN
Kekuatan luluh	25 MPa
Ketangguhan	33 Mpa√m
Konduktivitas panas	237 W/m ^o K
Kapasitas panas	917 J/Kg ^o C
Ketahanan terhadap korosi	Sangat baik
<i>Machinability</i>	Baik
<i>Formability</i>	Baik

Sebagai tambahan referensi untuk kekuatan tekan aluminium khususnya seri 6061-T651 adalah 673 MPa (Chait dan Papirno, 1983:46).

2.4.2. *Foaming Agent*

Foaming agent atau agen penghasil gas merupakan bahan yang biasanya ditambahkan ke dalam aluminium cair pada proses pembuatan *aluminium foam*. Dalam pembuatan *aluminium foam* ada beberapa bahan kimia yang bisa digunakan sebagai *foaming agent* seperti titanium hidrida (TiH₂), zirkonium hidrida (ZrH₂), dan magnesium hidrida (MgH₂) (Duarte dan Banhart, 2000).

Namun selain bahan tersebut kalsium karbonat (CaCO_3) dan garam dapur atau natrium klorida (NaCl) juga biasanya digunakan sebagai *foaming agent*.

2.4.2.1. Penggunaan *Foaming Agent*

Pada prinsipnya, setiap material yang stabil pada temperatur kamar namun dapat melepaskan gas saat kenaikan temperatur, maka material ini dapat berpotensi sebagai *foaming agent*. Material yang termasuk dalam *foaming agent* adalah bahan inorganik hidrat seperti kalsium klorida, *cupric* sulfat, dan barium iodida. Termasuk juga mineral yang memiliki lapisan hidrat seperti *vermiculite*. Ketika material ini dipanaskan di atas temperatur dekomposisinya ($400 - 1300^\circ\text{C}$), maka bahan ini akan terhidrasi dan uap air yang terlepas dapat digunakan untuk mengembangkan (*foaming*) cairan logam. Senyawa logam termasuk hidrida, oksida, nitrida, sulfida, karbonat, dan klorida juga cocok digunakan (Helmi, 2008).

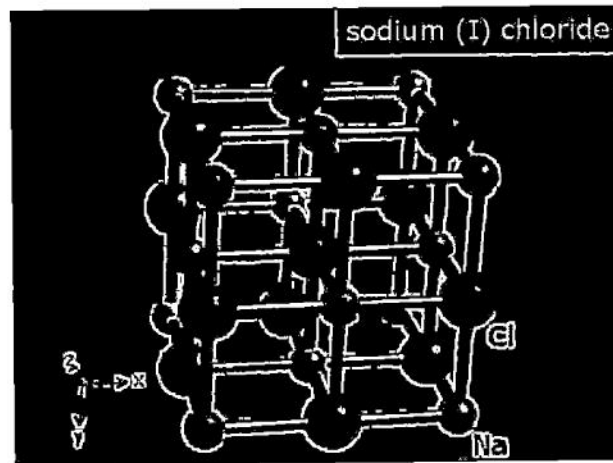
Pembuatan *aluminium foam* dengan menggunakan *foaming agent* mempunyai keuntungan yaitu serbuk *foaming* dapat terdispersi secara efisien di dalam aluminium cair dengan pengadukan sebelum terjadi dekomposisi termal. Proses penggelembungan yang terjadi di dalam cairan aluminium adalah secara langsung, maka ada kecenderungan alami gelembung untuk naik ke permukaan aluminium cair juga adanya efek dorongan dari gelembung yang bersebelahan. Selain itu, pengadukan cairan aluminium setelah bertambahnya gelembung juga perlu diperhatikan karena jika hal ini dilakukan maka dapat menyebabkan penggabungan sel dan juga pengempesan *foam* secara cepat. Senyawa penghasil gas harus memiliki densitas yang relatif sama dengan lelehan agar bahan penghasil gas dapat terdispersi secara merata.

Jika membandingkan penambahan gas secara langsung yang memproduksi gelembung secara sesaat, maka penggunaan *foaming agent* memberikan dekomposisi kimia secara gradual dan ekspansi gelembung secara progresif. Hal ini memberikan kesempatan pada gelembung untuk menyusun kembali sehingga variasi densitas lokal dapat dihindari. Partikel penstabil dapat membantu

penyusunan pori juga menstabilkan permukaan dengan bantuan reaksi kimia antara gelembung gas dan aluminium cair (Helmi, 2008).

2.4.2.2. NaCl

Sodium Chloride atau *Natrium Chloride* (NaCl) adalah senyawa anorganik yang berarti senyawa tersebut tidak mengandung karbon dan hidrogen dalam satu molekul. NaCl biasa dikenal sebagai garam dapur. Garam terbentuk dari atom bermuatan positif yang disebut kation. Kation akan menarik atom bermuatan negatif yang disebut anion. Hal ini dikenal sebagai ikatan ion dan merupakan kunci dalam mempertahankan struktur kimia garam. Salah satu dari garam-garam yang paling penting di alam dan pada sistem biologis adalah natrium klorida. Struktur *solid state* NaCl dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Struktur *Solid State* NaCl (Sumber: Winter, 2015)

Natrium klorida terbentuk ketika atom natrium berinteraksi dengan atom klorin. Ketika hal tersebut terjadi, natrium akan menyumbangkan elektron klorin (yang merupakan partikel bermuatan negatif). Hal ini membuat natrium sedikit positif dan klorin menjadi sedikit negatif. Pada akhirnya garam mengkristal dan memiliki sifat yang berbeda dari dua elemen induk (natrium dan klorin). Rumus natrium klorida adalah NaCl, yang berarti bahwa untuk setiap atom natrium terdapat satu atom klorida.

Natrium klorida memiliki massa molar 58,44 gram/mol. Sebagai garam, natrium klorida dapat larut dengan baik dalam air dan ion-ion dalam kristal akan memisahkan ketika dalam larutan. Molekul natrium klorida juga dapat bertumpukan satu sama lain dalam struktur, yang dikenal sebagai kisi. Karakteristik NaCl dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Karakteristik NaCl (Sumber: Hills, 2015)

Karakteristik NaCl	
Nama senyawa	<i>Sodium Chloride</i>
Rumus kimia	NaCl
Berat zat	58,443 g/mol
Warna	Tanpa warna atau ketika murni; bercak-bercak berwarna (e.g., biru, abu-abu) ketika tidak murni
Kilauan	Seperti kaca
Bentuk fisik	Transparan
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)

2.4.3. Al₂O₃

Alumina atau yang disebut *aluminium oxide* (Al₂O₃) termasuk ke dalam keramik modern. Alumina merupakan salah satu jenis keramik oksida yang keras dan digunakan untuk aplikasi yang luas. Beberapa aplikasi alumina antara lain *spark plugs*, *wear part*, *milling media*, dan *insulator*. Selain itu alumina merupakan material yang paling umum digunakan dalam produksi keramik teknis. Pertimbangan untuk pemilihan alumina karena beberapa alasan, antara lain:

1. Mempunyai kekerasan yang tinggi.
2. Ketahanan terhadap korosi dan aus yang baik.

3. Daya hantar listrik yang rendah.
4. Ekonomis dalam proses manufaktur.

Karakteristik Al_2O_3 dapat dilihat pada Tabel 2.3.

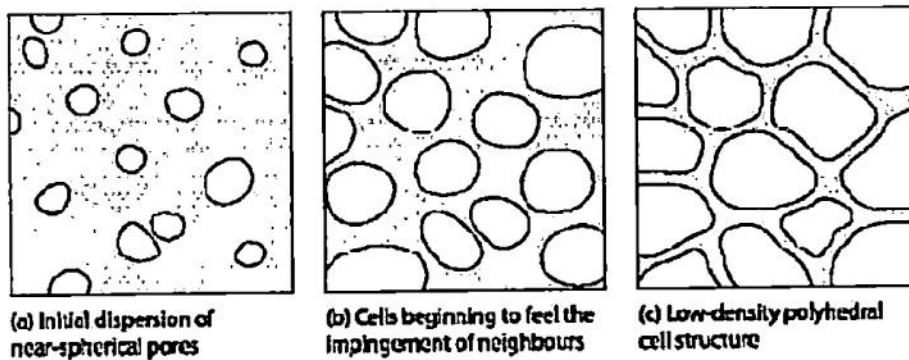
Tabel 2.3. Karakteristik Al_2O_3 (Sumber: Effendi, 2008)

Karakteristik Al_2O_3	
Nama senyawa	<i>Aluminium Oxide</i>
Rumus kimia	Al_2O_3
Titik lebur	2.015°C
Kekerasan	15 GPa
Densitas	3,96 g/cm ³
Koefisien termal ekspansi	8,3 x 10 ⁻⁶
<i>Fracture toughness</i>	4 MPa√m
<i>Elastic modulus</i>	386 GPa
<i>Linear coefficient of thermal expansion</i>	8 ppm/°C
<i>Flexure strength</i>	552 MPa

2.5. Tahapan Pembentukan Struktur *Foam*

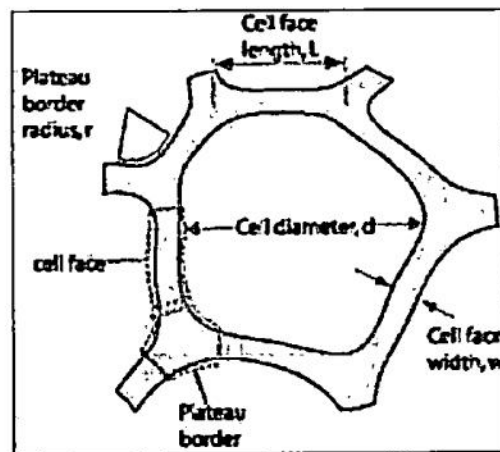
2.5.1. Penumbuhan Sel

Tahapan pembentukan struktur sel dapat dilihat pada Gambar 2.20. Bentuk sel *foam* awalnya dikontrol hanya oleh tegangan permukaan, selanjutnya membentuk pori bulat.



Gambar 2.20. Tahapan pembentukan struktur sel *Aluminium Foam* (Sumber: Helmi, 2008)

Kemudian dilanjutkan dengan pengembangan bentuk pori menjadi semakin angular. Pergerakan gelembung reaktif dengan gelembung lainnya semakin sulit, oleh karena itu membentuk jaringan tiga dimensi dari sel polihedral. Terminologi yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur sel *polyhedral* dari *aluminium foam* dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21. Terminologi dan Notasi Struktur Sel *Aluminium Foam*
(Sumber: Helmi, 2008)

2.5.2. Faktor Yang Mempengaruhi Stabilitas Struktur *Foam*

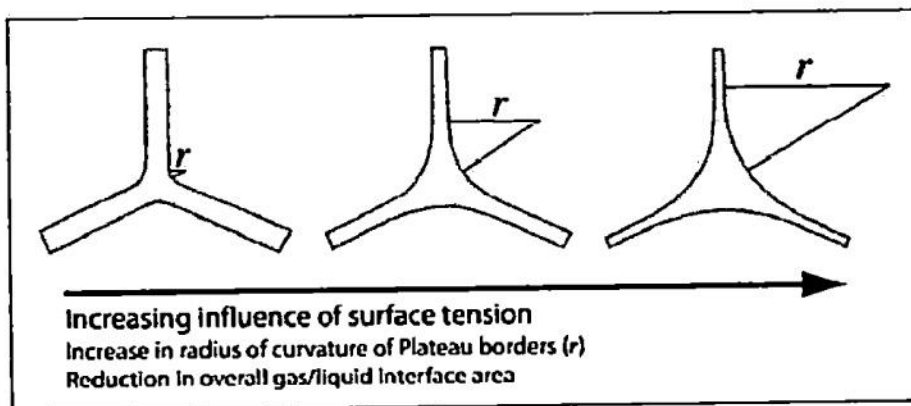
Ada beberapa faktor yang mempengaruhi stabilitas struktur *foam*, yang pertama yaitu adanya difusi gas. Pada *foam* cair, perbedaan tekanan yang terjadi di antara sel dengan ukuran berbeda akan menyebabkan pengasaran. Tekanan gas yang ada di dalam sel yang memiliki tekanan permukaan akan berbanding terbalik dengan radius lengkungannya. Pada prinsipnya, saat terjadi proses *foaming* maka akan berpotensi terjadinya difusi gas. Walaupun pada awalnya semua gelembung gas mempunyai ukuran yang sama, namun gelembung gas yang berada pada sisi terluar mempunyai lengkungannya sampai permukaan dan dapat meloloskan gas keluar atmosfer.

Faktor lain adalah pengaturan sel, yaitu jika dekomposisi pada sel yang berdekatan menunjukkan adanya perbedaan tekanan yang jauh dan tidak dapat

terakomodasi dengan difusi, maka sel-sel *foam* dapat mengatur kembali kemudian merubah sel terdekat (tetangganya) untuk kembali mendistribusikan tekanan. Kemungkinan yang dapat terjadi adalah permukaan sel dengan tegangan permukaan yang rendah dapat melengkung.

Faktor lainnya yang mempengaruhi stabilitas struktur *foam* adalah viskositas. Untuk menciptakan sel yang terdistribusi secara merata, gelembung gas harus dapat ditahan agar dapat terus berada di dalam logam cair sampai *foam* membeku atau dengan istilah lain kecepatan pergerakan naiknya gelembung ke permukaan perlu dikurangi. Pengaruh dari ukuran gelembung gas dan tingkat viskositas logam cair pada kecepatan terminal gelembung gas di dalam logam cair dapat diperoleh dengan cara menyeimbangkan kemampuan apung gelembung gas dengan tahanan logam cair karena viskositas.

Faktor lainnya adalah tegangan permukaan. Pada sel *polyhedral*, tegangan permukaan akan menyebabkan pembulatan bentuk sel dengan batas datar melebar dan permukaan sel menipis. Peristiwa ini akan dibarengi dengan pembekuan logam cair dari permukaan sel ke batas datar sel. Dengan membatasi efek tegangan permukaan pada gelembung, maka akan mengurangi *driving force* aliran material dari permukaan sel ke batas datar sel. Hal ini dikarenakan dapat merusak (menipiskan) permukaan sel. Efek tegangan permukaan pada batas sisi yang datar dapat dilihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22. Efek Tegangan Permukaan pada Batas Sisi yang Datar
(Sumber: Helmi, 2008)

Faktor yang terakhir yang dapat mempengaruhi stabilitas struktur *foam* adalah oksidasi pada aluminium. Permukaan aluminium *solid* juga dapat teroksidasi secara cepat meskipun laju oksidasi akan menurun saat mencapai batas ketebalan oksida pada permukaan. Batas ini dikenal dengan *Mott Thickness* dengan nilai 2 nm pada temperatur kamar dan relatif tidak sensitif terhadap tekanan parsial oksigen (Helmi, 2008). Pada temperatur di atas 200°C lapisan oksida akan tumbuh secara cepat dengan skala waktu harian sehingga ketebalan akan menebal secara signifikan.

2.6. Karakter Mekanik Aluminium Foam

2.6.1. Deformasi Tarik dan Tekan

Secara umum, sifat elastik dari *metal foam* memperlihatkan kesamaan kelakuan pada deformasi tarik dan tekan terutama untuk regangan yang kecil. Sifat utama yang diinginkan yaitu untuk mampu menyerap energi tekan plastis pada jumlah besar dan mentransmisikan beban yang rendah secara konstan. Oleh sebab itu, saat ini lebih banyak yang mempelajari secara mendalam tentang deformasi tekan pada *metal foam* dibandingkan dengan deformasi tarik.

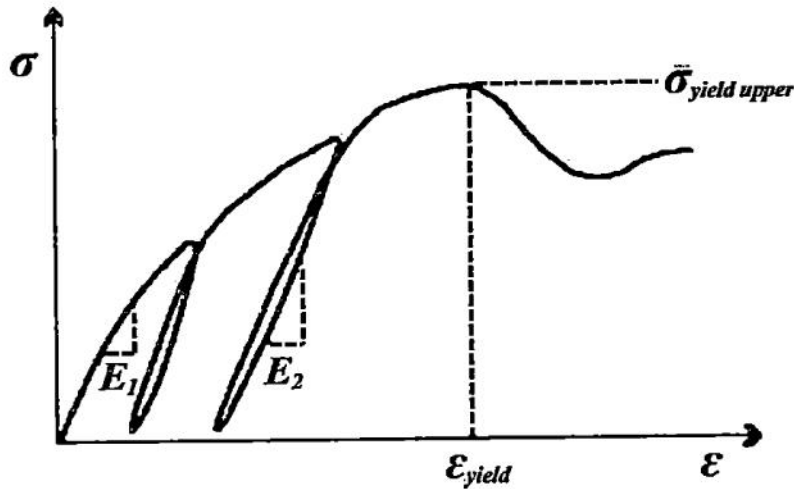
Evaluasi terhadap penentuan sifat tarik saat ini masih sulit untuk disimpulkan. Deformasi plastis pada pembebanan tarik hanya memperlihatkan modus kegagalan dari *foam* saja (Helmi, 2008). Kekuatan luluh tarik pada *metal foam* biasanya sama atau bahkan lebih kecil dibandingkan kekuatan luluh tekannya. Misalnya, beberapa penelitian menemukan bahwa kekuatan luluh tarik dan tekan dari *metal foam* Alporas™, menunjukkan angka yang mirip.

2.6.2. Deformasi pada Pembebanan Tekan

2.6.2.1. Fenomena pada Regangan Rendah

Skema kurva tegangan-regangan dari *metal foam (closed-cell)* pada pembebanan tekan ditunjukkan pada Gambar 2.23. Karakteristik yang menonjol dari kurva tersebut adalah tidak adanya daerah yang memperlihatkan deformasi kembali pada keadaan semula. Modulus tangensial pada awal kurva pembebanannya cukup rendah dibandingkan pembebanan yang terekan saat

pembebanan *metal foam* dilepaskan. Selain itu pada siklus pembebanan-pelepasan beban, seringkali terlihat adanya kurva histeris.



Gambar 2.23. Skema Kurva Tegangan-regangan pada Deformasi Tahap Awal untuk *Metal Foam (closed-cell)* (Sumber: Helmi, 2008)

Pada Gambar 2.23 di atas, pembebanan dilakukan dengan 2 siklus sehingga memperlihatkan tegangan luluh, modulus elastisitas pada saat pembebanan, dan modulus elastisitas saat pelepasan beban.

Penggunaan *software (image-matching)*, dapat memperlihatkan gambar dari kelakuan *metal foam* ketika dideformasi secara bertahap. Hal ini digunakan untuk lebih memahami kelakuan *metal foam* yang *irreversible* ketika diberi deformasi pada pembebanan yang kecil. Melalui pengujian tersebut terungkap bahwa hampir semua deformasi elastis terkonsentrasi pada suatu pita (*band*) tertentu, biasanya terpisahkan sekurangnya 3-4 dari diameter selnya. Saat deformasi berlangsung, jumlah pita dan luas deformasi pada pita tersebut akan mengalami kenaikan. Lokalisasi deformasi plastis pada permukaan sel (atau terbentuknya pita deformasi) yang menyebabkan kurva pembebanan awal yang tidak *linear*. Melalui *image-matching* juga terlihat bahwa pada pembebanan awal, deformasi elastis yang terjadi akan lebih homogen (Helmi, 2008).

Perlu diperhatikan bahwa deformasi elastis yang terlokalisasi muncul sebagai akibat dari tidak seragamnya bentuk *foam*. Pada *metal foam (open-cell)* yang mempunyai struktur sel yang cukup seragam, tidak terdapat perbedaan di antara modulus pembebanan dan pelepasan beban. Perlu diketahui bahwa modulus elastis tetap menjadi sifat yang paling penting pada pemakaian *aluminium foam* untuk aplikasi konstruksi.

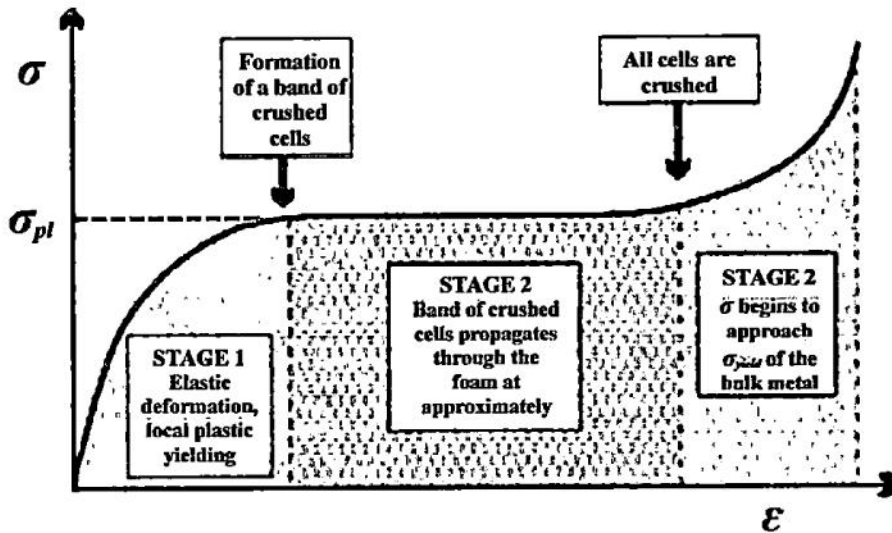
2.6.2.2. Keluluhan dan Plastisitas

2.6.2.2.1. Pita Deformasi (*Deformation Bands*)

Pada umumnya, deformasi plastis pada skala besar dari *metal foam (closed-cell)* dimulai oleh kegagalan dari sebuah pita sel pada penampang melintang sebuah spesimen. Kegagalan ini biasanya muncul pada salah satu pita yang mengalami konsentrasi deformasi lokal. Konsentrasi ini terbentuk selama tahap deformasi elastis (skala utuh) dan juga sering muncul pada daerah yang memiliki densitas lokal terendah. Deformasi yang terjadi pada pita tersebut akan mengakibatkan pemadatan lokal, dimana deformasi plastis (skala utuh) terjadi saat adanya kegagalan pada sel yang lainnya. Terbentuknya pita yang gagal tersebut ditandai dengan turunnya beban yang diterima oleh *foam*. Proses ini telah ditunjukkan pada Gambar 2.23 di atas.

Daerah pada *metal foam* yang telah mengalami kegagalan plastis akan selalu berdampingan dengan daerah yang mengalami deformasi elastis. Ketika regangan plastis makro besar, maka peluluhan akan terjadi dengan cara menggagalkan sel yang belum terdeformasi sehingga akan memberikan tegangan datar yang konstan (*plateu stress*). Hal ini ditunjukkan pada tahap 2 (*stage 2*) dari kurva tegangan-regangan Gambar 2.24.

Kegagalan plastis sering terjadi melalui penjalaran pita pertama yang telah mengalami kegagalan sepanjang bidang spesimen. Pada struktur sel yang tidak seragam misalnya, akan terkesan bahwa terdapat banyaknya keberadaan pita yang gagal. Hal ini adalah konsekuensi dari daerah yang memiliki densitas lokal yang tinggi pada struktur selnya, yang mencegah penjalaran lanjutan sehingga mendorong terjadinya kegagalan plastis secara acak.



Gambar 2.24. Tiga Tahapan pada Kurva Tegangan-regangan *Metal Foam*, dengan Pemberian Regangan tekan yang Besar (Sumber: Helmi, 2008)

2.6.2.2.2. Pemadatan (*Densification*)

Ketika kegagalan pada pita sel berlanjut, terdapat satu titik dimana tidak ada lagi ruang tersisa untuk berdeformasi dengan *buckling*. Hal ini digambarkan melalui kenaikan secara tajam pada kurva tegangan-regangan, sebagai fungsi dari kekuatan (tahap 3 pada Gambar 2.24). Regangan teknik (*engineering strain*) disaat pemadatan terjadi (ϵ_d), dimodelkan dengan persamaan empiris berdasarkan data dari *metal foam* dengan ρ^*/ρ di antara 0,02 sampai 0,4:

$$\epsilon_d = 1 - 1.4 \left(\frac{\rho^*}{\rho} \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

Angka 1,4 sebagai faktor untuk memperhitungkan rongga kecil yang terperangkap dalam material ketika tidak ada lagi deformasi sel yang terjadi (Helmi, 2008).

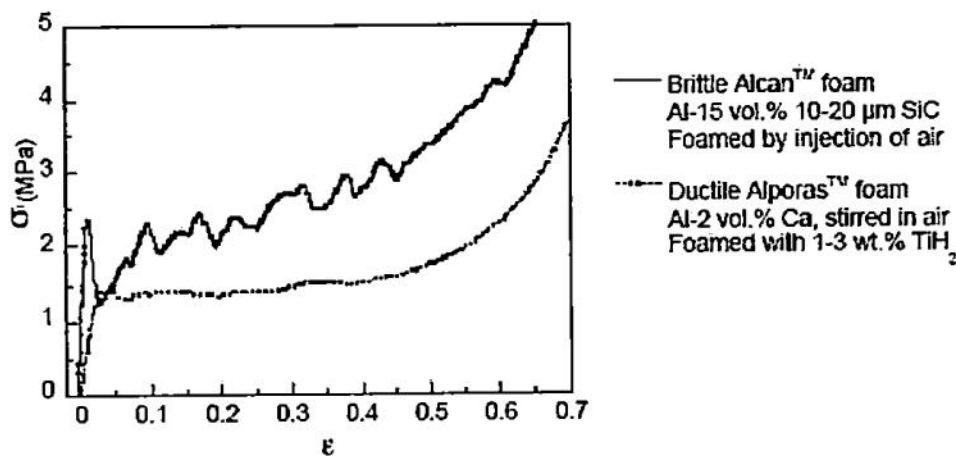
2.6.2.2.3. *Possion's Ratio*

Pada umumnya, *possion's ratio* mempunyai harga mendekati nol, ini disebabkan tidak adanya peregangan lateral yang biasanya terjadi saat deformasi plastis. Dengan adanya ruang bebas yang luas menunjukkan bahwa pita deformasi

dapat mengikuti jejak dimana resistensinya paling kecil yang sering terdapat pada sudut 45° atau lebih pada arah penekanan. Perlu diketahui, kekuatan luluh hidrostatik mempunyai kemiripan dengan kekuatan luluh uniaksial.

2.6.3. Modus Kegagalan Getas dan Ulet

Modus kegagalan *metal foam (closed-cell)* diklasifikasikan ke dalam dua kategori, yaitu modus kegagalan getas dan ulet. Modus kegagalan getas ditandai dengan adanya penurunan (*drop*) setelah kekuatan tekan awal yang dilanjutkan dengan kurva tegangan-regangan yang bergelombang atau bergerigi (naik-turun). Kurva ini memperlihatkan adanya *foam* yang pecah. Sedangkan modus kegagalan ulet ditandai dengan daerah *plateau stress* yang relatif lebih halus pada kurva tegangan-regangan dan diiringi dengan kenaikan tegangan sebagai akibat dari pemadatan (*strain hardening*). Karakteristik kurva tegangan-regangan dari kedua macam kegagalan dapat dilihat pada Gambar 2.25.

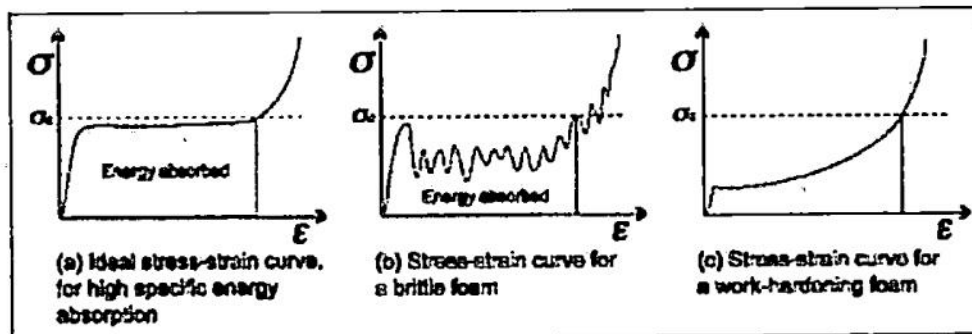


Gambar 2.25. Kurva Tegangan-regangan Tekan untuk Spesimen Kubus dari Spesimen Alulight™ (ulet) dan Alcan™ (getas) (Sumber: Helmi, 2008)

Strain hardening dapat memberikan kenaikan yang halus pada kurva tegangan-regangan, akan tetapi fenomena ini hanya terjadi pada *metal foam* yang mengalami modus kegagalan ulet dan jika materialnya merupakan logam paduan.

2.6.4. Macam-macam Kurva Tegangan-regangan *Metal Foam*

Ketika kegunaan *metal foam* diperuntukkan sebagai material penyerap energi, maka terdapat 2 parameter kunci yaitu energi yang terserap per unit massa ketika terjadi penekanan dan tegangan dimana energi tersebut terserap. Parameter pertama ditunjukkan pada area di bawah kurva tegangan-regangan *metal foam*. Jika ditinjau berdasarkan aplikasinya, bentuk kurva sebelum tegangan melampaui nilai kritis (σ_c) adalah hal yang penting. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.26, penurunan tegangan setelah luluh atau kenaikan *strain hardening* yang tinggi dapat saja terjadi, namun pada umumnya hal ini tidak diinginkan terjadi. *Plateau stress* ($\sigma_{plateau}$) dapat juga direkayasa agar sesuai dengan tegangan kompresi untuk aplikasi-aplikasi tertentu walaupun dengan cara mengurangi *densification strain*. Macam-macam kurva tegangan-regangan *metal foam* dapat dilihat pada gambar 2.26.



Gambar 2.26. Macam-macam Kurva Tegangan-regangan *Metal Foam*
(Sumber: Helmi, 2008)

Gambar 2.26 (a) adalah kurva tegangan-regangan untuk *foam* ideal, Gambar 2.26 (b) adalah kurva tegangan-regangan untuk *foam* yang mengalami kegagalan getas, dan Gambar 2.26 (c) adalah kurva tegangan-regangan untuk *foam* dengan *work hardening* yang luas. Daerah efektif saat penyerapan energi mekanik terjadi pada bagian kelabu sebelum mencapai pembebanan tekan kritis (σ_c).