

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

Pada bab ini akan dibahas mengenai latar belakang , tujuan sistematika penulisan, dan metodologi penelitian.

### **1.1. Latar Belakang**

Aluminium merupakan material yang saat ini banyak digunakan untuk bahan baku industri permesinan. Sifatnya yang tahan terhadap korosi dan ringan dibandingkan dengan besi atau logam lainnya. Aluminium juga dapat dipadukan dengan logam lain dan menghasilkan sifat yang lebih baik dan unggul. Aluminium mempunyai porositas yang tinggi sehingga dapat menyerap energi mekanik dengan kuantitas yang tinggi ketika dideformasi. Material ini, juga dapat berperan sebagai penyerap energi impak, tergantung pada percepatan saat situasi tabrakan <sup>[4]</sup>. Aluminium foam (busa aluminium), telah diketahui mempunyai kombinasi sifat material seperti kekakuan lentur yang tinggi dengan berat spesifik yang rendah. Selain itu, busa aluminium mempunyai karakteristik kompresi yang baik serta dikombinasikan dengan kemampuan penyerapan energi yang tinggi <sup>[5]</sup>.

Riset mengenai busa aluminium telah dikembangkan sejak tahun 50-an, akan tetapi secara komersial mulai marak dikembangkan kembali pada tahun 90-an dan diperkirakan akan terus berlanjut. Busa aluminium mempunyai sifat yang sesuai untuk dikembangkan pada industri otomotif (kendaraan), karena memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada polymer foam, sehingga untuk aplikasi penyerapan energi, saat ini busa aluminium belum dapat tergantikan. Karakteristik khusus material ini adalah kemampuan menyerap energi (energy absorption) yang tinggi dari berbagai arah pembebanan <sup>[1]</sup>. Tantangan utama untuk memproduksi busa aluminium adalah mencari rute proses yang termurah namun tetap memiliki karakteristik mekanik yang baik.

## 1.2. Tujuan Penelitian

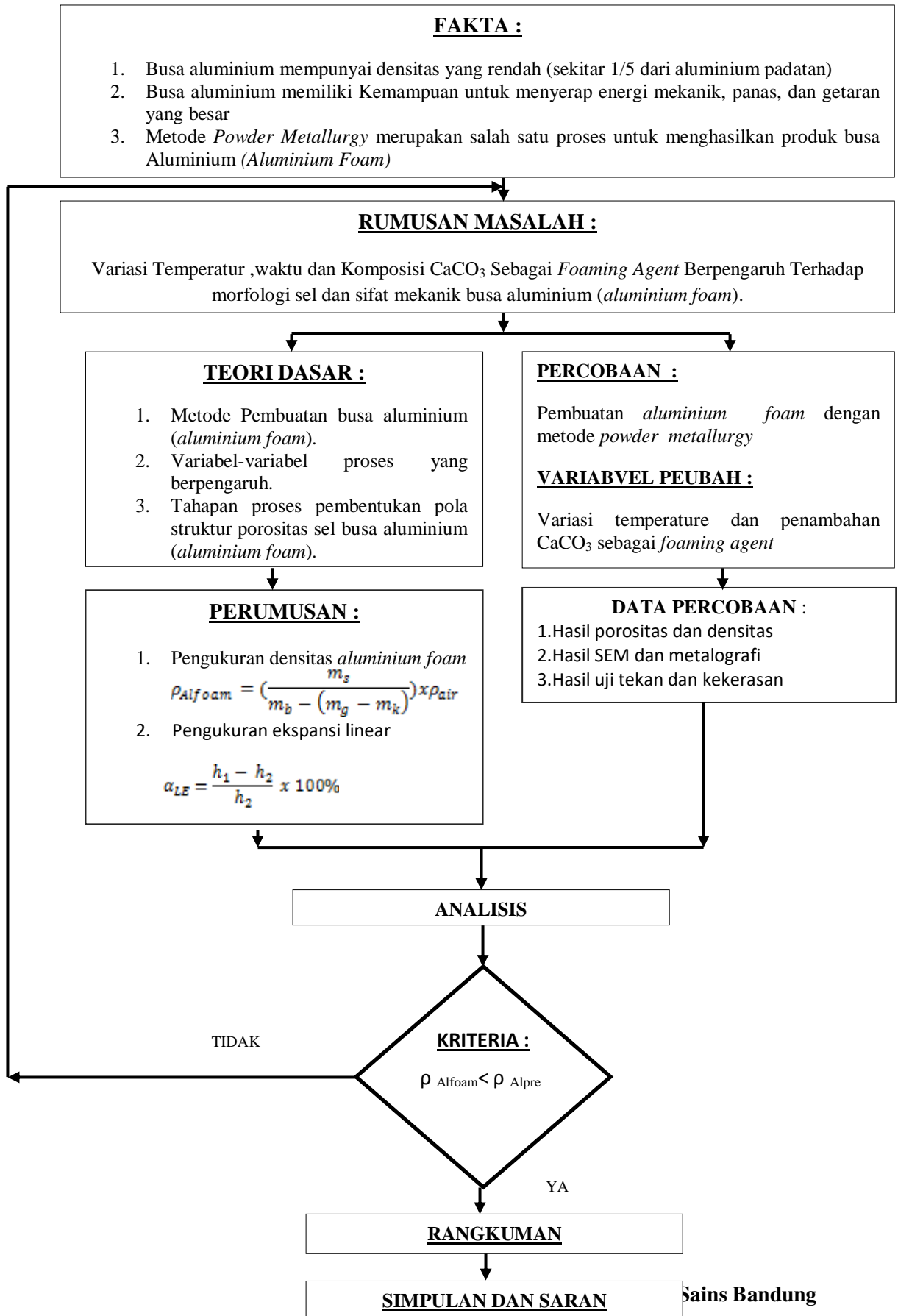
Penelitian ini dilakukan dengan tujuan :

1. Menganalisis pengaruh variasi temperatur, waktu dan komposisi  $\text{CaCO}_3$  terhadap dimensi busa aluminium yang dihasilkan.
2. Menganalisis pengaruh variasi temperatur, waktu dan komposisi  $\text{CaCO}_3$  terhadap karakterisasi busa aluminium yang dihasilkan.
3. Menganalisis pengaruh variasi temperatur, waktu dan komposisi  $\text{CaCO}_3$  terhadap sifat mekanik busa aluminium yang dihasilkan

## 1.3. Ruang Lingkup Penelitian

Material busa aluminium telah banyak diteliti sebelum penelitian ini dilakukan, sehingga terdapat berbagai metode untuk memproduksi busa aluminium. Dalam penelitian ini, digunakan rute pembuatan busa aluminium secara tidak langsung, yaitu *Powder Metallurgy Process* metode *indirect foaming*. Aluminium yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan busa aluminium ini adalah aluminium serbuk dengan tingkat kemurnian 99,9%.. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperature, waktu pemrosesan serta komposisi serbuk  $\text{CaCO}_3$  sebagai foaming agent. Adapun variasi temperatur pemrosesan yang digunakan yaitu pada 675°C, 700°C, 725°C, dan 750°C. Sedangkan penggunaan serbuk  $\text{CaCO}_3$  yaitu 5, 10, 15 dan 20 % berat serbuk aluminium input serta dengan variasi waktu 10, 15, 20, 25 menit.

## 1.4 Metodologi Penelitian



## **1.5. Sistematika Penulisan**

Dalam penelitian ini, digunakan sistematika penulisan sebagai berikut.

BAB I : Pendahuluan, berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, metode penelitian, dan sistematis penulisan tugas akhir ini.

BAB II: Tinjauan Pustaka, berisi terori-teori dasar yang membantu penyusun dalam melakukan penelitian dan penyusunan tugas akhir ini.

BAB III: Studi Kasus dan Perhitungan, berisi teori-teori dasar yang membantu penyusun dalam melakukan penelitian dan penyusunan tugas akhir ini.

BAB IV: Analisis dan Pembahasan, dalam bab ini dipaparkan pembahasan terhadap hasil percobaan yang dilakukan.

BAB V: Kesimpulan dan Saran, dalam bab ini memuat kesimpulan pembahasan terhadap hasil percobaan yang diperoleh dan merupakan jawaban dari permasalahan penelitian. Disertai dengan berupa hal-hal yang sebaiknya dilakukan pada penelitian selanjutnya.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

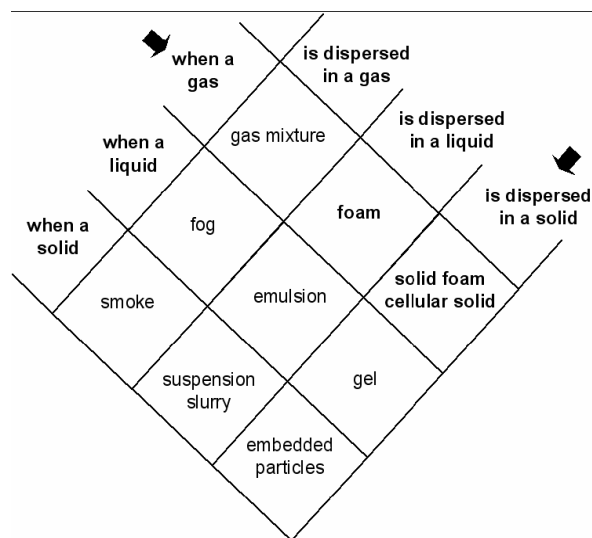
Pada bab ini akan dibahas mengenai landasan teori, yang meliputi definisi busa aluminium sampai dengan aplikasinya.

#### 2.1 Metal Foam

##### 2.1.1 Definisi *Metal Foam*

Istilah *solid foam* (busa padat) dapat dijelaskan melalui gambar 2.1. Gambar tersebut memperlihatkan jenis-jenis koloid yang dapat terbentuk melalui dua fasa. Dari gambar ini, maka *solid foam* didefinisikan sebagai material yang terbentuk dari fasa gas yang terdispersi dalam fasa *solid*.

*Solid foam* seringkali juga disebut dengan *cellular foam*. 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 *metallic foam*. *Metal foam* dibedakan dari logam berpori (*porous metal*) melalui nilai densitas yang lebih kecil, dan jumlah % fasa gas



sebesar 30-98 % vol.

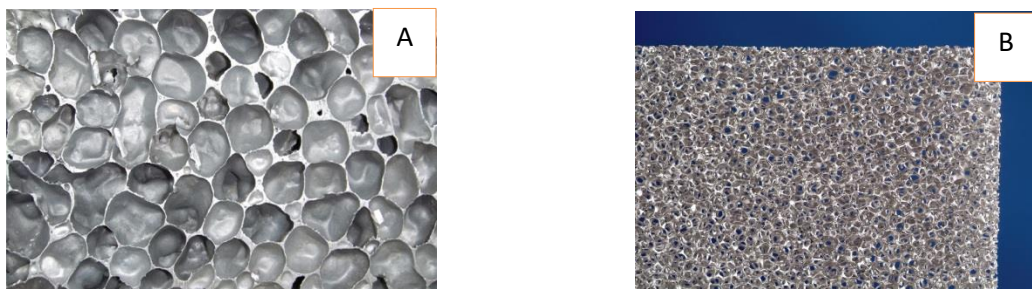
**Gambar 2.1** Klasifikasi jenis koloid berdasarkan fasa pembentuk<sup>[10]</sup>



## 2.2 Klasifikasi logam busa

Metal foam dapat diklasifikasikan atas bentuk rongga yang terbentuk<sup>[3]</sup>. Berdasarkan kriteria ini, klasifikasinya terbagi dalam :

1. Foam rongga tertutup, yaitu metal foam yang memiliki rongga-rongga yang terisolasi dan tidak saling terhubung.
2. Foam rongga terbuka, yaitu klasifikasi untuk metal foam yang rongga-rongga yang saling berhubungan dan kontinyu.



**Gambar 2.2** Foam rongga tertutup (A), Foam rongga terbuka (B).

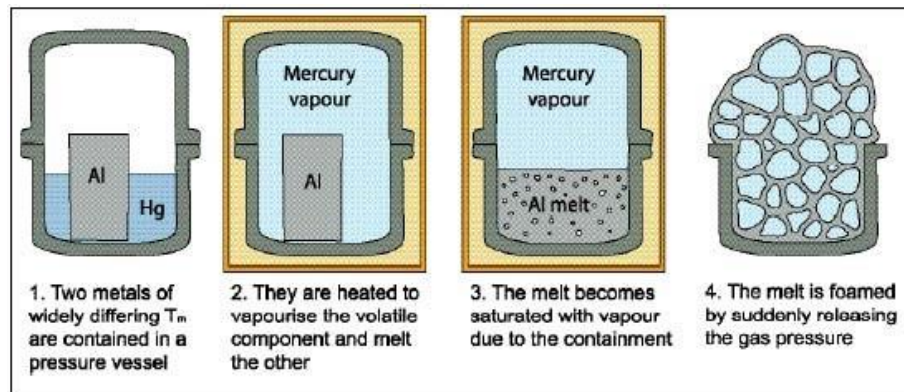
Berdasarkan klasifikasi tersebut telah banyak dikembangkan metode pembuatan *metal foam* pada beberapa jenis logam dengan proses produksi yang lebih spesifik. Pemilihan proses produksi tersebut akan menentukan sifat rongga dan mempengaruhi bentuk rongga, diameter rongga, dan distribusi rongga itu sendiri. Kerumitan bentuk produk *foam* tersebut juga turut mempengaruhi penentuan jenis proses produksi *metal foam*.

## 2.3 Rute Proses Pembuatan Aluminium Foam

Pembuatan aluminium *foam* pertama kali dilakukan oleh Benjamin Sosnick pada tahun 1943. Dia mencoba mendispersikan gas kedalam aluminum padat dengan bantuan unsur merkuri (Hg) menggunakan bejana bertekanan tinggi. Dengan bantuan tekanan tinggi, penguapan Hg terjadi bersamaan saat temperatur leleh aluminium sehingga menyebabkan pembentukan *foam* (busa). Kemudian, ide pertama untuk memproduksi secara *indirect foaming*, dikembangkan di akhir



tahun 1950 oleh Benjamin Allen. Lalu pada tahun 1990, metode ini dikembangkan lebih lanjut oleh Fraunhofer Laboratory di Bremen, Jerman.<sup>[10]</sup>



**Gambar 2.2** Skema proses pembuatan Aluminium dengan mendispersikan gas kedalam Al-solid, dengan bantuan Hg (merkuri)<sup>[10]</sup>.

Saat ini, terdapat dua metode utama untuk memproduksi *Aluminum foam*. Metode pertama dinamakan dengan *direct foaming*. Caranya adalah dengan menyuntikkan gas secara kontinyu atau menambahkan *foaming agent* (agen pengembang) kedalam aluminum cair sehingga membentuk busa (*foaming*). Metode kedua adalah *indirect foaming*. Metode ini diawali dengan pembuatan *solid precursor* yang terdiri dari matriks logam aluminium dan partikel *foaming agent* yang terdispersi merata.

Contoh *foaming agent* yang seringkali digunakan dalam pembuatan aluminum *foam* adalah hidrida dari unsur transisi, misalnya serbuk titanium atau zirconium hidrida. Ketika *solid precursor* ini dipanaskan sampai diatas temperatur leleh matriks logam, maka *foaming agent* akan melepaskan gas sehingga *precursor* tersebut mengembang dan membentuk *foam*.

**Tabel 2. 1** Klasifikasi rute pembuatan Aluminium *Foam*, direct foaming dan *indirect foaming*<sup>[7]</sup>

<b>direct foaming</b>	melt alloy make alloy foamable create gas bubbles collect foam solidify foam	<b>indirect foaming</b>	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

### 2.3.1 Pembuatan *Foam* langsung dari Aluminium Cair (*Direct Foaming*)

Lelehan aluminium dapat dibuat menjadi *foam* dengan cara membuat gelembung gas di dalam lelehan yang dibuat dalam keadaan stabil saat pemrosesan berlangsung. Keadaan ini dapat terjadi dengan menambahkan partikel keramik atau unsur paduan kedalam lelehan, yang berperan sebagai partikel penstabil. Saat ini, terdapat 4 cara yang biasa digunakan untuk membuat *metal foam* dari keadaan lelehan, yaitu: pertama, dengan menginjeksikan gas kedalam logam cair; kedua, dengan menambahkan *foaming agent* kedalam aluminium cair sehingga melepaskan gas; ketiga, dengan infiltrasi pada pola yang dapat dibuang (*Investment Casting*), dan keempat, dengan mempresipitasikan gas yang sebelumnya telah terlarut didalam fasa cair<sup>[7]</sup>.

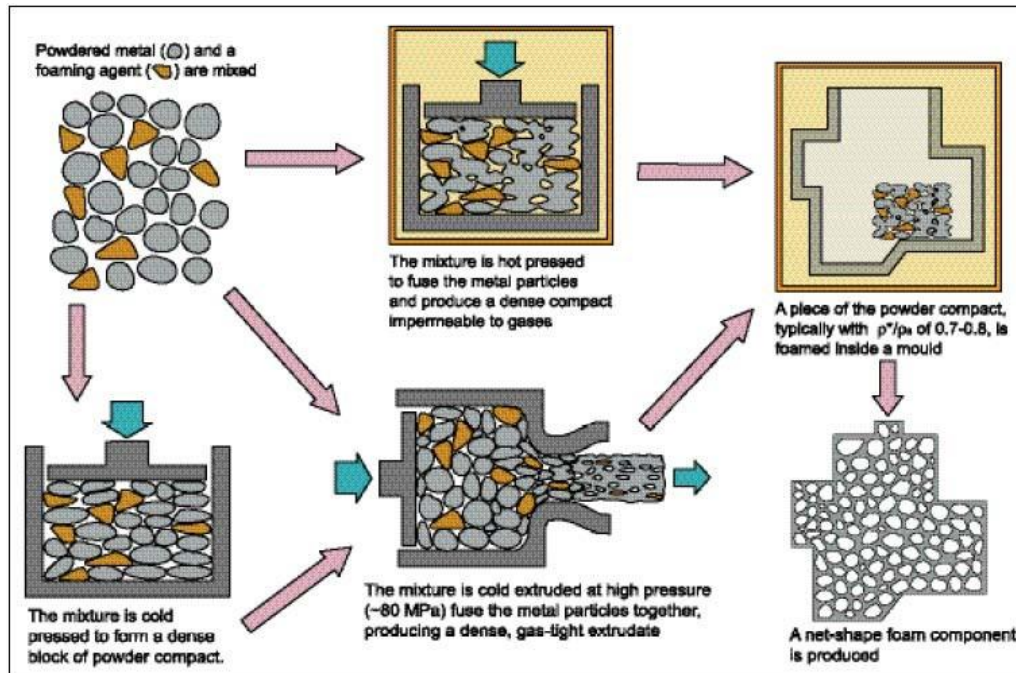
### 2.3.2 Pembuatan Aluminium Foam dengan Precursor (Indirect Foaming)

Teknik pembuatan *metal foam* ini dilakukan dengan menambahkan satu langkah dalam rantai proses yang ada. Berbeda dengan teknik pembuatan langsung dari keadaan cair, *precursor* yang mengandung *foaming agent* dipersiapkan terlebih dahulu. Pengembangan *foam* dilakukan dengan cara melelehkan *precursor* sehingga gas akan terlepas dan membentuk gelembung. Keuntungan dari teknik ini adalah bentuk yang rumit dapat diproduksi dengan cara mengisi cetakan dengan *precursor*. *Precursor* ini dapat disiapkan dengan tiga cara: pertama dengan memadatkan campuran serbuk dalam keadaan padat, kedua dengan membentuk campuran serbuk dengan *thixo-casting* dan dengan mencampur serbuk *foaming agent* kedalam lelehan logam.

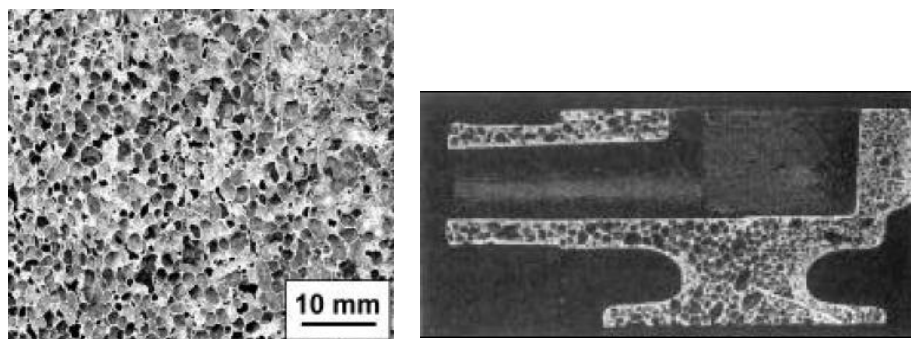
#### 2.3.2.1 Kompaksi Antara Serbuk Aluminium dan Foaming Agent (Foaminal<sup>TM</sup>)<sup>[4]</sup>

Skema produksi diperlihatkan pada gambar 2.3. Proses produksi dimulai dengan mencampurkan antara serbuk logam (logam murni, paduan, atau campuran) dengan serbuk *foaming agent*. Setelah itu, campuran tersebut dikompaksi sampai padat sehingga didapatkanlah produk setengah jadi. Kompaksi harus dilakukan dengan teknik tertentu sehingga *foaming agent* akan menempel pada matriks logam tanpa adanya sisa porositas. Contoh metoda kompaksi yang lazim digunakan adalah dengan *uniaxial* atau *isostatic compression*, *rod extrusion* atau *powder 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.



**Gambar 2.3** Rute proses kompaksi serbuk aluminium dan foaming agent, Foamina<sup>TM</sup>[7]



**Gambar 2.4** Penampang melintang dari produk Foamina<sup>TM</sup> [7]

## 2.4 Agen Penghasil Gas (*Foaming Agent*)

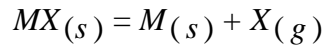
### 2.4.1 Penggunaan *Foaming Agent*

Keuntungan utama pemakaian *foaming agent* adalah bubuk *foaming* dapat secara efisien terdispersi didalam aluminium cair dengan pengadukan sebelum terjadi dekomposisi termal. Pada proses yang penggelembungan gasnya terjadi secara langsung didalam logam cair, maka pengaturnya adalah kecenderungan alami gelembung untuk naik ke permukaan logam cair dan efek dorongan dari gelembung yang bersebelahan. Perlu diperhatikan juga, bahwa pengadukan logam cair setelah penambahan gelembung dapat menyebabkan penggabungan sel dan pengempesan *foam* secara cepat. 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, memberkan kesempatan pada gelembung untuk menyusun kembali sehingga variasi densitas lokal dapat dihindari. Partikel penstabil dapat membantu penyusunan pori, juga menstabilisasi permukaan dengan bantuan reaksi kimia antara gelembung gas dan aluminium cair.

### 2.4.2 Persyaratan untuk *Foaming Agent*

Prinsipnya, setiap material yang stabil di temperatur kamar namun dapat melepaskan gas saat kenaikan temperatur, maka dapat berpotensi sebagai *foaming agent*. Termasuk kedalam *foaming agent* adalah bahan inorganik hidrat seperti kalsium klorida, cupric sulfat dan barium iodida, juga mineral yang memiliki lapisan hidrat seperti *vermiculite*. Ketika dipanaskan diatas temperatur dekomposisinya (400- 1300<sup>0</sup>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, dan karbonat, juga cocok digunakan. Pada kenaikan temperatur yang cukup, bahan tersebut dapat

terdekomposisi membentuk formula:



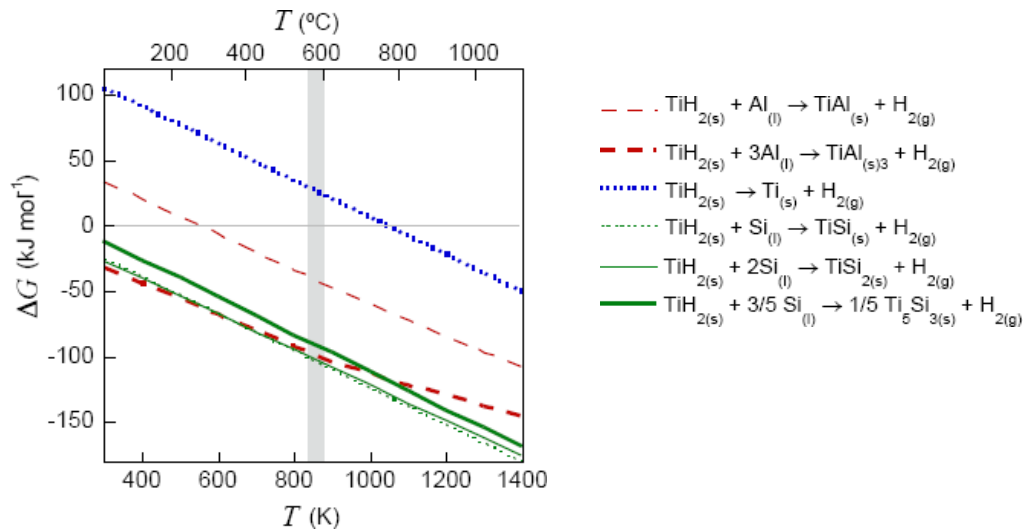
Mayoritas pengerjaan *foaming* pada logam cair ditujukan pada aluminium. Hal ini, dikarenakan karakteristiknya yang mempunyai densitas rendah, relatif mempunyai titik leleh rendah, dan sifat mampu tahannya terhadap korosi. Aluminium murni meleleh pada 660<sup>0</sup>C, sedangkan aluminium paduan yang lazim digunakan sebagai bahan *aluminum foam*, mempunyai temperatur leleh yang lebih rendah dibawah 575<sup>0</sup>C.

Beberapa paten menyarankan kisaran yang luas untuk bahan yang berpotensi sebagai *foaming agent*. Termasuk didalamnya adalah CdCO<sub>3</sub> dan MgCO<sub>3</sub>, molekul organik dengan rantai panjang, (NH<sub>4</sub>)CO<sub>3</sub>, vermiculite, logam sulfat dan karbonat. Diantara semua bahan tersebut, titanium hidrida (TiH<sub>2</sub>) dan zirconium hidrida (ZrH<sub>2</sub>), merupakan *foaming agent* yang sering digunakan secara praktik. Pada penggunaan komersial pun hanya TiH<sub>2</sub> yang luas dipakai. Bahan ini terdekomposisi melalui reaksi:



Energi bebas dari reaksi ini,  $\Delta G^0$ , diplotkan sebagai fungsi dari temperature. Semua elemen diasumsikan pada keadaan standar, yaitu ketika gas terbentuk pada tekanan atmosfer. Hal ini, menyesuaikan perkiraan situasi didalam sel saat aluminium bersifat cair. Dekomposisi TiH<sub>2</sub> menghasilkan hidrogen, secara langsung terjadi dalam keadaan atmosfer pada temperatur 750<sup>0</sup>C. Tetapi, pada proses *foaming* dekomposisi TiH<sub>2</sub> terjadi secara cepat di temperatur yang lebih rendah. Senyawa intermetalik TiAl dan TiAl<sub>3</sub> teramati pada permukaan interface antara partikel TiH<sub>2</sub> dan logam cair. Hal ini menunjukkan adanya reaksi lain yang terjadi.

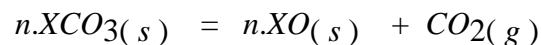




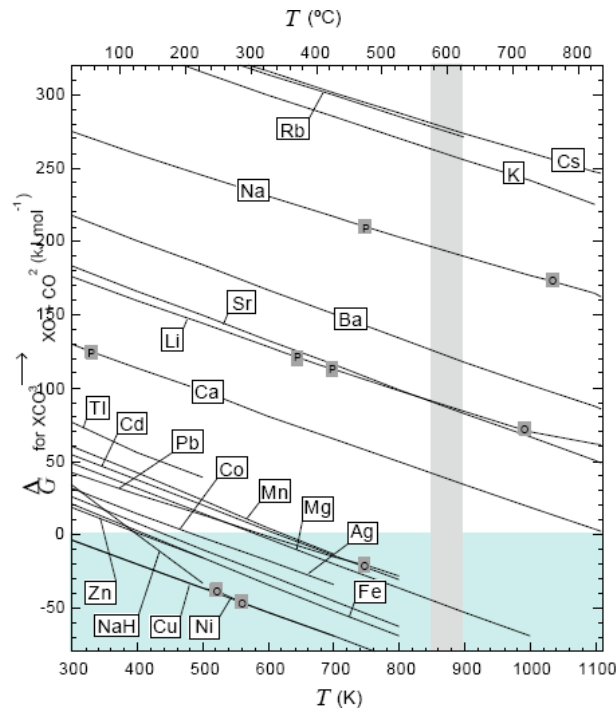
**Gambar 2.8**  $\Delta G^0$  untuk dekomposisi termal dari  $\text{TiH}_2$ , dan untuk beberapa reaksi pembentukan gas dari  $\text{TiH}_2$  pada Paduan Aluminium cair.  $p_{\text{H}_2} = 1$ <sup>[8]</sup>

#### 2.4.3.3.1 Logam Karbonat Sebagai Agen Penghasil Gas

Logam karbonat sangat berpotensi juga sebagai agen penghasil gas dalam proses *foaming*. Energi bebas untuk dekomposisi bahan karbonat diplotkan dalam gambar II.16, untuk reaksi yang terjadi sebagai berikut:

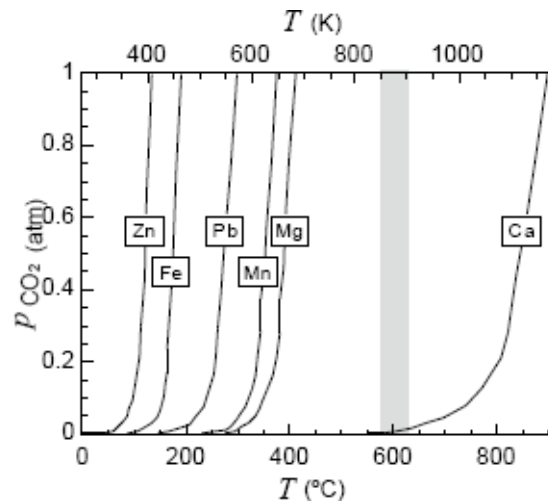






**Gambar 2. 9**  $\Delta G^0$  reaksi [3.3] untuk satu mol pada berbagai macam logam karbonat,  $p_{\text{CO}_2} = 1 \text{ atm}$ <sup>[8]</sup>

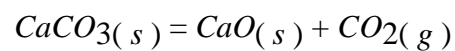
Setelah melihat gambar di atas, maka dapat terlihat bahwa kebanyakan dari karbonat tidak terlalu stabil untuk digunakan sebagai *foaming agent* pada aluminium. Terlihat pada kesetimbangan tekanan parsial dari  $\text{CO}_2$  ( $p_{\text{CO}_2}$ ) beberapa karbonat di gambar 2.9 Selain itu, beberapa karbonat terdekomposisi pada temperatur yang terlalu tinggi. Penjelasan ini mungkin memberikan alasan kurang lazimnya penggunaan karbonat untuk saat ini.



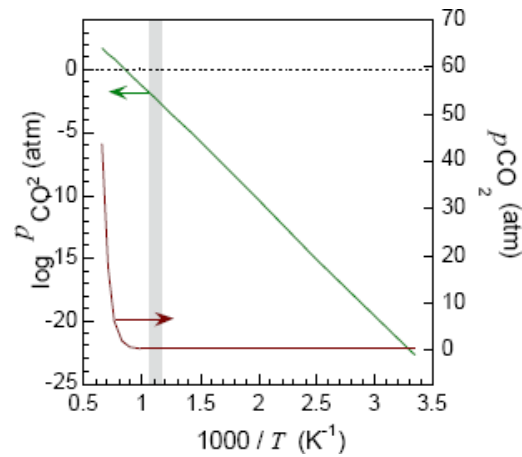
**Gambar 2.10** Kestimbangan  $p\text{CO}_2$  untuk logam karbonat. Pita kelabu menunjukkan kisaran temperatur leleh untuk paduan aluminium.

### Kalsium Karbonat

Kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ternyata mempunyai kriteria yang paling cocok. Yaitu, mempunyai densitas yang mirip dengan Aluminium ( $2710 \text{ kg m}^{-3}$ ) dan juga telah lama digunakan sebagai agen *foaming* dengan reaksi sebagai berikut:

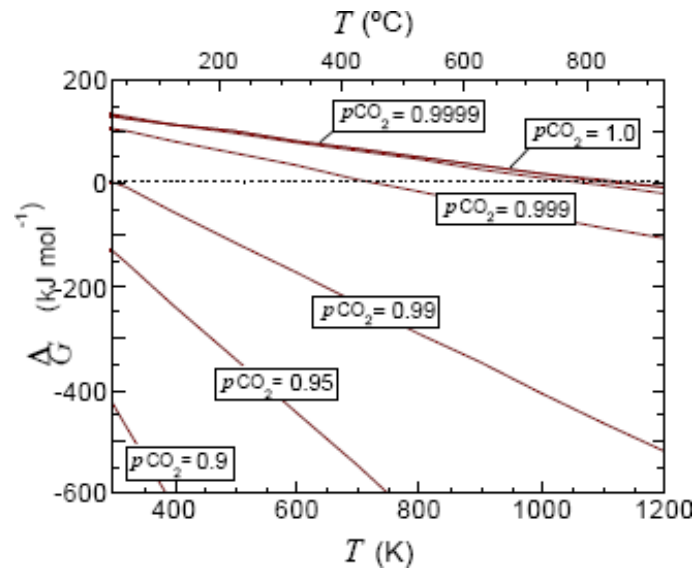


$p\text{CO}_2$  untuk reaksi ini diplotkan sebagai fungsi dari temperature.



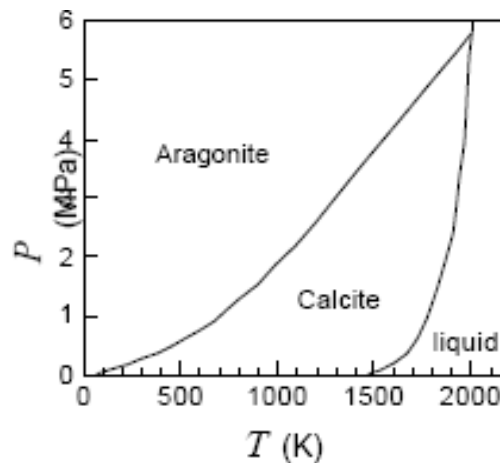
**Gambar 2.11** Kesetimbangan  $p\text{CO}_2$  untuk reaksi [3.4]. Pita kelabu menandakan kisaran temperatur leleh paduan aluminium <sup>[10]</sup>

Meskipun dekomposisi termal  $\text{CO}_2$  murni pada keadaan atmosfer terjadi diatas temperatur leleh aluminium paduan, reaksi satu tahap, secara termodinamika cocok terjadi pada saat temperatur leleh dengan penurunan kecil  $p\text{CO}_2$ . Diperlihatkan pada gambar 2.19. Maka,  $\text{CaCO}_3$  dapat digunakan sebagai *foaming agent* aluminium, jika  $p\text{CO}_2$  didalam sel dapat dikurangi.



**Gambar 2.12**  $\Delta G$  untuk reaksi [3.4] untuk beberapa nilai  $p\text{CO}_2$  <sup>[11]</sup>

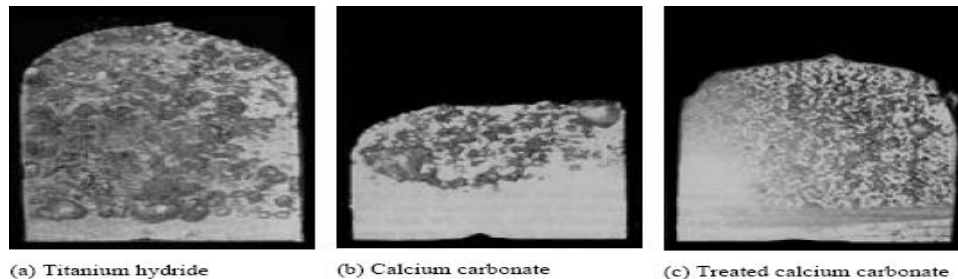
$\text{CaCO}_3$  stabil pada 2 buah bentuk polimorf utama, yaitu: *calcite*, dengan struktur kristal trigonal, dan *aragonite*, dengan struktur *orthorhombik* simetris. Keadaan polimorf  $\text{CaCO}_3$  stabil, secara relatif diplotkan dalam gambar 2.12. *Aragonite* mempunyai energi aktivasi yang lebih rendah untuk mendekomposisi dari pada *calcite*.



**Gambar 2.13** Stabilitas polimorf calcite dan aragonite untuk  $\text{CaCO}_3$  <sup>[10]</sup>

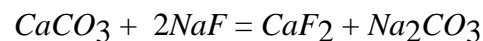
Dekomposisi termal dari *calcite* telah dipelajari dengan menggunakan *Differential Thermal Analysis* (DTA), *Thermogravimetric Analysis* (TGA) dan *Dynamic X-ray Diffraction* (XRD). Data yang didapatkan, mempunyai persebaran hasil yang signifikan. Dekomposisi pada atmosfer *inert* terjadi secara lambat pada  $T > 500^\circ\text{C}$ , dan terjadi secara cepat pada temperatur  $650\text{-}700^\circ\text{C}$ . Temperatur dekomposisi yang teramati tadi dipengaruhi oleh  $p\text{CO}_2$ , dengan permulaan dekomposisi pada temperatur  $900^\circ\text{C}$  untuk  $\text{CO}_2$  murni. Akan tetapi, efek dari  $p\text{CO}_2$  secara kinetik pada dekomposisi belumlah jelas. Partikel  $\text{CaCO}_3$  yang lebih besar, dengan luas permukaan yang lebih kecil dan jarak difusi gas antar partikel yang lebih besar, akan terdekomposisi lebih lambat. Telah pula dilakukan penelitian secara sistematis yang mempelajari efek dari kemurnian serbuk. Karbonat yang mempunyai kemurnian tinggi ternyata terdekomposisi sedikit lebih lambat daripada *limestone* alam yang tidak murni. Pembersihan sampel serbuk telah diteliti dapat menunda dekomposisi, memberikan alasan bahwa kotoran atau gas

yang terserap dapat saja berperan sebagai permukaan dimana terjadi pengintian CaO.



**Gambar 2.14** Foam yang diproduksi dengan  $TiH_2$ ,  $CaCO_3$ , dan  $CaCO_3$  pre-treated<sup>[7]</sup>

Melalui penelitiannya, Nakamura melaporkan bahwa  $CaCO_3$  dapat digunakan sebagai *foaming agent* untuk aluminium pada proses Alporas<sup>TM</sup>. Proses ini menggunakan kalsium sebagai penambah viskositas. Proses *foaming* dapat terjadi dengan membentuk lapisan terlebih dahulu setebal 30 nm pada permukaan partikel *foaming agent*

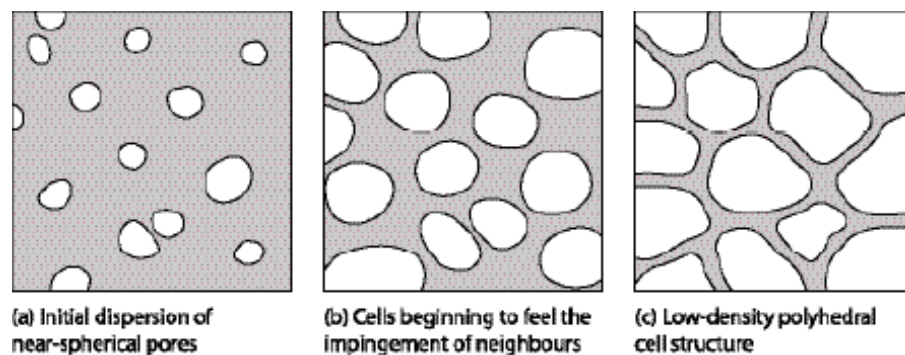


Pertukaran ion terjadi pada larutan NaF hangat selama 40 menit. Dilanjutkan dengan pengeringan udara ( $120^{\circ}C$ ) selama 12 jam. Lapisan *coating* dilaporkan digunakan untuk membantu memperbaiki *wettability*. Al-Foam untuk partikel yang *dicoating*, memperlihatkan daerah pengeringan yang luas dan struktur sel acak pada pori yang ter-interkoneksi. Sedangkan  $CaCO_3$  yang tidak *dicoating*, ternyata tidak dapat membentuk *foam* dari logam cair. Besar pori yang dibentuk oleh karbonat (1,1 mm) adalah 60% lebih kecil daripada Al-foam yang dibentuk oleh hidrida (1,8 mm). Perbedaan yang mencolok dapat terlihat lebih jelas untuk spesimen yang diperlihatkan dalam gambar 2.14. Penelitian tersebut menghubungkan bahwa perbedaan ukuran sel digunakan untuk menambah *wettability* dari *foaming agent*. Diasumsikan hal ini diupayakan untuk menambah jumlah pengintian gelembung dan membantu pelepasan gas.

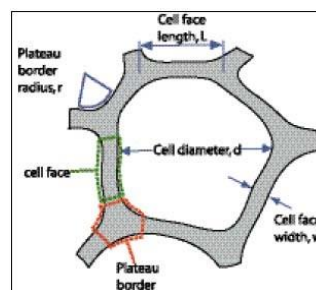
## 2.5 Tahapan pembentukan struktur *foam*<sup>[10]</sup>

### 2.5.1 Penumbuhan Sel

Struktur sel terbangun melalui tahapan yang diperlihatkan di gambar 2.15. Bentuk sel pada awalnya dikontrol hanya oleh tegangan permukaan, lalu membentuk pori bulat. Kemudian dilanjutkan dengan pengembangan bentuk pori menjadi bertambah angular. Dikarenakan pergerakan gelembung relatif dengan gelembung lainnya menjadi sulit, maka akhirnya membentuk jaringan tiga dimensi dari sel polihedral. Terminologi yang digunakan untuk mengkarakterisasi struktur sel polyhedral dijelaskan melalui gambar 2.15.



**Gambar 2.15** Skema pertumbuhan struktur sel dengan  $\rho^*/\rho$  berkurang selama pengembangan logam cair dengan menggunakan foaming agent yang terdispersi<sup>[7]</sup>

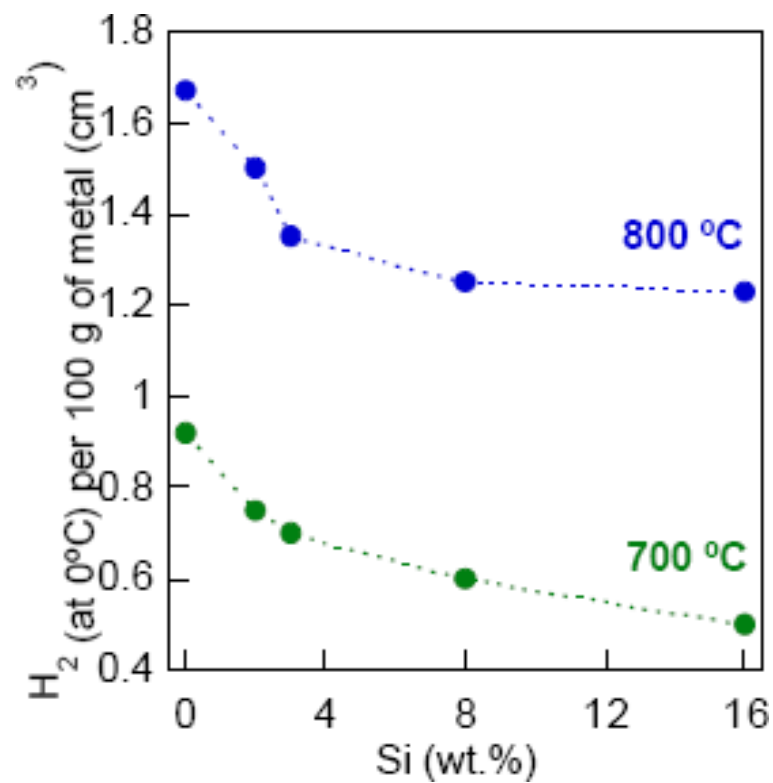


**Gambar 2.16** Terminology dan notasi struktur sel<sup>[7]</sup>

## 2.5.2 Faktor yang Mempengaruhi Stabilitas Struktur *Foam*

### 2.5.2.1 Difusi Gas

Pada *foam* cair, perbedaan tekanan diantara sel dengan ukuran yang berbeda akan menyebabkan terjadinya pengasaran, melalui mekanisme *Ostwald Rippening*. Difusi yang terjadi, akan tetapi dibatasi oleh tingkat difusivitas dan kelarutan gas dalam logam cair. kelarutan berbagai macam gas seringkali dapat diabaikan, kecuali  $H_2$  yang mempunyai kelarutan signifikan kedalam aluminium cair. Gambar 2.24 memperlihatkan kelarutan gas dapat dikurangi secara signifikan dengan tambahan paduan Si. Dikarenakan, pada proses *foaming*, gelembung akan dipertahankan dalam keadaan cair untuk waktu yang sebentar, maka dapat .



**Gambar 2. 24** Kelarutan  $H_2$  didalam paduan Al-Si sebagai fungsi dari konsentrasi Si, *diekspresikan* sebagai volume gas pada  $0^0C$  dan tekanan atmosfer yang akan terlarut pada logam seberat  $100g^{[7]}$

\



### 2.5.2.2 Pengaturan Sel

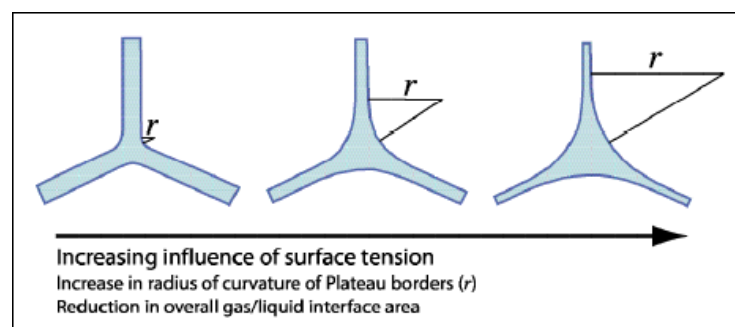
Jika dekomposisi pada sel yang bedekatan menunjukkan perbedaan tekanan yang jauh dan tidak dapat terakomodasi dengan difusi, maka sel-sel dapat mengatur kembali, lalu merubah sel tetangganya untuk mendistribusikan tekanan kembali. Kemungkinan yang terjadi adalah permukaan sel dengan tegangan permukaan yang rendah dapat melengkung.

### 2.5.2.3 Viskositas

Untuk membuat sel yang terdistribusi merata, maka gelembung harus dapat ditahan didalam logam cair sampai *foam* membeku. Dengan kata lain, kecepatan pergerakan naiknya gelembung perlu dikurangi. Pengaruh ukuran gelembung dan tingkat viskositas logam cair pada kecepatan terminal gelembung gas pada logam cair dapat diperoleh dengan menyeimbangkan kemampuan apung gelembung dengan tahanan logam cair karena viskositas.

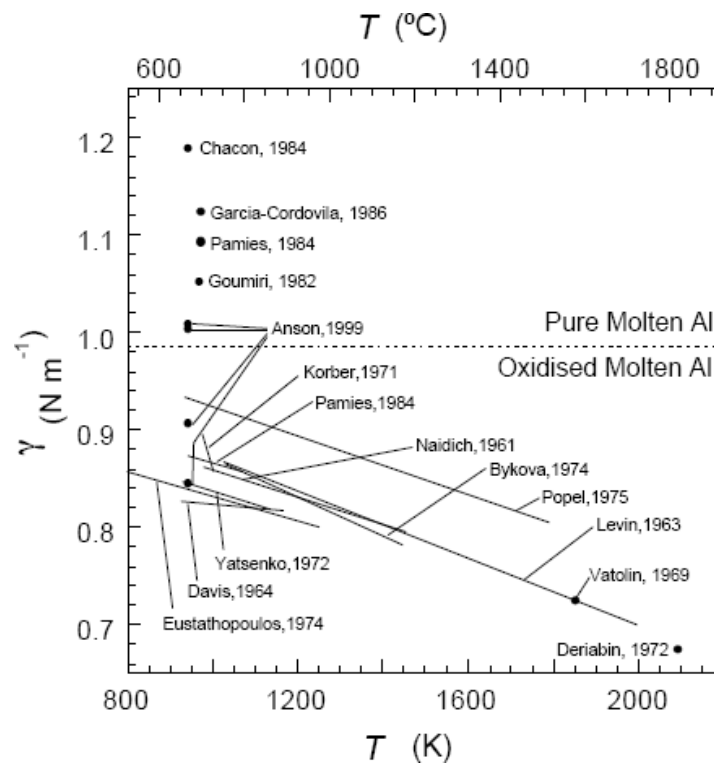
### 2.5.2.4 Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan pada sel polyhedral akan menyebabkan pembulatan bentuk sel dengan batas datar yang melebar dan permukaan sel yang menipis. Kejadian ini dibarengi dengan pembekuan logam cair dari permukaan sel ke batas datar sel.



**Gambar 2.18** Efek dari tegangan permukaan pada batas sisi yang datar <sup>[7]</sup>

Spesi yang bermigrasi dari permukaan gas-liquid, akan menurunkan energi antar permukaan *foam*. Dengan membatasi efek dari tegangan permukaan pada gelembung, maka akan mengurangi *driving force* aliran material dari permukaan sel ke batas datar sel, karena bisa merusak (menipiskan) permukaan sel.



**Gambar 2.19** Gabungan nilai tegangan permukaan dari aluminium murni yang diukur pada keadaan vakum ( $P < 10^{-4}$  Pa). <sup>[7]</sup>

Persebaran yang diperlihatkan pada gambar, menunjukkan bahwa terdapat kesulitan dalam penentuan data yang akurat. Nilai terendah, dengan  $\gamma$  dibawah 1 Nm<sup>-3</sup>, menunjukkan kebergantungan permukaan yang teroksidasi terhadap temperatur. Sedangkan nilai tertinggi didapatkan melalui eksperimen dimana keberadaan oksigen dihindari sehingga tegangan permukaan yang didapatkan pada permukaan murni mendekati 1.05-1.11 Nm<sup>-1</sup>. Kenaikan temperatur (diatas ~1100 K) dan agitasi luar membuat lapisan tebal oksida tidak stabil.

Permukaan aluminium solid juga dapat teroksidasi secara cepat, meskipun laju oksidasi akan turun atau diabaikan saat mencapai batas ketebalan oksida pada permukaan. Batas ini dikenal sebagai *Mott thickness* dengan nilai 2 nm pada temperatur kamar, dan relatif tidak sensitif terhadap tekanan parsial oksigen. Diatas 200<sup>0</sup>C lapisan oksida akan tumbuh secara cepat dengan skala waktu harian sehingga ketebalan akan menebal secara signifikan.

### 2.6.1 Tingkat Skala

*Metal foam* dapat dikarakterisasi melalui 3 skala tingkatan. Tingkat pertama, *metal foam* dapat diperlakukan sebagai material teknik yang utuh (*bulk material*), yaitu mengabaikan keberadaan porositas. Sifat material yang menjadi perhatian adalah kekakuan, kekuatan, ketangguhan dan densitasnya. Sifat-sifat tersebut merupakan kelakuan material *foam* ketika berdeformasi plastis dan mengalami *strain hardening*. Sifat-sifat ini menjadi paramater yang dapat disesuaikan dengan persyaratan untuk beberapa tipe produk *foam* komersial tertentu.

Pada tingkat kedua, *metal foam* dapat dilihat sebagai bagian sel-sel yang dirangkaikan. Sifat yang diperhatikan, termasuk didalamnya adalah kisaran dan distribusi dari ukuran sel pada sesimen tertentu; bentuk sel dan kelakuan ketika sel tersebut di rangkaikan terhadap sel yang lain; ketebalan; dan profil permukaan penampang melintang sel. Dalam usaha mengoptimalkan sifat mekanik dari *metal foam*, maka saat ini telah terdapat penelitian yang mencari hubungan diantara aspek struktur sel dengan sifat material teknik yang utuh (*bulk material*).

Pada tingkat ketiga, struktur mikro dari logam matriks *foam* menjadi hal yang signifikan. Seperti halnya struktur sel, maka gambaran distribusi fasa dapat

menentukan sifat *metal foam*. Proses produksi dari *metal foam* seringkali memerlukan partikel atau fasa tambahan yang berperan sebagai penstabil atau *surfactant* yang juga berefek pada performa mekaniknya. Pada tingkat ini, hubungan antara struktur mikro dan sifat meterial utuh, masih menjadi bahan penelitian lanjutan.

### 2.6.2 Deformasi Tarik dan Tekan

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.

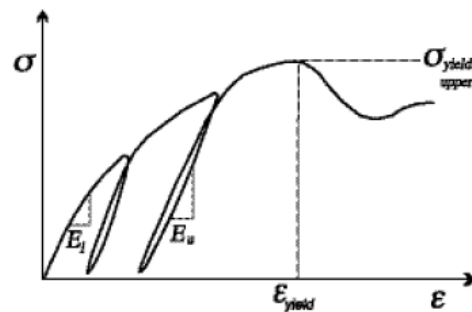
Sifat utama yang diinginkan dari *metal foam* adalah kemampuan untuk menyerap energi tekan plastis pada jumlah yang besar, kemudian mentransmisikan beban yang rendah secara konstan. Oleh karena itu, saat ini deformasi tekan pada *metal foam* telah dipelajari secara mendalam dibandingkan dengan deformasi 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* Alporas<sup>TM</sup>, menunjukkan angka yang mirip.

### 2.6.3 Defomasi *Metal Foam* Pada Pembebanan Tekan

#### 2.6.3 Kelakuan Pada Regangan Rendah

Gambar dibawah, memperlihatkan skema kurva tegangan-regangan dari *metal foam* (*closed-cell*) pada pembebanan tekan. Karakteristik yang menonjol adalah tidak adanya daerah yang memperlihatkan deformasi kembali pada keadaan semula. Modulus tangensial pada awal kurva pembebanannya cukup rendah

daripada pembebanan yang terekam saat *metal foam* dilepaskan pembebanannya.



Selain itu, pada siklus pembebanan-pelepasan beban, seringkali terlihat adanya kurva histeresis.

**Gambar 2. 20** Skema kurva tegangan regangan pada deformasi tahap awal untuk metal foam dengan pori tertutup.<sup>[5]</sup>

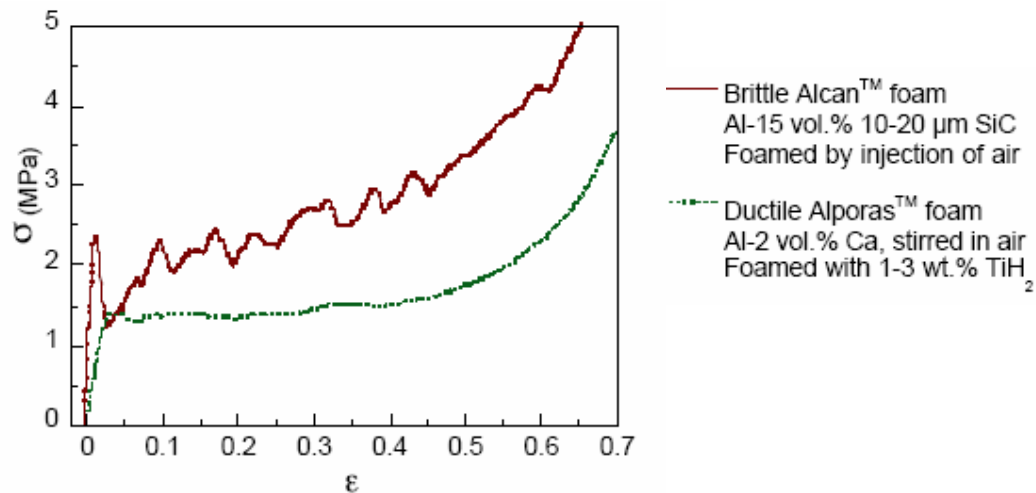
Pembebanan dilakukan dengan 2 siklus, sehingga memperlihatkan tegangan luluh, modulus elastisitas pada saat pembebanan dan modulus elastisitas saat pelepasan beban. Penggunaan *software* (image-matching), dapat memperlihatkan gambar dari kelakuan *metal foam* ketika dideformasi secara bertahap, hal ini 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. Perlu diperhatikan, bahwa deformasi elastis yang terlokalisasi muncul sebagai akibat dari tidak seragamnya bentuk *foam*.

Pada *metal foam* (*open-cell*) yang mempunyai struktur sel seragam, tidak terdapat perbedaan diantara modulus pembebanan dan pelepasan beban. Melalui *image-matching* juga terlihat bahwa pada pembebanan awal, deformasi elastis

yang terjadi akan lebih homogen. Modulus elastis tetap menjadi sifat yang paling penting pada pemakaian aluminium untuk aplikasi konstruksi.

### 2.6.2.2 Modus Kegagalan Getas dan Ulet

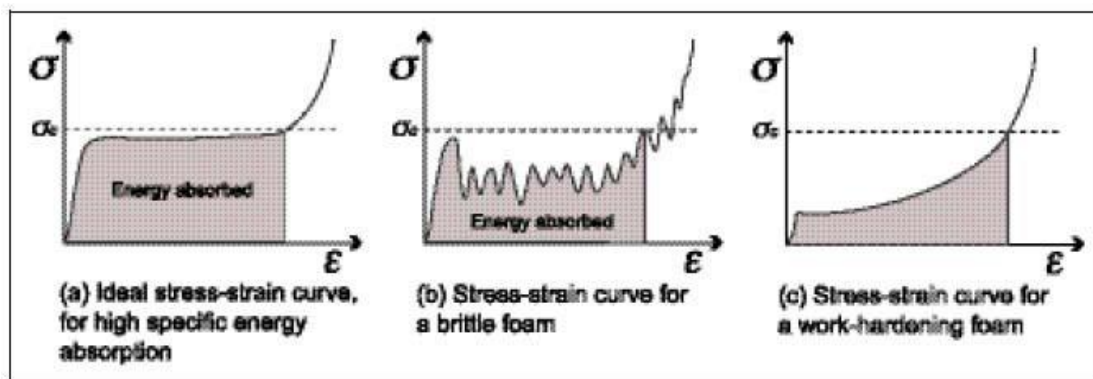
Modus kegagalan *metal foam (closed cell)* dapat dibagi kedalam dua kategori, yaitu modus kegagalan getas dan ulet. Modus kegagalan ulet ditandai oleh daerah *plateau stress* yang relatif halus pada kurva tegangan-regangan, diiringi dengan kenaikan tegangan sebagai akibat dari strain hardening atau pepadatan. Sedangkan modus kegagalan getas ditandai dengan adanya penurunan (drop) setelah kekuatan tekan awal, dilanjutkan dengan kurva tegangan-regangan yang bergerigi (naik-turun), memperlihatkan adanya *foam* yang pecah. Karakteristik kurva tegangan-regangan pada dua tipe kegagalan diperlihatkan pada gambar 2.21. *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 mempunyai kandungan paduan.



**Gambar 2.21** Kurva tegangan-regangan tekan untuk spesimen kubus dari spesimen Alulight™ (ulet) dan Alcan™ (getas).<sup>[7]</sup>

### 2.6.2.3 Modus Kegagalan untuk *Energy Absorber*

Ketika mempertimbangkan kegunaan *metal foam* sebagai material penyerap energi, terdapat 2 parameter kunci, yaitu: energi yang terserap per unit massa ketika penekanan, dan tegangan dimana energi tersebut terserap. Parameter pertama, ditunjukkan pada area dibawah kurva tegangan-regangan *metal foam*. Berdasarkan aplikasi, bentuk kurva sebelum tegangan melampaui nilai kritis,  $\sigma_c$ , adalah penting. seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.22, penurunan tegangan setelah luluh, atau kenaikan *strain hardening* yang tinggi, dapat saja terjadi. pada umumnya, hal ini tidak diinginkan. plateau stress  $\sigma_{\text{plateau}}$ , dapat juga direkayasa agar cocok dengan tegangan kompresi untuk aplikasi-aplikasi tertentu, sekalipun dengan cara mengurangi *densification strain*.



**Gambar 2.22** Skema kurva tegangan regangan untuk: a) foam ideal, b) foam yang mengalami kegagalan getas, dan c) foam dengan work hardening yang luas.<sup>[7]</sup>

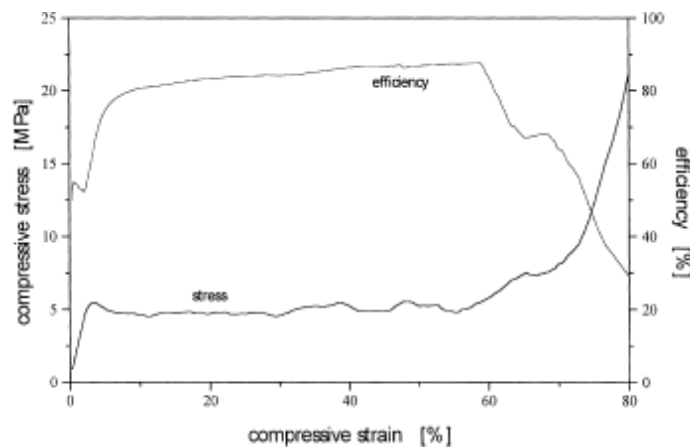
Daerah efektif saat penyerapan energi mekanik terjadi pada bagian kelabu sebelum mencapai pembebanan tekan kritis  $\sigma_c$



## 2.7 Aplikasi Aluminium *Foam* Sebagai Penyerap Energi Mekanik

### 2.7.1 Efisiensi dan Kapasitas Penyerapan Energi Mekanik

*Aluminum foam* dapat digunakan sebagai penyerap energi mekanik, disebabkan kemungkinannya untuk mengontrol tegangan-regangan berdasarkan material matriks, geometri sel dan densitas relatifnya. Selain itu, keunggulan lainnya adalah kemampuan untuk menyerap energi mekanik tanpa menimbulkan tegangan maksimum atau percepatan gaya yang terlalu tinggi sehingga menyebabkan kerusakan atau cedera yang lebih serius.



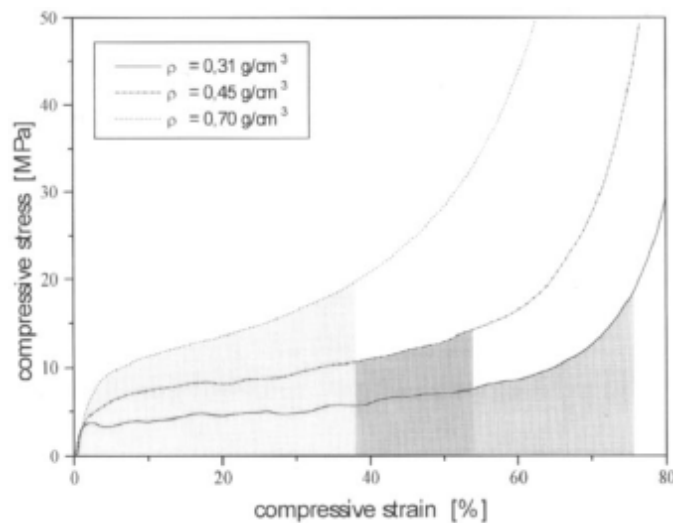
**Gambar 2.23** Kekuatan tekan dan efisiensi penyerapan energi untuk foam AlSi

$$(\rho = 0.36 \text{ g.cm}^{-3})^{[7]}$$

Gambar 2.23 memperlihatkan kelakuan deformasi dari aluminium *foam* terhadap pembebanan tekan. Energi per volume yang diserap oleh material ditunjukkan secara langsung oleh luas area dibawah kurva tegangan-regangan. *Aluminum foam* yang memperlihatkan tegangan deformasi konstan, berarti dapat lebih menyerap energi deformasi dibandingkan dengan aluminium padat ketika keduanya dibebani sampai tingkat batas tegangan.

### 2.7.2 Diagram Penyerapan Energi Mekanik<sup>[9]</sup>

Maiti et al. telah mengembangkan metode dan mengajukan diagram penyerapan energi mekanik untuk menentukan optimasi penyerapannya. Asumsi awalnya adalah mendekati keidealan dari *foam* saat menyerap energi pada tegangan minimum. Gambar 2.24, memperlihatkan kelakuan kompresi dari tiga *foam* dari berbagai macam densitas, menjelaskan fakta-fakta ini secara detail.



**Gambar 2.24** Kelakuan tekan dari 3 macam foam AlSi12 pada berbagai densitas. Ketiga daerah kelabu memperlihatkan energi yang terserap dengan jumlah yang sama sebesar  $W^*$ <sup>[7]</sup>

Area kelabu berkaitan dengan jumlah *energy*  $W^*$  yang sama terserap oleh ketiga *foam*. Batas kanan dari setiap area kelabu menandai penekanan yang diperlukan untuk menyerap sejumlah energi ini. Pada kasus ini, densitas terendah, kurva tegangan – regangan telah melewati tegangan konstan sebelum energi  $W^*$  terserap. Oleh karena itu, tegangannya mencapai harga yang tinggi. Sedangkan untuk *foam* dengan densitas tertinggi akan memperlihatkan daerah datar dengan tegangan konstan dan di sisi lain mempunyai tegangan maksimum yang paling tinggi. Sebagai perbedaan, untuk energi impak yang diberikan  $W^*$ ,

*foam* dengan densitas medium terbebani tepat berada pada akhir area datar. Oleh karena itu, hal ini memperlihatkan puncak tegangan yang terendah untuk penyerapan energi. Dengan keadaan ini, untuk setiap energi impact yang diberikan kepada *foam* dengan densitas spesifik yang dapat ditentukan, maka akan memperlihatkan tegangan maksimum terendah yang mungkin selama deformasi. Maka disimpulkan bahwa bermacam tingkat energi dan tegangan impact yang diperbolehkan untuk *foam* dapat dipilih.

Terdapat berbagai teknik untuk memilih dan mengevaluasi penyerap energi mekanik yang terbuat dari aluminum *foam*. Akan tetapi, perlu diperhatikan untuk aplikasi struktur yang sederhana, maka *foam* tidak langsung memperlihatkan penyerapan energi mekanik optimal. Dengan mengintegrasikan elemen2 kedalam struktur secara kes