

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitiin Sebelumnya

Alizadeh, et al. (2011) melakukan penelitian tentang *Compressive properties and energy absorption behavior of Al-Al₂O₃ composite foam synthesized by space-holder technique*. Pada penelitian ini memvariasikan fraksi volume dari Al₂O₃ (0-10 %vol.) dan jumlah partikel *carbamide* dengan rata-rata ukuran 1,2 mm yang akan digunakan untuk memproduksi fraksi porositas 50, 60 dan 70 %vol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tekan dan daya serap energi dari Al-Al₂O₃ *foam* bergantung pada fraksi volume dari Al₂O₃ dan fraksi porositas. Dengan mengurangi fraksi porositas maka daya serap energi dan kekuatan tekan akan semakin tinggi. Meningkatnya fraksi volume Al₂O₃ dari 0% sampai dengan 2% menyebabkan peningkatan kapasitas penyerapan tegangan dan energi. Tetapi meningkatnya fraksi volume Al₂O₃ dari 2% hingga 10% menyebabkan penurunan tegangan dan kapasitas penyerapan energi. Tingkat penurunan ini menurun dengan bertambahnya fraksi porositas.

Aboraia, et al. (2011) melakukan penelitian tentang *production of aluminium foam and the effect of calcium carbonate as foaming agent*. Pada penelitian ini aluminium foam diproduksi menggunakan kalsium karbonat (CaCO₃) sebagai *blowing agent* dan efek penambahan fraksi berat CaCO₃ terhadap sifat mekanik dari aluminium foam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kalsium karbonat dapat menjadi alternatif sebagai *blowing agent* untuk memproduksi *closed cell aluminium foam* dengan sifat mekanik yang dapat diterima. Selain itu dari penelitian ini juga didapat bahwa densitas terendah dari *aluminium foam* pada penambahan kalsium karbonat sekitar 4%, daya serap energi pada *aluminium foam* meningkat seiring dengan peningkatan dari densitas relatif.

Irawan, Akhyari, Oerbandono. (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan CaCO₃ sebagai *blowing agent* terhadap porositas dan kekuatan tekan spesifik pada *aluminium foam*. Pada penelitian ini *aluminium foam* dibuat menggunakan metode pengecoran logam. Bahan yang digunakan adalah aluminium seri A6061, CaCO₃ sebagai *blowing agent*, dan serbuk Al₂O₃ sebagai penstabil *foam*. Variasi serbuk CaCO₃ adalah 0%, 1%, 3% dan 5% dari berat total. Sementara itu, rasio berat serbuk alumina dan serbuk CaCO₃ adalah 1:2. Pengujian tekan dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine*.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan serbuk CaCO_3 dapat meningkatkan porositas pada A6061 *foam*, namun cenderung menurun mulai pada spesimen 3% sampai di atasnya karena adanya peningkatan kandungan serbuk alumina. Sementara itu kekuatan tekan spesifik dari *aluminium foam* yang dihasilkan semakin meningkat.

2.2 *Metal Foam*

Metal foam adalah sebuah material logam temuan terbaru dimana terdapat pori-pori pada hampir setiap bagian logam tersebut. Pori-pori yang ada pada logam tersebut menyebabkan nilai porositas pada logam tersebut sangat tinggi. Pada umumnya logam yang mengandung porositas yang tinggi dianggap cacat, tetapi pada kasus ini porositas tersebut sengaja dibuat. Prosentase porositas pada *metal foam* dapat mencapai 70% dari total volume. Porositas yang ada pada *metal foam* berpengaruh pada densitasnya. Semakin tinggi porositas dari suatu *metal foam* maka densitasnya menjadi semakin rendah, densitas yang rendah menjadikan *metal foam* memiliki konstruksi yang ringan.

Pada saat ini telah banyak material logam yang dikembangkan sebagai bahan untuk produksi *metal foam* seperti aluminium, nikel, magnesium, timah, tembaga, titanium, baja dan bahkan emas. Dari semua material logam di atas, aluminium menjadi material logam yang paling sering digunakan sebagai matriks dari *metal foam*. Dipilih aluminium karena memiliki densitas yang rendah, bersifat *ductile*, konduktivitas termal yang tinggi, serta harga yang murah.

2.2.1 Karakteristik *Metal Foam*

Tingkat porositas yang tinggi pada *metal foam* membuat densitasnya rendah sehingga didapatkan konstruksi yang ringan. Selain konstruksinya yang ringan, *metal foam* memiliki karakteristik-karakteristik lain seperti memiliki kekakuan yang tinggi, dapat menyerap energi, dan dapat mengisolasi panas dan suara.

Ketika terdeformasi, *metal foam* dapat menyerap energi mekanik. Hal ini disebabkan oleh tingkat nilai porositas yang relatif tinggi pada material logam tersebut. *Metal foam* juga dapat digunakan sebagai penyerap/peredam energi impak saat situasi tabrakan.

Karakteristik lainnya dari *metal foam* adalah dapat meredam getaran dan menyerap suara. Selain itu *metal foam* memiliki konduktivitas termal yang rendah. Hal ini disebabkan oleh adanya porositas yang ada pada *metal foam*, kandungan udara pada strukturnya membuat konduktivitas termalnya jauh lebih rendah dari pada aluminium murni.

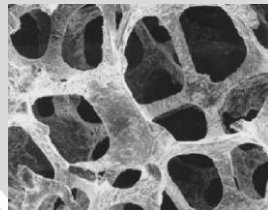
Konduktivitas termal yang rendah pada *metal foam* mengakibatkan material ini dapat menahan suhu yang tinggi.

2.2.2 Jenis-jenis *Metal Foam*

Dilihat dari struktur pori yang ada, *metal foam* dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu *open cell metal foam* dan *closed cell metal foam*. Berikut adalah penjelasannya :

a. *Open Cell Metal Foam*

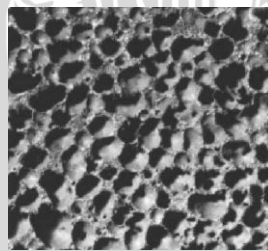
Open cell metal foam memiliki struktur pori-pori yang berhubungan antara satu dengan yang lain. *Metal foam* jenis ini sering digunakan sebagai *heat exchanger* dan dimanfaatkan dalam bidang kedirgantaraan.



Gambar 2.1 *Open cell metal foam*
Sumber : Srivasta dan Sahoo, 2007:734

b. *Closed Cell Metal Foam*

Closed cell metal foam memiliki struktur pori-pori yang terpisah antara satu dengan yang lainnya. Pori-pori tersebut terpisah oleh dinding sel logam. Karakteristik dari *closed cell metal foam* adalah memiliki kekuatan yang baik.



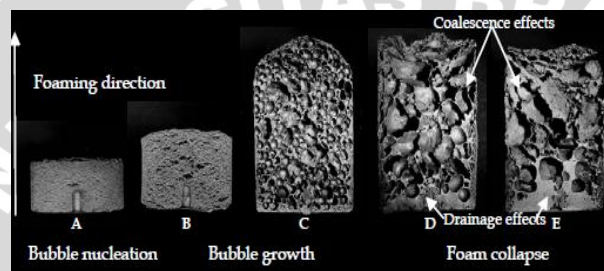
Gambar 2.2 *Closed cell metal foam*
Sumber : Srivasta dan Sahoo, 2007:734

2.2.3 Proses Pembentukan Pori pada *Metal Foam*

Berdasarkan dari cara gas tersebut dibawa ke dalam aluminium cair, proses *foaming* pada pembuatan *metal foam* dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu dengan sumber gas internal dan gas eksternal. Proses *foaming* dengan menggunakan sumber gas internal yaitu terbentuknya gelembung gas yang berasal dari dekomposisi termal serbuk *blowing agent*.

Sedangkan proses foaming dengan menggunakan sumber gas eksternal yaitu terbentuknya gelembung gas yang berasal dari luar dengan cara meniupkan atau menyuntikkan gas melalui pipa kapiler, gas yang biasanya digunakan yaitu gas argon, nitrogen dan oksigen. Kualitas dan sifat dari *foam* yang dihasilkan dipengaruhi beberapa parameter manufaktur diantaranya adalah tekanan atmosfer, kecepatan pemanasan dan suhu dari siklus dekomposisi termal.

Proses *foaming* dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu; nukleasi gelembung, pertumbuhan gelembung dan pengempisan (*collapses*) busa yang dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Proses pembentukan pori pada *aluminium foam*
Sumber : Duarte dan Oliveira, 2012 : 61

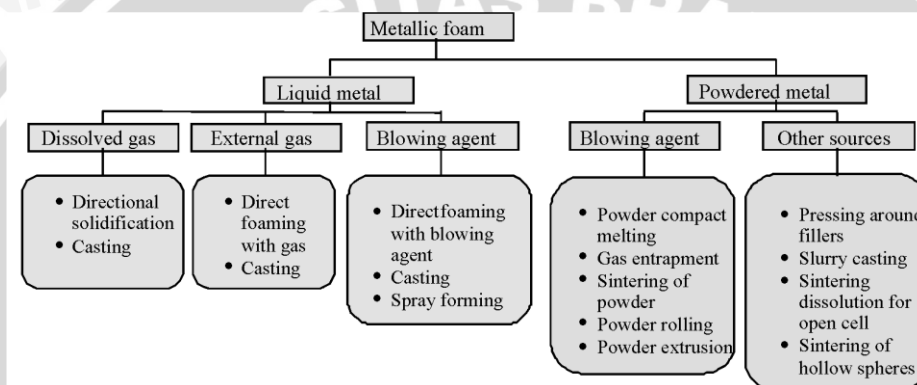
Nukleasi gelembung biasanya terjadi pada kondisi padat, tekanan yang dihasilkan oleh gas dapat merusak bentuk dari matriks logam, proses ini dikendalikan oleh prinsip pengolahan logam semi padat, proses peleburan logam dan dekomposisi termal dari serbuk *blowing agent* memegang peran penting dalam mengatur dinamika pertumbuhan gelembung. Bentuk dari gelembung gas sangat beragam selama proses pembusaan. Karakteristik material dan bahan yang digunakan dapat mempengaruhi pertumbuhan gelembung gas yang tidak seragam. Perubahan morfologi busa dapat diklasifikasikan menjadi 4 macam, yaitu:

1. Aliran merupakan pergerakan gelembung gas terhadap satu dengan yang lainnya disebabkan oleh kekuatan eksternal atau perubahan tekanan gas internal misalnya selama proses *foaming*.
2. *Drainase* (pengerinan) merupakan aliran logam cair yang melewati perbatasan Plateau - perpotongan tiga film busa disebabkan oleh gaya gravitasi dan kapiler.
3. Pecah (atau pergabungan) merupakan ketidakstabilan yang terjadi secara tiba-tiba dalam sebuah film yang mengarah pada hilangnya gelembung gas.

4. Pengasaran (atau *Ostwald ripening*) merupakan difusi gas yang terjadi secara lambat dari gelembung kecil menjadi gelembung yang lebih besar disebabkan oleh perbedaan tekanan gas internal.

2.2.4 Metode Pembuatan *Metal Foam*

Ada beberapa cara untuk memproduksi *metal foam*. Berdasarkan proses dan bahan awal metode pembuatan *metal foam* dibagi menjadi dua yaitu dengan metode *liquid metal/melt process* dan metode *powdered metal/powder metallurgy*. Peta proses dalam produksi *metal foam* dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.4 Peta proses produksi *metal foam*
Sumber : Srivasta dan Sahoo, 2007:735

1. Produksi Metal Foam Menggunakan Metode *Liquid Metal*

Pada metode ini, proses produksi *metal foam* dengan cara meleburkan logam, lalu untuk mendapatkan *foam* pada logam cair diciptakan gelembung gas di dalamnya. Terdapat tiga cara untuk menghasilkan gelembung di dalam logam cair, berikut adalah penjelasannya :

a. *Dissolved gas*

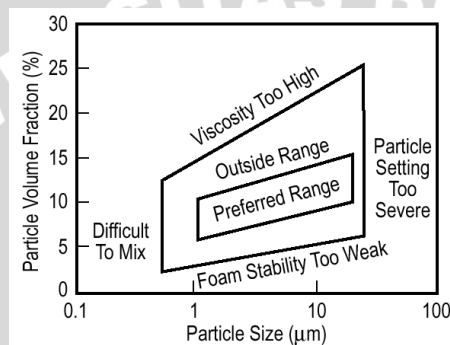
Pada metode ini, gelembung gas didapatkan dengan cara melarutkan gas pada logam. Gas tersebut akan mengendap pada logam cair selama terjadinya proses solidifikasi sehingga menimbulkan struktur busa pada logam tersebut.

b. *External gas*

Pada metode ini gelembung gas pada logam cair dihasilkan dengan menginjektikan gas seperti udara, nitrogen, atau argon. Gelembung udara juga bisa dihasilkan dengan menggunakan *impeller* yang berputar pada logam cair.

Gelembung yang ada pada logam cair bersifat tidak stabil, gelembung-gelembung tersebut cenderung naik ke permukaan karena adanya gaya gravitasi. Hal ini dapat dicegah

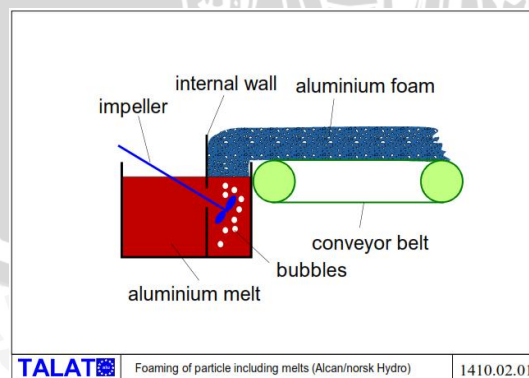
dengan meningkatkan nilai viskositas dari logam cair tersebut agar gelembung udara yang ada tetap terjaga di dalam logam cair tersebut. Salah satu cara untuk meningkatkan viskositas dari logam cair adalah dengan menambahkan partikel keramik seperti *silicon-carbide* (SiC), *aluminium-oxide* (Al₂O₃) atau *magnesium-oxide* (Mg₂O₃). Fraksi volume dari partikel yang disarankan adalah sekitar 10%-20% dan ukuran partikel yang disarankan rata-rata 5-20 μm. Apabila fraksi volume dan ukuran partikel terlalu kecil atau terlalu besar dari rentang yang disarankan akan menyebabkan masalah pada kemampuan pencampuran, viskositas pada cairan logam dan kestabilan gelembung yang terbentuk. Rentang fraksi volume dan ukuran partikel yang diperbolehkan dalam produksi metal foam dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Rentang ukuran dan fraksi volume partikel yang disarankan untuk produksi *metal foam*

Sumber : Banhart, 2001 : 566

Pada gambar 2.6 di bawah ini menunjukkan skema produksi *metal foam* menggunakan metode *External gas*.



Gambar 2.6 Skema pembuatan *metal foam* dengan metode *external gas*

Sumber : TALAT, 1999 : 4

Langkah pertama yang dilakukan pada metode ini adalah melelehkan aluminium yang akan digunakan menjadi *aluminium foam*. Untuk meningkatkan viskositasnya, campuran

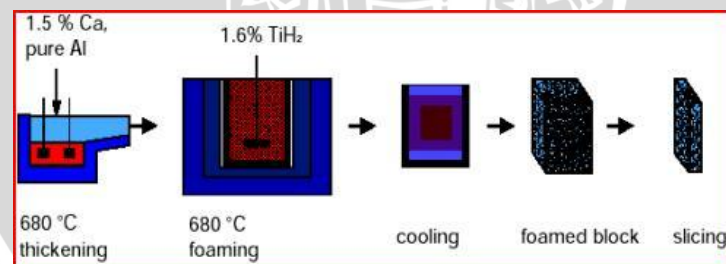
salah satu partikel keramik yang disebutkan di atas pada lelehan aluminium tersebut. Pencampuran antara partikel keramik dengan lelehan aluminium ini biasa disebut dengan *metal matrix composite* (MMC). Proses pencampuran ini memiliki kekurangan yaitu sulit untuk mencapai distribusi yang homogen dari partikel keramik pada aluminium cair tersebut. Maka dari itu biasanya digunakan aluminium yang telah dipadukan terlebih dahulu.

Langkah kedua yang dilakukan pada metode ini adalah dengan menginjeksikan gas ke dalam aluminium cair. Untuk menginjeksikan gas tersebut digunakan *rotating impeller* atau *vibrating nozzle* yang telah dirancang khusus. Fungsi dari alat tersebut adalah untuk menciptakan dan mendistribusikan gelembung-gelembung gas secara merata di dalam aluminium cair. Karena adanya campuran partikel keramik pada aluminium cair tersebut, gelembung yang terbentuk relatif stabil. Setelah itu logam tersebut ditarik menggunakan conveyor, lalu dibiarkan dingin dan mengeras.

Perusahaan yang mengembangkan produksi *aluminium foam* menggunakan metode ini adalah Hydro Aluminium di Norwegia dan Cymat Aluminium Corporation di Kanada.

c. *Blowing agent* (Alporas)

Pada metode ini, gelembung gas dihasilkan dengan cara menambahkan *blowing agent* ke dalam logam cair. Akibat suhu yang tinggi dari logam cair tersebut, *blowing agent* yang ada di dalamnya terurai sehingga melepaskan gas yang menyebabkan adanya gelembung-gelembung gas pada logam cair. Berikut adalah skema produksi *metal foam* menggunakan metode *blowing agent*.



Gambar 2.7 Skema produksi *metal foam* menggunakan metode *blowing agent* (alporas)
Sumber : TALAT, 1999 : 5

Dapat dilihat pada gambar di atas menunjukkan langkah-langkah pembuatan aluminium foam menggunakan metode *blowing agent* (alporas). Langkah pertama adalah menambahkan unsur kalsium (Ca) ke dalam lelehan aluminium pada suhu 680° C, kemudian diaduk selama beberapa menit. Penambahan unsur kalsium ke dalam aluminium cair memicu terbentuknya senyawa *calcium-oxide* (CaO), *calcium-aluminium-oxide* (CaAl₂O₄),

atau bahkan Al_4Ca yang menyebabkan viskositas dari aluminium cair tersebut meningkat. Biasanya digunakan 1,5% - 3% wt kalsium (Ca) pada produksi *aluminium foam*.

Setelah viskositas aluminium cair mencapai nilai yang diinginkan, langkah kedua adalah dengan menambahkan titanium hibrida (TiH_2) sebagai *blowing agent* yang nantinya akan menghasilkan gas hidrogen di dalam aluminium cair tersebut. Penambahan titanium hibrida ini biasanya sebesar 1,6% wt. Aluminium cair yang telah tercampur dengan titanium hibrida akan mulai mengembang. Semua tahapan pembuatan aluminium foam menggunakan metode ini memakan waktu sekitar 15 menit untuk bejana yang berukuran $0,6\text{ m}^3$. Setelah didinginkan, *foam* cair berubah fase menjadi *aluminium foam* padat dan dapat dikeluarkan dari cetakan untuk diproses lebih lanjut. Dengan metode ini biasanya dihasilkan pori-pori dengan ukuran 2 – 10 mm dan didapat densitas sekitar $0,18 - 0,24\text{ gr/cm}^3$.

Adapun perusahaan yang memproduksi *aluminium foam* dengan metode ini sejak tahun 1986 adalah Perusahaan Shinko Wire Co, Amagasaki, Jepang. Volume produksinya saat ini mencapai 1000 kg *foam* per hari. Perusahaan Jiangsu Tianbo *Light-Weight* di Nanjing Cina juga memproduksi *aluminium foam* dengan metode yang sama.

2. Produksi *Metal Foam* Menggunakan Metode *Powdered Metal*

Berbeda dengan metode sebelumnya dimana pembentukan *foam* dilakukan saat logam berada pada fase cair, pada metode ini pembentukan *foam* dilakukan saat logam berada pada fase padat dengan melalui proses metalurgi serbuk. Untuk tahapan dari proses metalurgi serbuk meliputi pencampuran antara bubuk logam (baik itu logam murni atau logam paduan) dengan *blowing agent*, lalu campuran dari serbuk tersebut dikompaksi untuk mendapatkan bentuk yang diinginkan, untuk tahapan yang terakhir campuran serbuk yang telah dikompaksi lalu di-*sintering* untuk mendapatkan bentuk benda yang padat. Pembuatan metal foam menggunakan metode *powdered metal* memiliki keunggulan dibandingkan menggunakan metode *liquid metal* yaitu dapat mengontrol bentuk, ukuran, dan distribusi dari pori-pori yang terbentuk.

2.3 Senyawa *Blowing Agent*

Blowing agent adalah senyawa kimia yang bila dipanaskan pada suhu tertentu dapat terdekomposisi termal dan menghasilkan gas. Senyawa inilah yang biasa digunakan untuk membentuk struktur pori pada *metal foam*. Senyawa ini dicampurkan saat matriks logam dalam fase cair. Akibat suhu logam cair yang tinggi, senyawa *blowing agent* yang ada di dalamnya mengalami dekomposisi (terurai) dan melepaskan gas. Gas inilah yang nantinya bertanggung jawab atas terbentuknya struktur pori pada *metal foam*.

Untuk mendapatkan *foam* yang berkulitas, ada dua kriteria yang harus dipenuhi. Untuk yang pertama adalah distribusi yang merata partikel *blowing agent* ke dalam matriks logam. Prosedur pencampuran antara partikel *blowing agent* dan matriks logam harus menghasilkan distribusi yang homogen, hal ini dilakukan untuk menghindari penggumpalan partikel *blowing agent* pada matriks logam yang dapat menyebabkan cacat dan ketidaksempurnaan pada struktur *foam* tersebut. Kriteria yang kedua adalah memastikan koordinasi perilaku logam cair dan karakteristik dekomposisi termal dari *blowing agent* untuk menghindari pembentukan retakan pada *foam*.

Rentang temperatur antara dekomposisi termal dari *blowing agent* dengan titik lebur dari matriks logam yang besar dapat menyebabkan pembentukan yang tidak beraturan, yang kemudian dapat menyebabkan penyimpangan pada bentuk akhir *foam*. Maka dari itu untuk mendapatkan kualitas *foam* yang baik, rentang temperatur tersebut harus diminimalkan.

Ada beberapa senyawa *blowing agent* yang biasa digunakan untuk memproduksi *metal foam*, diantaranya adalah titanium hibrida (TiH_2), zirkonium hibrida (ZrH_2), dan magnesium hibrida (MgH_2). Belakangan ini diketahui bahwa senyawa karbonat, seperti kalsium karbonat (CaCO_3) juga dapat digunakan sebagai alternatif *blowing agent* dalam memproduksi *metal foam*.

2.3.1 Kalsium Karbonat (CaCO_3)

Kalsium karbonat memiliki rumus kimia CaCO_3 , memiliki warna dasar putih serta biasanya dapat dijumpai dengan mudah di kalsit, batu kapur, batu gamping dan juga batu marmar. Kalsium karbonat juga banyak terdapat pada *stalagmit* dan *stalaktit* yang biasanya terletak di daerah-daerah pegunungan tinggi.



Gambar 2.8 Kalsium Karbonat (CaCO_3)
Sumber : PT. Saribumi Sidayu, Ltd, 2015

Kalsium karbonat memiliki beberapa karakteristik yang membuat senyawa ini dapat digunakan sebagai *blowing agent* dalam proses produksi *aluminium foam*. Karakteristik

yang pertama adalah kalsium karbonat memiliki nilai massa jenis yang hampir sama dengan nilai massa jenis dari aluminium cair, yaitu sekitar $2,71 \text{ gr/cm}^3$ sampai $2,83 \text{ gr/cm}^3$. Karakteristik yang kedua adalah temperatur dekomposisi termal dari kalsium karbonat di atas temperatur lebur dari aluminium, biasanya dalam interval suhu antara 650°C sampai 930°C . Adapun reaksi yang terjadi pada kalsium karbonat ketika terdekomposisi termal adalah sebagai berikut:



Pada reaksi diatas, ketika terdekomposisi kalsium karbonat akan menghasilkan kalsium oksida (CaO). Hal ini terjadi karena pada reaksi tersebut setiap molekul dari kalsium akan bergabung dengan satu atom oksigen dan molekul lainnya akan berikatan dengan oksigen menghasilkan CO_2 yang nantinya akan digunakan untuk membentuk struktur pori pada *aluminium foam*.

Temperatur yang digunakan dalam proses produksi *aluminium foam* dengan metode *Liquid Metal* yang menggunakan kalsium karbonat sebagai *blowing agent* biasanya diambil sekitar 725°C . Bila digunakan temperatur yang lebih tinggi dari 780°C , kalsium karbonat akan terdekomposisi sangat cepat dan menyebabkan distribusi gelembung yang tidak merata pada lelehan aluminium.

2.4 Aluminium Oksida (Al_2O_3)

Aluminium oksida memiliki rumus kimia Al_2O_3 , pada umumnya senyawa ini disebut alumina. Senyawa ini diperoleh dari hasil pemurnian bauksit (biji aluminium). Aluminium oksida memiliki sifat-sifat seperti berbentuk kristal, berpenampilan zat padat putih sangat higroskopik, tidak berbau, memiliki kekerasan yang tinggi, memiliki densitas sekitar $3,95\text{-}4,1 \text{ gr/cm}^3$, dan memiliki titik lebur sebesar 2072°C . Penggunaan aluminium oksida yang paling signifikan adalah dalam produksi logam aluminium. Aluminium oksida bertanggung jawab untuk ketahanan logam aluminium atas pelapukan. Karena kekerasannya yang tinggi, membuat aluminium oksida cocok digunakan sebagai komponen dalam alat pemotong.

Pada produksi metal foam, aluminium oksida adalah salah satu partikel keramik selain *silicon-carbide* (SiC), dan *magnesium-oxide* (Mg_2O_3). Partikel keramik ini digunakan untuk memperbaiki sifat *wettability* (mampu basah) pada serbuk CaCO_3 yang digunakan sebagai *blowing agent*. *Wettability* adalah kemampuan suatu cairan untuk membasahi seluruh permukaan zat padat (Pech-Chanul, Katz & Makhlof, 2000 : 565) sehingga matrik mampu membasahi partikel CaCO_3 . Tanpa penambahan serbuk alumina, serbuk kalsium karbonat bila dicampurkan ke dalam aluminium cair cenderung mengambang dipermukaan

aluminium cair. Maka dari itu sebelum dicampurkan ke dalam aluminium cair, serbuk kalsium karbonat dicampur dengan serbuk alumina terlebih dahulu agar dapat tercampur secara merata dan mampu terdekomposisi dengan baik saat dicampurkan ke dalam aluminium cair. Penambahan serbuk alumina juga berfungsi untuk meningkat viskositas logam cair agar gelembung gas yang terbentuk dari dekomposisi termal dari *blowing agent* dapat stabil di dalam logam cair, sehingga struktur pori pada metal foam dapat terbentuk dengan baik. Hal ini dapat terjadi karena adanya senyawa kalsia alumina ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) yang terbentuk dari reaksi CaO dengan Al_2O_3 . Kalsia alumina berperan untuk meningkatkan viskositas juga menstabilkan gelembung gas yang terbentuk dari dekomposisi termal serbuk kalsium karbonat selama proses solidifikasi (Sutarno, Soepriyanto, Korda, dan Dirgantara, 2015 : 149)

2.5 Aluminium

Aluminium berasal dari biji aluminium yang disebut bauksit. Aluminium merupakan peringkat kedua dari logam yang paling banyak digunakan setelah baja (Surdia dan Chijiwa, 1999 : 129). Aluminium sering digunakan sebagai bahan pembuatan alat transportasi, alat konstruksi, aplikasi kelistrikan, peti kemas, dan lain-lain. Keutamaan dari aluminium dalam bidang teknik adalah sifatnya yang unik dan menarik, yaitu mudah untuk pengerjaan lanjutan, beratnya yang ringan, konduktivitas listrik dan panas baik (De Garmo, 1998 : 157).

2.5.1 Pengolahan Aluminium

Aluminium berasal dari biji aluminium yang disebut bauksit. Untuk mendapatkan aluminium murni dilakukan proses pemurnian pada bauksit yang menghasilkan oksida aluminium atau alumina. Kemudian alumina ini dielektrosa sehingga berubah menjadi oksigen dan aluminium.

2.5.2 Sifat-sifat Aluminium

Aluminium memiliki beberapa kelebihan, diantaranya memiliki berat yang ringan, beratnya hanya $\frac{1}{3}$ dari baja. Memiliki kekuatan yang baik, bahkan beberapa aluminium paduan kekuatannya melebihi baja. Aluminium tahan terhadap korosi, mampu melawan pengaruh korosi dari elemen-elemen di atmosfer, air (termasuk air garam), oli dan bahan kimia lainnya. Memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik. Aluminium tidak bersifat magnet, tidak beracun sehingga aman digunakan untuk peralatan dan industri makanan.

Aluminium memiliki beberapa sifat fisik yang ditunjukkan pada tabel 2.1 berikut ini:

Tabel 2.1 Sifat-sifat fisik aluminium

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,99	>99,99
Massa jenis (kg/dm ³)(20°C)	2,6989	2,71
Titik Cair (°C)	660,2	653-657
Panas Jenis (Cal/g°C)	0,2226	0,2297
Hantaran Listrik (%)	64,91	59 (dianil)
Tahanan listrik koefisien temperatur (/°C)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuaian (M/°C)	23,86 x 10 ⁶	23,5 x 10 ⁶
Jenis kristal, konstanta kisi	FCC, $\alpha = 4,013\text{kX}$	FCC, $\alpha = 4,013\text{kX}$

Sumber : Surdia dan Kenji, 1999 : 13

2.5.3 Pengaruh Unsur Paduan

Unsur-unsur paduan mempunyai pengaruh yang berbeda bila berada dalam logam lain, pada aluminium unsur seperti: besi, chromium, magnesium, *manganese*, silikon, tembaga, dan *zinc* masing-masing memberikan pengaruh sebagai berikut :

1. Besi (Fe) digunakan untuk memperbaiki ketahanan *hot tearing*, dan mengurangi kecenderungan *die sticking* atau *soldering* dalam cetakan logam, memperbaiki keuletan dan mampu dimesin. Akan tetapi jumlahnya harus dibatasi karena kecenderungan membentuk campuran atau fasa tak larut yang berpengaruh jelek pada *casting*, contoh fasa intermetalik (komplek) $\text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$, Al_3FeSi yang bentuknya menyerupai jarum.
2. Chromium (Cr) digunakan dalam paduan aluminium untuk menekan pertumbuhan butir, fenomena ini terjadi karena fasa Cr_7Al mempunyai kelarutan yang rendah dan Cr memperbaiki ketahanan korosi dalam paduan aluminium.
3. Magnesium (Mg) berkontribusi mengikatkan kekerasan dan kekuatan dalam paduan Al-Si karena fasa larut Mg_2Si yang tergantung temperatur.
4. *Manganese* (Mn) dalam paduan aluminium dianggap sebagai pengotor dan keberadaannya dikontrol sekecil mungkin. Apabila berkombinasi dengan *ferro* membentuk fasa *insoluble*.
5. Silikon (Si) digunakan untuk meningkatkan karakteristik pengecoran dengan memperbaiki fluiditas, ketahanan *hot tearing* dan *feeding*. Jumlah maksimum Si dalam proses pengecoran tergantung pada kebutuhannya, untuk solidifikasi lambat (*sand* dan

investment) sekitar 5-7% Si, untuk cetakan permanen sekitar 7-9% Si, dan untuk *die casting* sekitar 8-12%. Penambahan silikon ke dalam aluminium menghasilkan kumpulan *eutectic* yaitu pertumbuhan secara bersamaan dua fasa atau lebih dari kondisi *melt* yang kemungkinan menghasilkan morfologi berbeda. Berbentuk *lamellar* apabila fraksi volume tiap fasa hampir sama atau *interface* pada bagian minornya berupa plat, dan akan berbentuk serat (*fibrous*) apabila fase yang ada fraksi volumenya kecil.

6. Tembaga (Cu) digunakan untuk memperbaiki kekuatan dan kekerasan dalam paduan *heat treatable*, tetapi unsur ini akan menurunkan ketahanan korosi, *hot tearing*, dan *castability*. Cu mempunyai pengaruh negatif terhadap porositas, artinya kandungan Cu yang rendah akan mengurangi porositas. Cu dalam pengecoran paduan aluminium membentuk Al_2Cu yang tampak seperti partikel-partikel kecil *pink* diakhir solidifikasi dan Cu meningkatkan penyebaran mikroporositas. Tembaga secara signifikan meningkatkan tekanan gas hidrogen yang menyebabkan gas terlarut.
7. Zinc (Zn) ditambahkan kedalam paduan aluminium karena memberikan pengaruh yang baik pada *age hardening*.

2.5.4 Aluminium Paduan

Aluminium merupakan logam yang mudah dipadukan dengan logam lain. Macam-macam dari aluminium paduan dan nomor serinya ditunjukkan pada tabel 2.2 berikut ini:

Tabel 2.2 Klasifikasi paduan aluminium

Unsur Utama Paduan	Seri
Aluminium 99% atau lebih	1xx.x
Tembaga	2xx.x
Silikon dengan Cu dan/atau Mg	3xx.x
Silikon	4xx.x
Magnesium	5xx.x
Magnesium dan Silikon	6xx.x
Seng	7xx.x
Elemen Lain	8xx.x

Sumber : De Garmo, 1990 : 176

1. Paduan Al-Cu

Merupakan paduan yang dapat diberi perlakuan panas. Dengan dikeraskan endapannya ataupun penyepuhan sifat mekanis, paduan ini dapat menyamai sifat dari baja lunak akan tetapi daya tahan korosinya lebih rendah dibanding jenis paduan lainnya (Heine, 1976 : 294)

2. Paduan Al-Si

Paduan Al-Si merupakan paduan yang baik fluiditasnya, mempunyai permukaan coran yang baik tanpa kegetasan panas, tahan korosi, koefisien muai yang kecil, penghantar panas yang baik, dan ringan

3. Paduan Al-Mg

Merupakan paduan yang tahan korosi. Paduan ini disebut *hidronalium*. Cu dan Fe tidak dapat dicampur pada paduan ini karena Cu dan Fe adalah unsur pengotor bagi Al-Mg.

4. Paduan Al-Mg-Si

Merupakan jenis paduan aluminium, magnesium, dan silikon dengan seri 6xxx, sebagai paduan praktis dapat diperoleh paduan 6053, 6063, dan 6061. Kekuatan tempa pada paduan ini masih kurang dibandingkan dengan paduan lainnya, sangat liat, sangat baik untuk ekstruksi, dan sangat baik pula untuk diperkuat dengan perlakuan panas setelah pengerjaan.

5. Paduan Al-Zn

Merupakan paduan yang banyak mengandung aluminium dan tahan terhadap korosi. Diaplikasikan untuk kontruksi tempat duduk pesawat terbang, perkantoran, dan kontruksi lainnya yang membutuhkan perbandingan antara ketahanan korosi dan berat yang tidak terlalu besar. Titik lebur paduan ini adalah 476-657°C.

2.6 Pengujian Densitas

2.6.1 Densitas

Densitas (simbol: ρ – Greek: rho) adalah sebuah ukuran massa per volume. Rata-rata kepadatan dari suatu objek yang sama massa totalnya dibagi oleh volume totalnya.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2-2)$$

Dengan:

ρ = Kepadatan sebuah benda (gr/cm^3)

m = Massa total benda (gr)

v = Volume benda (cm^3)

2.6.1.1 True Density

Adalah kepadatan pada benda tanpa adanya porositas di dalamnya. Dapat didefinisikan sebagai perbandingan massa terhadap volume sebenarnya (gr/cm^3). Persamaan menurut ASTM E252-84 yaitu:

$$\rho_{th} = \frac{100}{\left\{ \left(\frac{\%Al}{\rho_{Al}} \right) + \left(\frac{\%Cu}{\rho_{Cu}} \right) + \left(\frac{\%Fe}{\rho_{Fe}} \right) + etc \right\}} \quad (2-3)$$

Dengan:

ρ_{th} = Densitas teoritis atau *True Density* (gr/cm^3)

$\rho_{Al}, \rho_{Cu}, \rho_{Fe}, etc$ = Densitas unsur (gr/cm^3)

%Al, %Cu, %Fe, etc = Prosentase berat unsur (%)

2.6.1.2 Apparent Density

Adalah berat setiap unit volume material termasuk cacat yang terdapat pada material yang akan diuji (gr/cm^3). Menurut ASTM B311-02 rumusnya adalah:

$$\rho_s = \rho_w \frac{w_s}{w_s - (w_{sb} - w_b)} \quad (2-4)$$

Dengan:

ρ_s = Densitas sampel atau *Apparent Density* (gr/cm^3)

ρ_w = Densitas air (gr/cm^3)

W_s = Berat sampel di luar air (gr)

W_b = Berat keranjang di dalam air (gr)

W_{sb} = Berat sampel dan keranjang di dalam air (gr)

2.7 Pengujian Tekan

2.7.1 Definisi Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan (*Compressive Strength*) adalah suatu kemampuan suatu bahan untuk menerima beban tekan tanpa mengalami kerusakan dan dinyatakan sebagai tegangan maksimum sebelum putus. Kekuatan tekan suatu material dinyatakan sebagai tegangan tekan.

Gaya normal yang bekerja pada suatu unit luasan pada penampang melintang. Intensitas gaya normal per unit luasan disebut tegangan normal dan dinyatakan dalam unit gaya per unit luasan, misalnya lb/in^2 , atau N/mm^2 . Apabila gaya-gaya dikenakan pada ujung-

ujung batang sedemikian sehingga batang dalam kondisi tertekan maka terjadi tegangan tekan. Tegangan tekan didefinisikan sebagai distribusi gaya tekan persatuan luas penampang material atau bahan. Sehingga tegangan tekan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2-5)$$

Dengan:

σ_c = Tegangan tekan (N/mm²)

F = Gaya aksial (N)

A = Luas penampang (mm²)

Sedangkan, regangan didapatkan dari perubahan panjang spesimen yang diukur kemudian dibagi dengan panjang awal spesimen, dijelaskan pada rumus dibawah ini:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2-6)$$

Dengan:

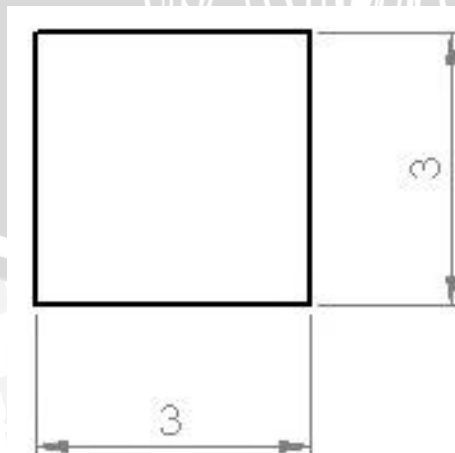
ε = Regangan (mm/mm)

Δl = Perubahan panjang (mm)

l_0 = Panjang awal (mm)

2.7.2 Bentuk dan Dimensi Benda Uji

Berdasarkan ISO 13314, bentuk dan dimensi spesimen pengujian kekuatan tekan adalah seperti gambar 2.7 di bawah ini:



Gambar 2.9 Bentuk dan dimensi uji tekan (cm)

Bentuk dan dimensi spesimen yang digunakan dalam pengujian tekan adalah berbentuk kubus dengan ukuran panjang, lebar dan tebal masing-masing sebesar 3 cm.

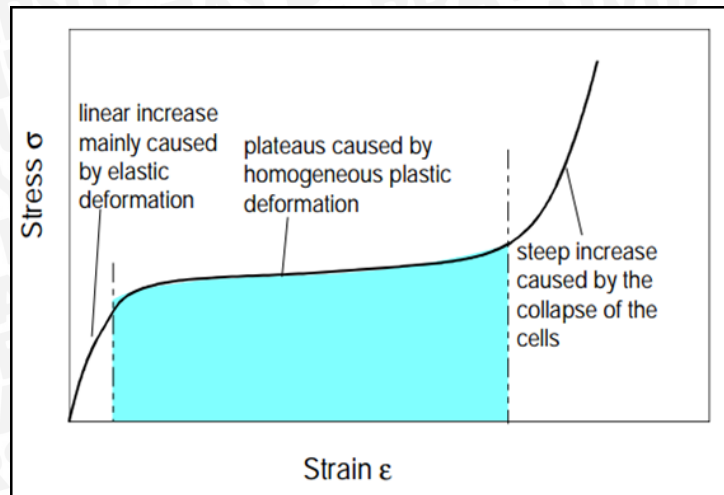
2.7.3 Deformasi pada *Metal Foam*

Deformasi adalah perubahan bentuk atau ukuran yang disebabkan pengaruh beban yang dikenakan padanya. Terdapat dua macam deformasi yang dapat terjadi, yaitu deformasi secara plastis dan deformasi secara elastis. Deformasi plastis adalah suatu perubahan bentuk yang ada meskipun beban yang menyebabkan deformasi dihilangkan. Sedangkan deformasi elastis adalah suatu perubahan bentuk yang terjadi karena adanya beban, bila bebannya diiadakan bentuknya akan kembali seperti semula.

Salah satu karakteristik yang penting dari *metal foam* adalah kapasitas dari penyerapan energi tekan plastis pada jumlah yang besar, setelah itu beban yang rendah di salurkan secara konstan. Ketika ditekan *metal foam* menunjukkan hanya sedikit terjadi deformasi elastis sebelum akhirnya runtuh. Pada sebagian besar runtuhnya *metal foam*, *foam* melibatkan deformasi plastis yang besar pada dinding pori-pori yang runtuh dan merambat pada pori-pori yang lain akibat pemberian tegangan yang kecil dan hampir konstan. Pergerakan dislokasi pada logam akan menyebabkan jumlah energi yang dapat diserap semakin besar.

2.7.4 Hubungan Tegangan-Regangan pada *Metal Foam*

Salah satu karakteristik yang penting dari *metal foam* adalah mampu untuk menyerap energi. Di antara beberapa metode pengujian mekanik yang ada, untuk mengetahui kemampuan menyerap energi dari *metal foam* digunakan pengujian tekan. Berikut adalah skema kurva tegangan-regangan dari *aluminium foam* hasil pengujian pembebanan tekan :



Gambar 2.10 Skema kurva tegangan-regangan aluminium foam pada kondisi ideal
Sumber : TALAT, 1999:9

Dari gambar 2.10 di atas dapat diketahui kurva tersebut terbagi menjadi 3 daerah yang khas. Pada kurva tegangan-regangan pengujian tekan ini menunjukkan peningkatan tegangan secara linear (1) pada awal deformasi dan tegangan *plateaus* hampir konstan di bagian tengah (2) diikuti oleh kenaikan tegangan yang curam atau tajam pada tahap akhir (3). Proses di bawah ini adalah penjelasan dari perilaku khas dari aluminium foam :

1. Tidak seperti dalam kasus logam padat, tahap pertama tidak hanya disebabkan oleh deformasi elastis. Pada *aluminium foam* deformasi plastis dapat terjadi pada tegangan yang rendah.
2. Adanya deformasi plastis yang seragam menyebabkan daerah *plateaus*.
3. Runtuhnya sel menyebabkan peningkatan yang sangat curam pada kurva. Dinding sel yang saling berlawanan mulai untuk menyentuh satu dengan yang lain.

Bentuk kurva tegangan-regangan yang khas pada pengujian tekan *aluminium foam*, terutama daerah *plateaus* yang panjang menyebabkan pada tegangan yang relatif rendah *aluminium foam* mampu menyerap energi dalam jumlah yang besar (potensi menyerap energi meningkat dengan luas meningkat di bawah *plateaus*). Dengan meningkatnya densitas relatif, kapasitas tegangan *plateaus* dan kapasitas penyerapan energi juga akan meningkat, tetapi densifikasi regangan akan menurun.

2.7.5 Kekuatan Tekan pada *Metal Foam*

Struktur pori yang terbentuk pada *metal foam* akan mempengaruhi sifat mekanisnya. Dimana semakin banyak struktur pori yang terbentuk maka volume yang didapat akan semakin kecil sehingga akan menurunkan nilai densitas dari *metal foam*. Selain

mempengaruhi nilai densitasnya, banyaknya struktur pori yang terbentuk pada *metal foam* juga akan mempengaruhi besar prosentase nilai porositasnya, dimana semakin banyak struktur pori yang terbentuk maka prosentase nilai porositas yang didapat akan semakin tinggi.

Nilai porositas yang ada pada suatu material merupakan kerugian bila material tersebut diberi beban. Material yang memiliki prosentase nilai porositas yang tinggi ketika diberi beban, maka beban yang diterima akan disalurkan menuju pori-porinya, sehingga terjadi pemusatan beban pada dinding pori-pori sehingga menyebabkan daerah pori-pori tersebut mudah mengalami deformasi atau menjadi titik awal terjadinya retakan. Maka didapatkan kesimpulan bahwa semakin tinggi prosentase nilai porositas pada *metal foam* akan menurunkan nilai kekuatan tekannya.

2.8 Hipotesis

Dengan adanya penambahan prosentase berat (% wt) serbuk alumina (Al_2O_3) pada pembuatan *aluminium foam* dapat memperbaiki sifat mampu basah (*wettability*) dari serbuk kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai *blowing agent*. Sehingga saat serbuk kalsium karbonat dicampurkan ke dalam aluminium cair mampu terdispersi secara merata ke seluruh bagian dan mampu terdekomposisi sempurna. Selain itu penambahan serbuk alumina juga berfungsi untuk meningkatkan viskositas logam cair agar gelembung gas yang terbentuk dari dekomposisi termal dari *blowing agent* dapat stabil di dalam logam cair. Namun penambahan serbuk alumina yang berlebih dapat menyebabkan viskositas pada logam cair terlalu tinggi sehingga gelembung gas yang terbentuk terganggu kestabilannya. Maka dari itu penambahan prosentase berat (% wt) serbuk alumina (Al_2O_3) pada pembuatan *aluminium foam* dapat meningkatkan nilai densitas dan kekuatan tekannya.