

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian tentang *aluminum foam* dengan blowing agent CaCO_3 sudah pernah dilakukan dari mulai meneliti tentang pengaruh penambahan magnesium, pengaruh terhadap kekerasan, pengaruh terhadap kekuatan tekan. Agustian *dkk* (2013) melakukan penelitian dengan menggunakan CaCO_3 sebagai blowing agent melalui metode *melt based process*. Dalam penelitian tersebut bertujuan untuk meneliti bagaimana pengaruh magnesium yang terkandung pada paduan *aluminum foam* yang mengandung blowing agent CaCO_3 mempengaruhi kekuatan mekanik dan sifat fisis, menggunakan beberapa variasi kadar mg. Dari hasil pengujian kalsium karbonat dapat digunakan sebagai *blowing agent* untuk membuat *aluminum foam* dari bahan Al-Mg. Produk *aluminum* dengan dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Produk *aluminum Foam* (a. 4%Mg; b. 6%Mg; c. 8%Mg) (Agustian, 2012).

Dari gambar tersebut disimpulkan bahwa produk dengan kadar magnesium sebesar 4% memiliki pori yang merata, berbeda dengan spesimen b dan c yang memiliki pori yang tidak merata dan hanya tampak pada beberapa bagian sementara masih terdapat beberapa bagian yang tidak memiliki pori. Dari penelitian ini juga dilakukan pengujian densitas dituntukan pada Tabel 2.1 dengan menggunakan prinsip Archimides dengan menggunakan neraca dan mengacu pada standar ASTM 373-88.

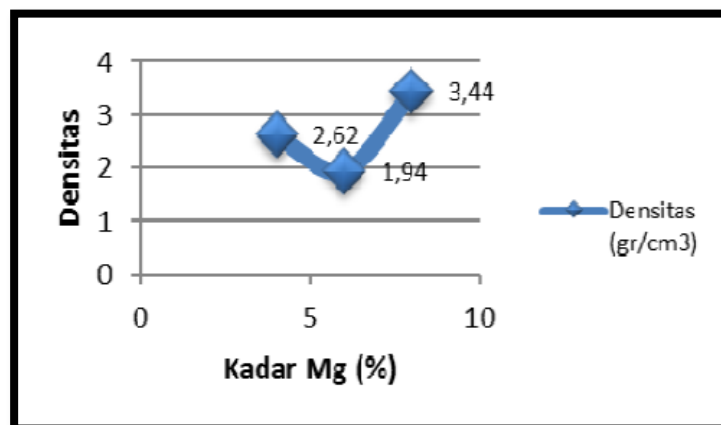
Tabel 2.1. Hasil Pengujian Densitas (Agustian, 2012).

No.	Massa Kering (m_s) (gr)	Massa setelah di rendam (m_b) (gr)	Massa digantung (m_g) (gr)	Massa tali penggantung (m_k) (gr)
1	190	200	130	2.3
2	170	175	90	2.3
3	180	190	140	2.3

Tabel 2.2. Analisa Kadar Mg pada *Aluminum Foam* terhadap Densitas Produk (Agustian, 2012).

No.	W Aluminium (gr)	Magnesium (% wt Al)	W CaCO_3 3% wt Al (gr)	W Al-Powder (gr)	Rasio CaCO_3 : Al-Powder	Densitas (gr/cm^3)
1	190	4	5,7	1,71	10 : 3	2,62
2	170	6	5,1	1,53	10 : 3	1,94
3	180	8	5,4	1,62	10 : 3	3,44

Dari data densitas pada Tabel 2.2 di atas dapat dilihat bahwa nilai densitas untuk kadar 4% magnesium sebesar 2,62, untuk kadar magnesium 6% sebesar 1,94 dan 8% memiliki densitas sebesar 3,44.



Gambar 2.2. Grafik Hasil Pengujian Densitas (Agustian, 2012).

Pada Gambar 2.2 di atas menunjukkan bahwa *aluminum foam* dengan kadar magnesium sebesar 8% nilainya lebih tinggi dari *aluminum foam* dengan kadar

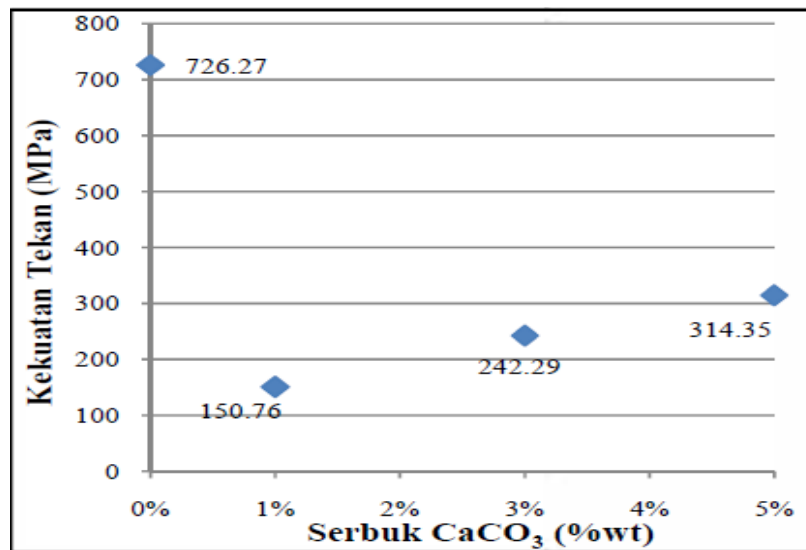
Mg 4% dan 6%. Hal ini dikarenakan kadar foam tidak merata, masih terdapat bagian yang tidak berpori ini memiliki berat yang lebih tinggi sehingga mempengaruhi nilai densitas pada produknya.

Akhyari (2012) juga melakukan penelitian menggunakan CaCO_3 sebagai *blowing agent* dengan menggunakan variasi massa CaCO_3 yaitu 0%wt, 1%wt, 3%wt dan 5%wt dalam penelitiannya yang berjudul pengaruh penambahan CaCO_3 terhadap porositas dan kekuatan tekan pada *aluminum foam*. Dalam penelitian ini didapat nilai porositas tiap spesimen dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 2.3. Data Porositas *Aluminum Foam* (Akhyari, 2012).

Variasi Spesimen CaCO_3 (%)		ρ_s (gr/cm^3)	ρ_{th} (gr/cm^3)	P (%)	$P_{\text{Rata-Rata}}$ (%)
0%	1	2,58	2,69	4,24	
	2	2,43	2,69	9,88	5,69
	3	2,61	2,69	2,95	
1%	1	0,56	1,54	63,83	
	2	0,52	1,54	66,05	64,99
	3	0,54	1,54	65,08	
3%	1	0,84	2,22	62,24	
	2	0,83	2,22	62,74	62,77
	3	0,81	2,22	63,32	
5%	1	0,85	2,09	59,22	
	2	0,83	2,09	60,32	61,30
	3	0,74	2,09	64,36	

Pada Tabel 2.3 di atas dapat dilihat hubungan antar persentase berat serbuk kalsium karbonat (CaCO_3) dengan nilai porositas pada *aluminum foam*. dapat dilihat bahwa nilai porositas tertinggi terdapat pada variasi penambahan 1% dengan porositas 64,99% sedangkan pada variasi 3% dan 5% cenderung mengalami penurunan.



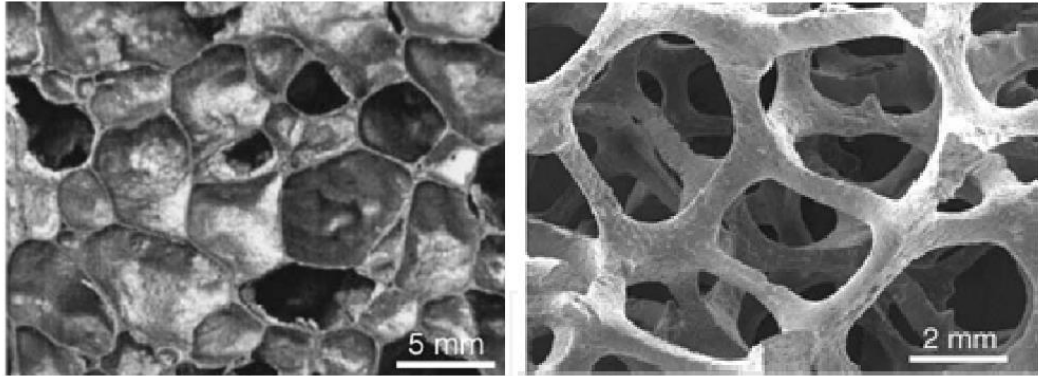
Gambar 2.3. Grafik Variasi Penambahan Persentase Berat (% wt) CaCO₃ terhadap Nilai Kekuatan Tekan pada Spesimen *Aluminum Foam* (Akhyari, 2012).

Pada Gambar grafik 2.3 menjelaskan semakin meningkatnya kekuatan tekan pada *aluminum foam* hal ini dikarenakan persentase porositas pada variasi 3% dan 5% mengalami penurunan hal inilah yang mempengaruhi kekuatan tekan pada spesimen. Jika semakin tinggi porositas yang dimiliki oleh spesimen *aluminum foam*, maka pori yang terbentuk pun akan semakin banyak. Ketika *aluminum foam* diberi suatu beban maka beban tersebut akan diterima *aluminum foam* dan disalurkan keseluruh pori sehingga beban akan terputus pada dinding pori yang menyebabkan daerah pori mudah mengalami deformasi.

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* adalah material seluler yang tiap selnya tertutup dengan lebar tiap selnya 3 (tiga) mm. Sedangkan

open-cell foam adalah material seluler yang tiap selnya terhubung dengan lebar selnya sekitar 5 (lima) mm (Kennedy, 2012). Jenis *metal foam* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. *Closed-Cell Foam* dan *Open-Cell Foam*, (Kennedy, 2012).

2.3 Aluminum Foam

2.3.1 Aplikasi Aluminum Foam

Dengan sifatnya yang unik, *aluminum foam* banyak digunakan dalam industri contohnya dalam industri otomotif, penerbangan, perkapalan. *Aluminum foam* juga banyak diaplikasikan dalam konstruksi dan bangunan seperti halnya jembatan, dan industri rumah tangga serta *furnitur*.

2.3.1.1 Aplikasi Aluminum Foam dalam Bidang Otomotif

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

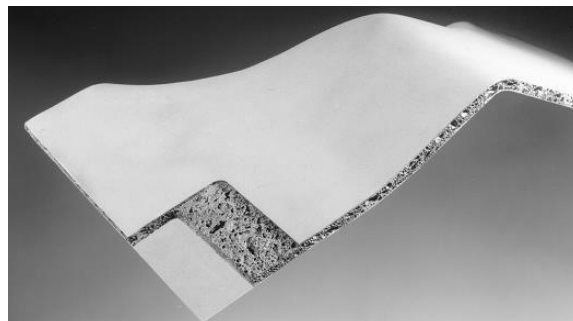
Aplikasi pertama dapat diilustrasikan pada saat terjadi kecelakaan mobil. *Aluminum foam* berfungsi sebagai penyerap energi mekanik yaitu pada rangka atau sasis mobil yang terbuat dari *Aluminum foam* atau *Aluminum Sandwich*

foam (ASF). Contohnya dapat dilihat pada Gambar 2.5. Gambar tersebut merupakan contoh produk dari *Aluminum foam*.



Gambar 2.5. Macam-Macam Rangka Mobil dengan *Metal Foam* (Kammer, 1999).

Aplikasi lain yaitu sebagai peredam suara yang digunakan untuk penutup mesin. Hal ini diterapkan untuk mengurangi kebisingan suara mesin agar tidak masuk ke bagian kabin mobil, guna pengendaraan terasa nyaman. Aplikasi yang juga digunakan pada mobil adalah bagian atap mobil, pintu mobil, penutup bagasi dan bagian-bagian lain yang memerlukan material lembaran yang cukup banyak. *Aluminum foam* digunakan pada bagian-bagian tersebut karena sifatnya yang ringan dapat mengurangi berat keseluruhan kendaraan. Contoh produk dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Profil Lembaran *Aluminum Sandwich Foam* (ASF) (Kammer, 1999).

2.3.1.2 Aplikasi Aluminum Foam Dalam Bidang Dirgantara

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

2.3.1.3 Aplikasi Aluminum Foam dalam Bidang Perkapalan

Penggunaan *Aluminum foam* dalam pembuatan bagian-bagian kapal juga dirasa penting. *Aluminum foam* mempunyai sifat yang ringan dapat mengurangi berat kapal secara keseluruhan.

2.3.1.4 Aplikasi Aluminum Foam untuk Konstruksi dan Bangunan

Pada bangunan seperti gedung, *Aluminum foam* digunakan pada bagian dinding sebagai peredam suara dan juga bermanfaat pada saat terjadi kebakaran. Selanjutnya, *Aluminum foam* biasanya digunakan pada konstruksi jembatan seperti terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Jembatan Layang (*Foam Alporas*, Shinko Wire, Jepang) (Kammer, 1999).

2.3.1.5 Aplikasi Aluminum foam dalam Industri Rumah Tangga dan Furniture

Aluminum foam sangat menarik bagi pada desainer, oleh sebab itu banyak desainer membuat berbagai macam bentuk produk properti rumah tangga.

Aplikasi dalam industri rumah tangga dan *furniture* berupa lampu, meja dan properti lainnya. Jika dikombinasikan dengan kayu maka *Aluminum foam* dapat membawa efek-efek baru dalam ruangan baik dalam ruangan rumah tangga, kantor agar lebih menarik.

2.3.1.6 Aplikasi *Aluminum foam* dalam Teknik Rekayasa

Aluminum foam juga dapat digunakan 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 dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Peralatan Teknik dari *Aluminum Foam* (Kammer, 1999).

2.3.2 Proses Pembuatan *Aluminum Foam*

Material logam yang paling sering digunakan untuk pembuatan *metal foam* adalah aluminium. *Aluminum foam* mempunyai karakteristik yang unik sehingga banyak diaplikasikan pada industri manufaktur. Pada dasarnya *Aluminum foam* dapat dibuat dengan 2 (dua) cara yaitu *solid route process* atau metalurgi serbuk (*powder metallurgy*) dan metode cair (*melt route process*).

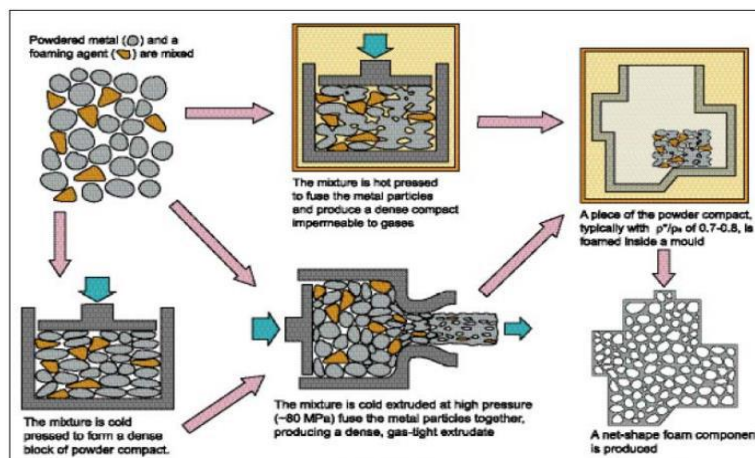
2.3.2.1 Pembuatan *Aluminum Foam* dengan *Solid Route Process*

Pembuatan *Aluminum foam* dengan metode ini ada beberapa cara dan berbeda-beda penyebutannya, diantaranya adalah:

1. Kompaksi antara Serbuk Aluminum dengan *Foming Agent* (*Foaminal*)

Proses pembuatan *Aluminum foam* dengan metode ini diawali dengan mencampurkan serbuk logam (logam murni, paduan ataupun campuran) dengan serbuk *foaming agent*. Setelah itu campuran tersebut dikompaksi sampai padat sehingga didapat produk setengah jadi (*precursor*). Kompaksi dilakukan dengan teknik tertentu sehingga *foaming agent* akan menempel pada matriks logam tanpa adanya sisa porositas. Contoh metode kompaksi yang lazim yang digunakan adalah *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 selanjutnya.

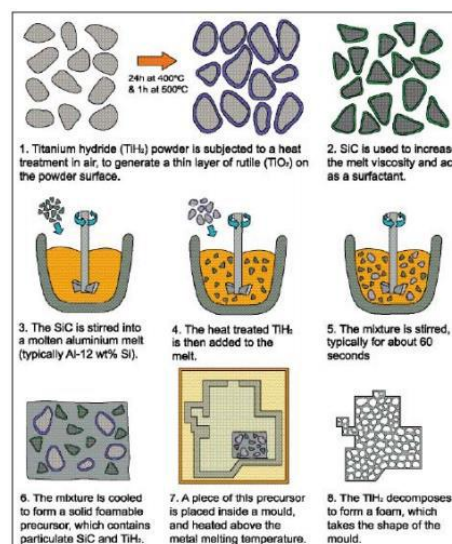
Langkah selanjutnya adalah melelehkan matriks logam yang sekaligus menyebabkan *foaming agent* terdekomposisi. Gas yang dilepaskan akan menghasilkan gaya untuk mengekspansi *precursor* sehingga terbentuk struktur dengan ukuran pori yang relatif besar. Waktu yang diperlukan untuk mengekspansi tergantung parameter temperatur dan ukurn *precursor*. Material aluminum dan paduannya, seng, kuningan, timah, emas dan logam lainnya yang dapat dibentuk menjadi *foam* dengan memilih *foaming agent* dan parameter proses yang cocok (Helmi, 2008). Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Skema Metode Kompaksi antara Serbuk Aluminum dengan *Foaming Agent* (Helmi, 2008).

2. Foaming of Ingots Containing Foaming Agent (Foamgrip)

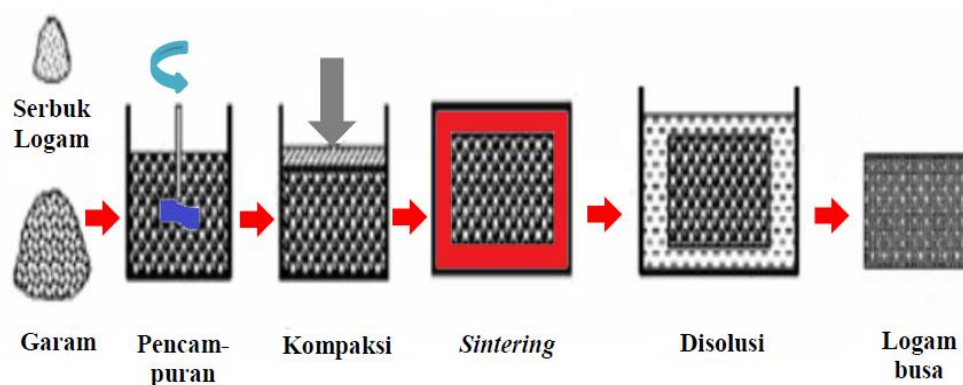
Material *precursor* juga dapat dibuat tanpa menggunakan serbuk logam. Caranya adalah dengan mencampurkan partikel *titanium hydride* (TiH_2) ke dalam logam cair, sesaat setelah cairan logam akan membeku. Hasil *precursor* yang didapatkan selanjutnya diproses dengan metode yang sama dengan yang sebelumnya. 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 berlebih dalam tahap ini. Salah satu metodenya adalah dengan menggunakan mesin *die-casting*. Serbuk *hydride* diinjeksikan kedalam cetakan (*die*) bersamaan dengan logam cair. Tantangan permasalahan yang harus dihadapi cara untuk mendapatkan serbuk TiH_2 yang didistribusikan secara homogen. Sebagai alternatif, serbuk TiH_2 dapat ditambahkan kedalam 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 pada metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Skema *Foaming of Ingots Containing Foaming Agent* (Helmi, 2008).

3. *Sintering Dissolution Process (SPD)*

Metode ini merupakan proses pembuatan aluminum *foam* melalui *solid route process* dengan sepenuhnya menggunakan proses metalurgi serbuk dan diikuti proses disolusi untuk membentuk porinya. Kelebihan dari metode ini adalah produk memiliki bentuk yang hampir sama dengan cetakan. Namun tentunya juga memiliki kekurangan seperti banyaknya faktor yang mempengaruhi hasilnya. Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Skema Metode *Sintering Dissolution Process* (Effendi, 2008).

2.3.2.2 Pembuatan *Aluminum Foam* dengan *Melt Route Process*

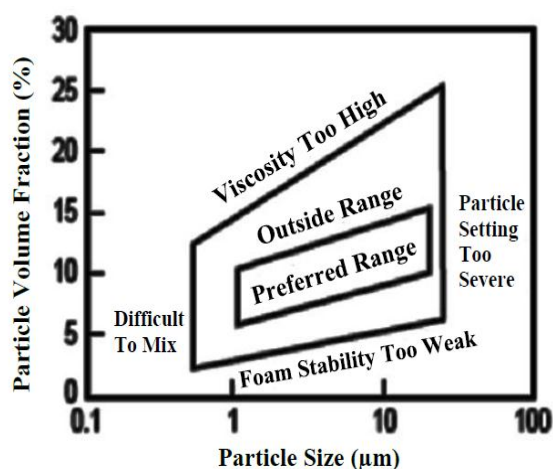
Pembuatan *Aluminum Foam* dengan metode cair atau *melt route process* ada beberapa cara, diantaranya adalah:

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

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

Metode ini pertama kali digunakan untuk membuat *aluminum foam* oleh perusahaan Hydro Aluminum di Norwegia dan Cymat Aluminum Corporation di Kanada. Pada metode ini, untuk meningkatkan nilai kekentalan aluminum cair biasanya digunakan partikel kuat seperti, *aluminum-oxide*, *silicon carbide* (SiC) atau *magnesium-oxide* sehingga kecenderungan gas yang terdapat pada aluminum cair untuk naik ke permukaan cairan aluminum dapat dihambat. Tahapan yang dilakukan pada metode ini adalah mencairkan aluminum yang telah mengandung salah satu partikel. Campuran ini biasa disebut sebagai *metal matrix composite*. Akan tetapi untuk dapat memperoleh distribusi partikel yang merata didalam cairan aluminum sangat sulit sehingga biasanya digunakan aluminum yang telah dipadukan atau aluminum paduan.

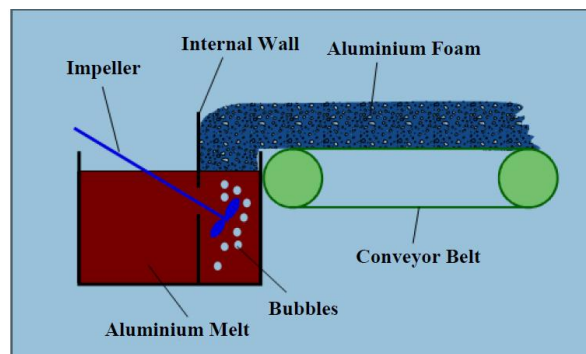
Fraksi volume dari partikel penguat adalah 10-20% dengan ukuran partikel rata-rata 5-20 μm . Apabila ukuran partikel terlalu kecil atau terlalu besar maka akan muncul masalah pada kemampuan pencampuran (*difficult to mix*), kekentalan lelehan logam dan kestabilan *metal foam* yang terbentuk. Oleh karena itu, ukuran dan fraksi volume partikel penguat harus berada pada rentang yang diperoleh (Agustian, 2012). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.12.



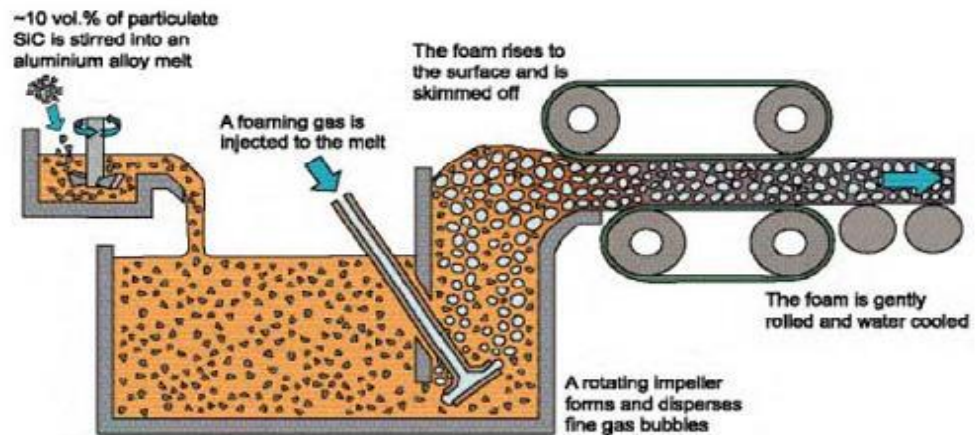
Gambar 2.12. Rentang Ukuran dan Fraksi Volume yang Diperbolehkan untuk *Metal Foam* (Agustian, 2012).

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

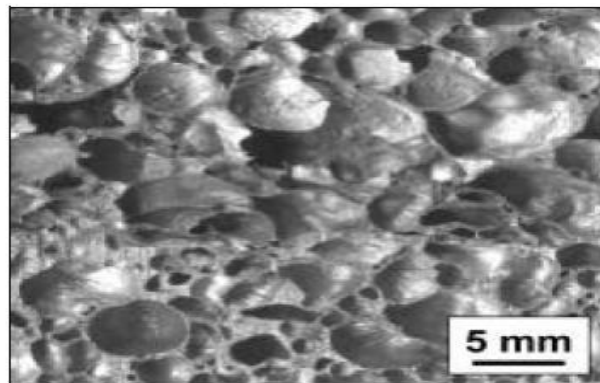
Densitas *aluminum foam* yang dihasilkan 0,069-0,54 gr/cm³, ukuran pori-pori yang dihasilkan antara 3-25 mm dan ketebalan *aluminum foam* yang bisa dihasilkan mulai dari 50 μ m (Agustian, 2012). Produk yang dihasilkan berupa *aluminum foam* dengan metode ini mempunyai porositas berkisar 80-97% (Kammer, 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 *aluminum foam*. Produk cenderung memiliki gradien pada densitas, ukuran pori-pori dan pemanjangan pori-pori (*pores elongation*). Skema metode ini dapat dilihat pada gambar 2.13 dan lebih detail pada gambar 2.14 serta hasil aluminum pada Gambar 2.15.



Gambar 2.13. Skema Metode Injeksi Secara Langsung (Kammer, 1999).



Gambar 2.14. Skema Detail Injeksi Gas Secara Langsung (Agustian, 2012)

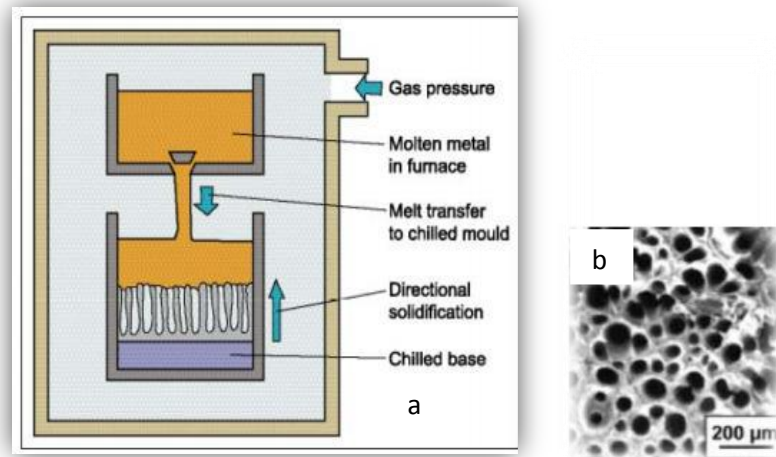


Gambar 2.15. Penampang Melintang Hasil *Aluminum Foam* dengan Metode Injeksi Gas Secara Langsung (Helmi, 2008).

2. Solid-Gas Eutectic Solidification (Gasar)

Metode ini telah dikembangkan sejak beberapa dekade yang lalu, dengan landasan teori bahwa ada beberapa jenis logam yang memiliki sistem *eutectic* bersama dengan gas hidrogen. Jika logam dilelehkan pada kondisi lingkungan dan tekanan tinggi (di atas 50 bar), maka diperoleh logam dan hidrogen yang homogen. Jika suhu diturunkan ke suhu bawah temperatur lelehan logam, maka akan tumbuh presipitat gas. Pada saat logam mengalami proses pembekuan, gas-gas akan berusaha keluar dari lelehan. Namun gas tersebut terperangkap dalam lelehan akan diperoleh logam yang terperangkap di dalam lelehan sehingga diperoleh logam yang mengandung pori-pori.

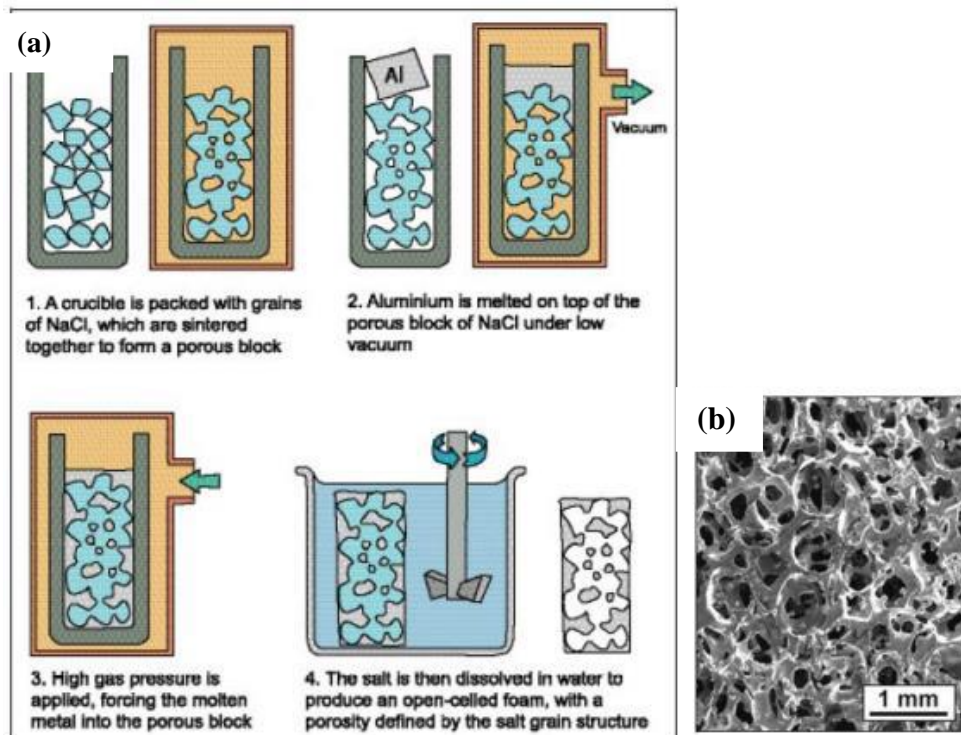
Pada umumnya, bentuk pori yang didapat berupa pori-pori besar yang memanjang sesuai arah pembekuan. Diameternya sebesar 10 μ m-10mm dan panjang pori berkisar antara 100 μ m–300mm (Helmi, 2008). Skema dari hasil metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar2.16. (a).Skema Metode *Solid-Gas Eutectic Solidification* dan Hasil *Aluminum Foam* (b).Hasil Pori (Helmi, 2008).

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

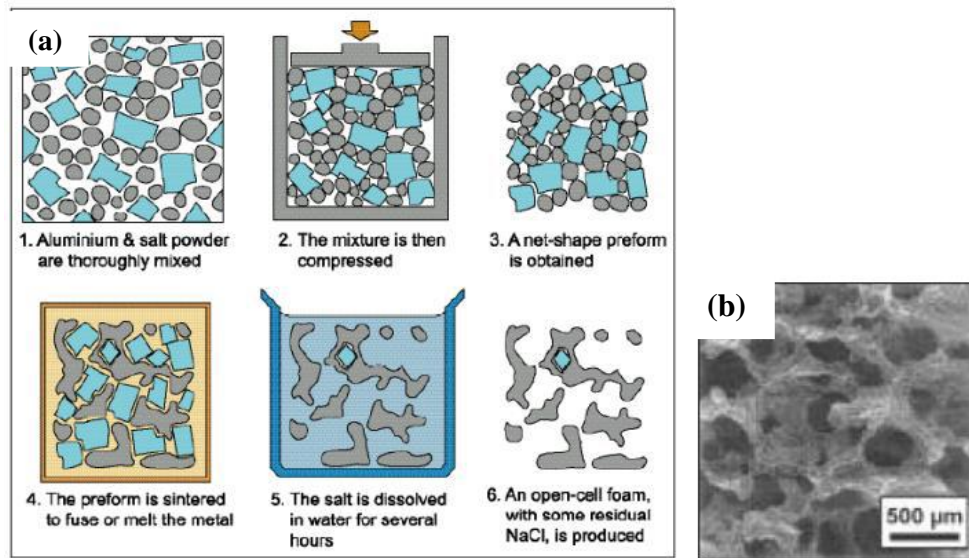
Metode ini merupakan salah satu cara pembuatan *aluminum foam* dengan sel terbuka menggunakan pola yang dapat dibuang (*disposable*). Pola yang sering digunakan adalah garam (NaCl). Ada 3 cara yang dapat dilakukan pada metode, pertama menggunakan NaCl yang disinter pada atmosfer udara selama beberapa jam agar terjadi pengabungan butir pada NaCl. Aluminum dicairkan kemudian dituang ke dalam pori pola NaCl agar terjadi proses infiltrasi. Pembekuan akan terjadi dan pola/cetakan garam dilarutkan ke dalam air sehingga diperoleh *aluminum foam* dengan sel terbuka dengan ukuran 3-4mm. Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17. (a) Skema Metode *Investment Casting* dengan Pola Garam dan Hasil *Aluminum Foam* (b) Hasil *Aluminum Foam* dengan Pola Garam (Helmi, 2008)

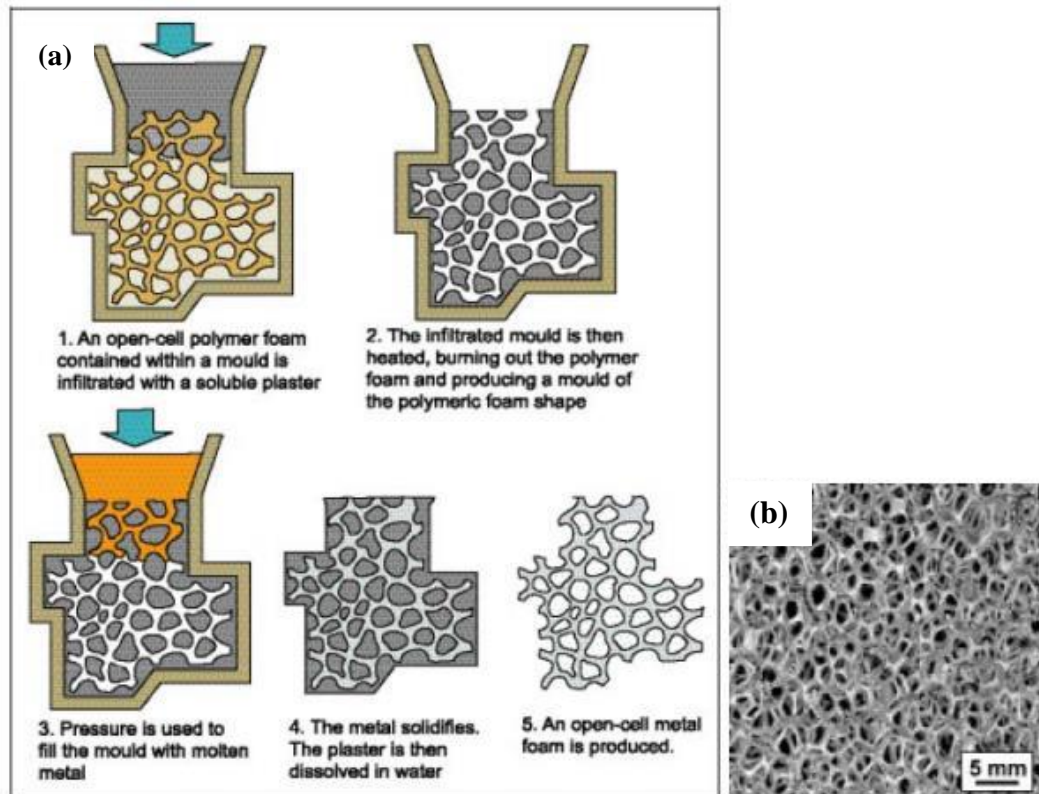
Foam yang dihasilkan dapat mempunyai ukuran sel sekecil 400 μ m. Proses ini relatif kompleks, mensyaratkan proses sintering dan pelarutan cetakan. Jenis ukuran sel terbesar dan terkecil dapat diatur dengan menentukan proses infiltrasi dari pola cetakan yang rumit serta teknik untuk melarutkannya (Helmi, 2008).

Cara kedua adalah menggunakan serbuk aluminium dan serbuk garam. Kemudian keduanya dicampur lalu dikompaksi sehingga terbentuk “blok” padat dan disinter pada temperatur diantara 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. 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 dari metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar2.18. (a) Skema *Investment Casting* dengan Pencampuran Serbuk Aluminium dan Serbuk Garam (b) Hasil dari Pencampuran Serbuk Aluminium dan Serbuk Garam (Helmi, 2008).

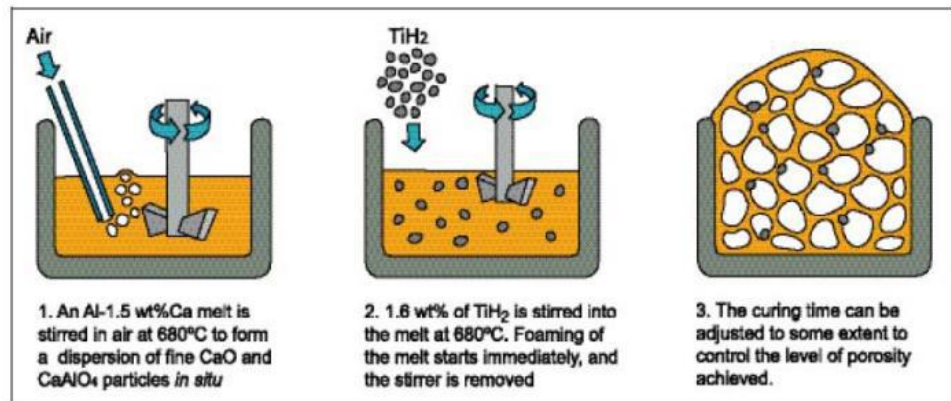
Cara ketiga dari metode *investment casting* adalah dengan menggunakan foam *polymer* bersel terbuka sebagai pol. Prosesnya yaitu *polymer* diinfiltrasi dengan plester kemudian dibakar untuk menghilangkan *polymer*. Cetakan yang tersisa diisi oleh aluminium cair, sering kali dibantu dengan kombinasi antara keadaan vakum dan tekanan eksternal. Kemudian pada akhir proses, plester dilarutkan. Proses ini tentunya mempunyai keuntungan dan kerugian dalam segi proses jika dibandingkan dengan pola garam. Variasi porositas dapat diatur dengan menggunakan cetakan *polymer*. Aplikasi penggunaan produknya adalah sebagai heat exchanger, elektroda berpori, dan filter kimia skema dan hasil metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar2.19.(a) Skema metode *Investment Casting* dengan Pola *Polymer* (b) Hasil dari *Investment Casting* dengan Pola *Polymer* (Helmi, 2008)

4. Menggunakan *Foaming Agent* (Alporas)

metode ini merupakan salah satu cara untuk membuat *aluminum foam* yaitu dengan menambahkan *foaming agent* atau agen penghasil gas ke dalam aluminum cair. *Foaming agent* akan terdekomposisi karena terpengaruh oleh temperatur, sehingga akan melepaskan gas. Gas inilah yang akan dimanfaatkan untuk proses *foaming*. Skema metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar2.20. Skema Metode Foaming Agent (Helmi, 2008)

Pada skema diatas, proses pertama yang dilakukan adalah memasukan kalsium sebanyak 1,5% ke dalam aluminum cair dengan temperatur 680°C. Kemudian aluminum cair yang sudah ditambahkan kalsium ini diaduk beberapa menit. Hal ini untuk meningkatkan viskositas atau kekentalan secara bertahap karena terbentuknya oksida.

2.4 Material

2.4.1. Aluminum

Logam aluminum adalah unsur ketiga terbanyak didunia yang memiliki peranan sangat penting dalam aplikasi di bidang industri dan otomotif. Aluminum memiliki kekuatan yang lebih rendah dibanding dengan logam lainnya, khususnya baja. Tetapi jika aluminum dipadukan (alloying) dengan unsur lain seperti silikon (Si), 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.

Aluminum juga merupakan konduktor panas dan elektrik yang baik. Jika dibandingkan dengan massanya, aluminum memiliki keunggulan dibandingkan dengan tembaga, yang saat ini merupakan logam konduktor panas dan listrik yang baik, namun cukup berat. Secara umum karakteristik atau sifat-sifat dan mekanik aluminum dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Karakteristik Aluminium (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

Benda kerja yang digunakan untuk penelitian adalah *aluminum* 6061 yang berupa plat dengan ketebalan 3mm dengan komposisi seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Komposisi Bahan Aluminium Seri 6061 (Wijyanto, 2004).

Unsur	Seri Paduan Al
	Al 6061
Si	0.02
Fe	0.51
Cu	0.05
Mn	2.21
Mg	0.20
Cr	0.00
Zn	0.00
Ti	0.02

Sebagai tambahan referensi untuk kekuatan tekan aluminum khususnya seri 6061 adalah 673 MPa (Chaint dan Papirno, 1983).

2.4.2. Foaming Agent

Foaming agent atau agen penghasil gas merupakan bahan yang biasanya ditambahkan kedalam aluminum cair pada proses pembuatan *aluminum foam*. Dalam pembuatan *aluminum foam* ada beberapa bahan kimia yang biasa digunakan sebagai foaming agent seperti titanium hidrida (TiH_2), zirkonium hidrida (ZrH_2), dan magnesium hidrida (MgH_2). Namun selain bahan tersebut kalsium karbonat ($CaCO_3$) dan garam dapur atau natrium klorida ($NaCl$) juga dapat digunakan sebagai *foaming agent*.

2.4.2.1. Penggunaan Foaming Agent

Setiap material yang stabil pada temperatur kamar namun dapat melepas gas saat kenaikan temperaturnya, maka material ini dapat berpotensi sebagai *foaming agent*. Material yang termasuk dalam *foaming agent* adalah bahan inorganik hidrat seperti kalsium klorida, *cuprit* sulfat, dan barium iodida. Termasuk juga material yang memiliki lapisan hidrat seperti *vermiculite*. Ketika material ini dipanaskan diatas temperatur dekomposisinya ($400-1300^\circ C$), maka bahan ini akan terhidrasi dan uap air yang terlepas dapat digunakan untuk mengembangkan (foaming) cairan logam. Oksida, nitrida, sulfida, karbonat, dan klorida juga cocok digunakan (Helmi, 2008).

Pembuatan aluminum dengan menggunakan foaming agent mempunyai keuntungan yaitu serbuk foaming dapat terdispersi secara efisien di dalam aluminum cair dengan pengadukan sebelum terjadi dekomposisi termal. Proses pengembangan yang terjadi didalam cairan aluminum adalah secara langsung, maka ada kecenderunng alami gelembung untuk naik kepermukaan aluminum cair juga ada efek dorongan dari gelembung yang bersebelahan. Selain itu yang perlu diperhatikan adalah proses pengadukan karena dapat menyebabkan pengabungan sel dan juga pengempesan foam secara cepat.

2.4.2.2. Kalsium Karbonat (CaCO_3)

Kalsium karbonat umumnya berwarna putih dan umumnya sering dijumpai pada batu kapur, kalsit, marmer dan batu gamping. Selain itu kalsium karbonat juga sering dijumpai pada skalakmit dan stalakmit berasal dari tetesan air tanah selama ribuan bahkan jutaan tahun. Seperti namanya, kalsium karbonat ini terdiri dari 2 unsur kalsium dan 1 unsur karbon dan 3 unsur oksigen. Setiap unsur karbon terikat kuat dengan 3 oksigen dan ikatan ini ikatannya lebih longgar dari ikatan antara karbon dengan kalsium pada suatu senyawa. Kalsium karbonat bila dipanaskan akan pecah dan menjadi serbuk remah yang lunak dan dinamakan kalsium oksida (CaO).

Kalsium karbonat adalah senyawa penghasil gas yang memiliki potensi yang bagus serta harganya murah dan ketersediaanya yang banyak. Kalsium karbonat sendiri memiliki densitas yang mirip dengan aluminium yaitu sekitar 2710 kgm^{-3} (Agustian, 2012).



Gambar 2.21. Serbuk Kalsium Karbonat sebagai *blowing agent* (PT. Kalsitech Prima, Surabaya, 2015).