

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Aboraia, et al. (2011) meneliti Pembuatan *aluminium foam* dan pengaruh kalsium karbonat sebagai *foaming agent*. Peneliti memvariasikan prosentase pemberian kalsium karbonat (CaCO_3). Aluminium murni (99,86% Al) sebagai bahan baku dan serbuk kalsium karbonat dengan kemurnian 99% dan menggunakan temperatur peleburan 725°C . Hasil penelitian ini didapat bahwa densitas terendah diperoleh pada penambahan CaCO_3 sekitar 4%. Penyerapan energi meningkat seiring dengan peningkatan densitas relatif.

Alizadeh et al. (2011) meneliti sifat kekakuan tekan dan perilaku penyerapan energy dari Al- Al_2O_3 *foam* komposit dengan menggunakan teknik *space-holder*. Penguji memvariasikan fraksi volume Al_2O_3 dari 0%-10% dan variasi porositas 50%, 60% dan 70%. Dari penelitian tersebut menunjukkan sifat tekan dan perilaku penyerapan energi tergantung pada fraksi volume Al_2O_3 dan porositas. Penambahan fraksi volume Al_2O_3 sampai 2% dapat meningkatkan kapasitas penyerapan tegangan dan energi. Namun penambahan fraksi volume Al_2O_3 2% - 10% menyebabkan penurunan tegangan tekan dan kapasitas penyerapan energi.

Fischer et al. (2013) meneliti pengaruh temperature tuang dan temperatur cetakan terhadap mikrostruktur dan kekuatan tekan pada *open-pore aluminium foam* dengan menggunakan metode *investment-cast*. Penelitian ini menggunakan bahan baku A356. Pada penelitian ini terdapat dua variasi temperature yaitu suhu rendah pada 700°C untuk cetakan dan 690°C untuk temperatur tuang, dan suhu tinggi pada 750°C untuk cetakan dan 740°C untuk temperature tuang. Penelitian tersebut membandingkan dua *open-pore aluminium foam* 10 ppi dan 15 ppi. Hasilnya temperatur pengecoran dan cetakan mempengaruhi *strut diameter* dan juga kekuatan tekan dari *aluminium foam*. Hal ini dipengaruhi kandungan Si yang terdapat pada A356 yang mengalami perubahan volume partikel. Selain itu meningkatnya temperatur membuat kemampuan alir coran meningkat.

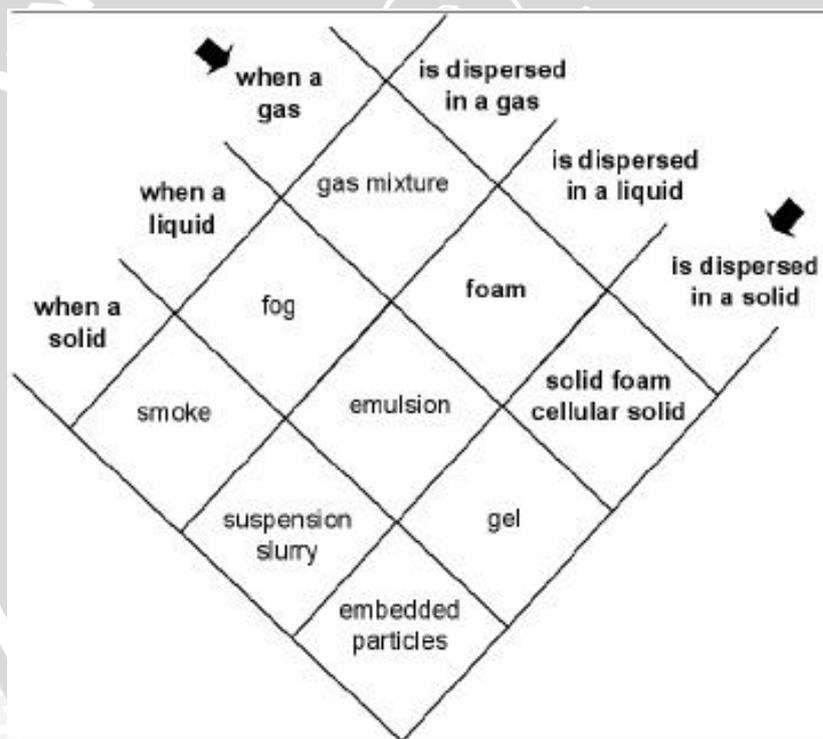
Irawan, dkk (2015) dalam penelitiannya terdapat pengaruh dari penambahan CaCO_3 sebagai *blowing agent* terhadap porositas dan kekuatan tekan pada *aluminium foam*. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa serbuk kalsium karbonat dapat digunakan sebagai *blowing agent*. Penambahan kalsium karbonat sebesar 1 % dapat meningkatkan porositas, tetapi dengan penambahan kalsium karbonat 3% - 5% menyebabkan penurunan

porositasnya. Kekuatan tekan *aluminium foam* bertambah seiring dengan bertambahnya penambahan kalsium karbonat. Sebagai pengganti TiH_2 dan ZrH_2 , kalsium karbonat dapat digunakan sebagai *foaming agent*.

2.2 Metal Foam

2.2.1 Definisi Metal Foam

Istilah solid foam (busa padat) dapat dijelaskan melalui gambar 2.1. Solid foam merupakan material yang terbentuk dari fasa gas yang terdispersi dalam fasa solid. Solid foam disebut *cellular foam* karena fasa gas yang terdispersi dalam solid membentuk konstruksi ber-sel. Solid foam yang material dasarnya adalah logam (metal), maka disebut *metal foam*. *Metal foam* memiliki nilai densitas yang lebih kecil, dan jumlah % fasa gas sebesar 30-98 % vol. (Matijasevic, 2006, 2)



Gambar 2.1 Klasifikasi jenis koloid berdasarkan fasa pembentuk

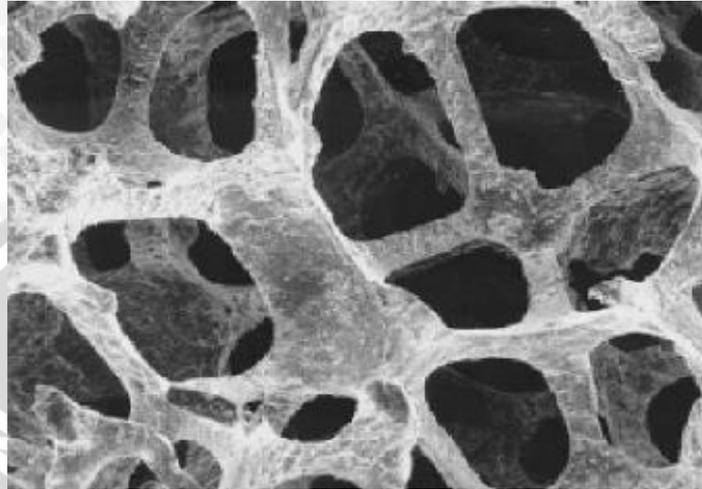
Sumber : Banhart, 2001:562

2.2.2 Klasifikasi Metal Foam

Metal foam merupakan material logam yang solid dengan struktur berpori sebesar 70%-95%. Struktur pori *metal foam* dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu:

- a. *Metal Foam* bersel terbuka (*open cell*)

Merupakan *metal foam* sel terbuka dengan tiap porinya berada di dalam maupun di luar material dengan lebar pori yaitu 5mm dan saling berhubungan satu sama yang lainnya. Keunggulan dari *open cell metal foam* yaitu pada aplikasi fungsional dimana sifat kontinyu dari porinya dimanfaatkan, contohnya untuk *heat exchangers* dan *aerospace*.

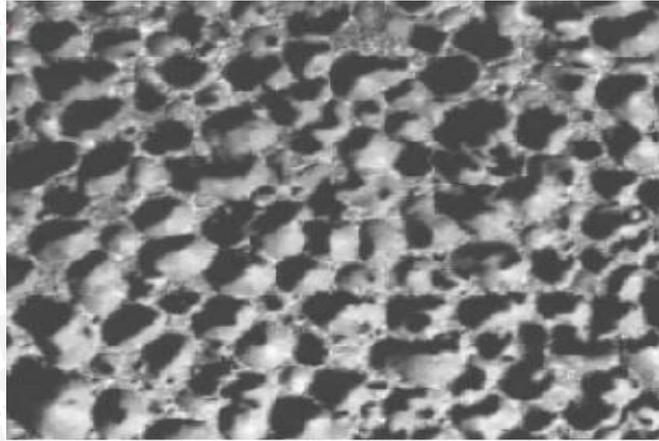


Gambar 2.2 *Metal foam* sel terbuka

Sumber :Srivastava dan Sahoo,2007:734

b. *Metal Foam* bersel tertutup (*closed cell*)

Merupakan *metal foam* sel tertutup yang tiap selnya tertutup dan selnya berada di dalam material. *Closed cell metal foam* memiliki kekuatan yang baik dan jika dibandingkan dengan *open cell metal foam* struktur pori dari *closed cell metal foam* lebih kaku. Manfaat utama dari *closed cell metal foam* yaitu untuk aplikasi struktural contohnya digunakan untuk helm sepeda, yang bertujuan untuk menahan tegangan impak yang terjadi.



Gambar 2.3 *Metal foam* sel tertutup

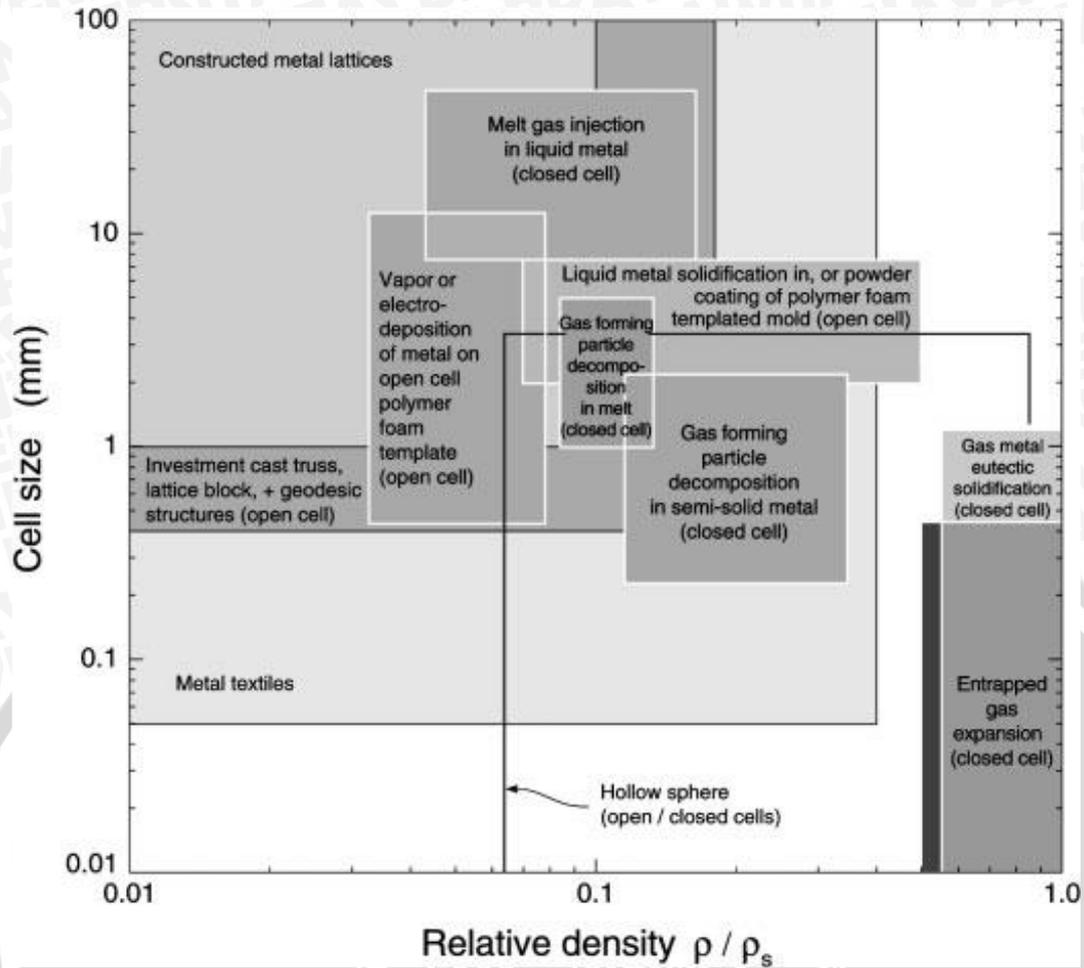
Sumber : Srivastava dan Sahoo,2007:734

2.2.3 Pembuatan *Metal Foam*

Pembuatan *metal foam* dapat dilakukan dengan berbagai rute yang telah dikembangkan (gambar 2.4). Proses pembuatan *metal foam* atau logam busa dapat dilakukan dengan dua cara yaitu melalui kondisi padat (*powder metallurgy*) dan melalui kondisi cair (*melt process*). Setiap metode dapat digunakan untuk membuat material berpori dengan densitas relatif dan ukuran sel pada kisaran yang terbatas.

Berbagai sifat dan struktur metal foam bergantung pada sifat asli logam, densitas relatif dan topology sel (misal: sel yang tertutup atau terbuka, ukuran sel, dll).

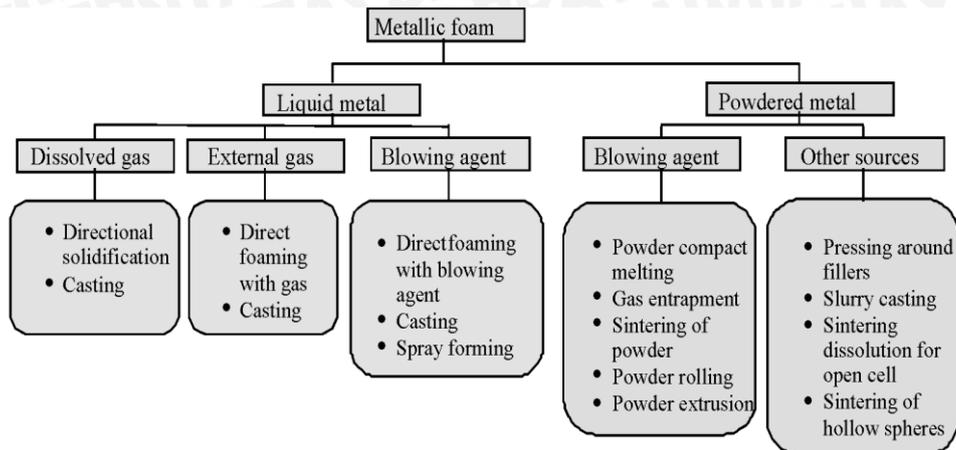




Gambar 2.4 Ukuran sel dan densitas relatif untuk metode pembuatan metal foam yang berbeda

Sumber: Wadley, 2002: 727

Proses pembuatan *metal foam* melalui kondisi cair (*melt process*) ini dapat dilakukan dengan biaya yang tidak terlalu mahal namun hasil dari proses ini memiliki kekurangan yaitu menghasilkan pori-pori dengan diameter yang besar dan heterogen (tidak seragam) sehingga distribusi porinya tidak merata dan hanya bisa digunakan untuk aplikasi tertentu. Terdapat 3 metode yang dapat dipakai dalam proses pembuatan logam busa atau *metal foam* melalui kondisi cair (*melt process*) seperti pada gambar 2.5 berikut ini.



Gambar 2.5 Macam-macam metode pembuatan *metal foam*

Sumber : Srivastava dan Sahoo,2007:735

1. *Dissolved gas*

Metal foam dibentuk dengan melarutkan gas-gas kedalam logam cair yang temperaturnya mendekati zona solidifikasi sehingga gas yang terlarut akan meninggalkan pori-pori pada logam setelah menjadi fasa padat. Gas hidrogen, nitrogen, dan oksigen yang biasanya sering dipakai dalam teknik *dissolved gas*.

2. *External gas*

Terjadi proses pembusaan (*foaming*) pada logam cair tersebut dengan sumber gas dari luar. Gas yang digunakan pada metode ini biasanya gas nitrogen dan gas argon.

3. *Blowing agent*

Metal foam terbentuk dari proses pembusaan (*foaming*) yang berasal dari adanya gelembung gas yang diakibatkan dekomposisi termal senyawa kimia. Senyawa kimia yang biasanya digunakan untuk pembuatan *aluminium foam* dengan metode penambahan *blowing agent* adalah serbuk titanium hidrida (TiH_2), serbuk zirconium hidrida (ZrH_2), serbuk magnesium karbonat ($MgCO_3$) dan serbuk kalsium karbonat ($CaCO_3$).

Sedangkan pembentukan *metal foam* melalui kondisi padat (*powder metallurgy*) melibatkan serangkaian proses metalurgi serbuk yang terdiri dari proses pencampuran, kompaksi, dan *sintering*. Kelebihan yang dimiliki dari metode *powder metallurgy* dibandingkan dengan metode *melt process* diantaranya yaitu dapat mengontrol bentuk pori, ukuran pori dan distribusi porositas.

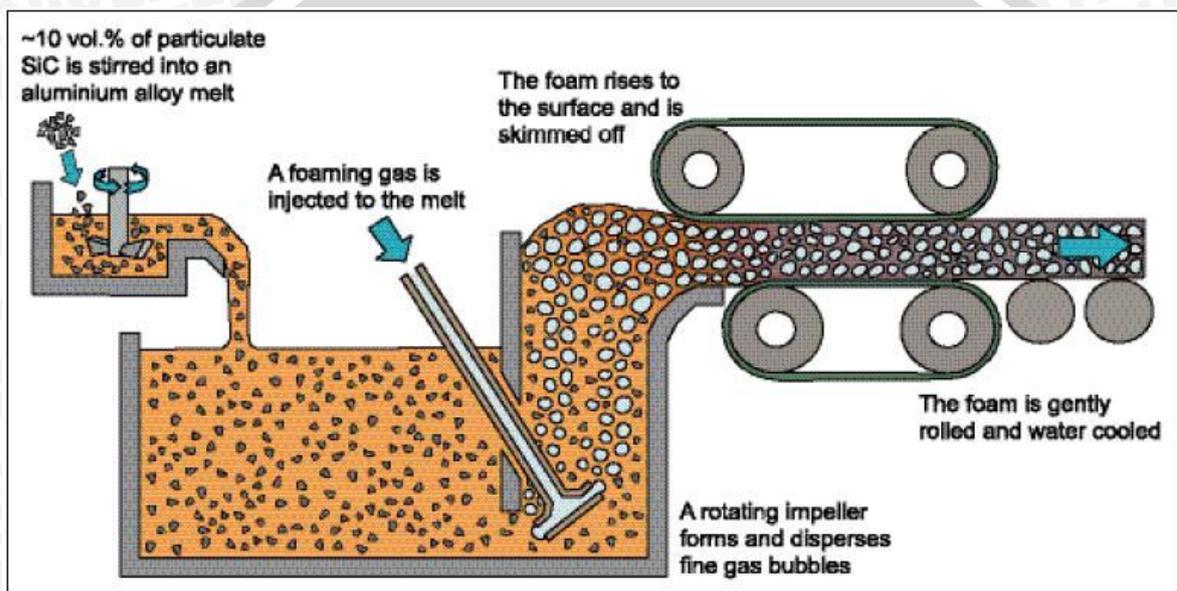
2.2.3.1 Pembuatan *Metal Foam* melalui Kondisi Cair (*Melt Process*)

Inti dari metode *melt proces* adalah meleburkan material logam hingga mencair secara sempurna dan kemudian pemberian gas ke dalam logam cair tersebut. Kemudian gas yang

terperangkap menciptakan gelembung gas dalam logam cair yang kemudian mengalami solidifikasi dan membentuk pori-pori. Terdapat beberapa cara yang biasa digunakan untuk membuat *metal foam* dengan *melt process*, yaitu:

A. Pembuatan *Aluminium Foam* dengan Injeksi Gas

Pembuatan *aluminium foam* ini yaitu dengan cara menyuntukkan atau menginjeksi gas tertentu kedalam logam yang telah dicairkan. Berikut skema pembuatan *aluminium foam* dengan metode injeksi.



Gambar 2.6 Skema pembuatan *aluminium foam* dengan metode injeksi gas

Sumber : Helmi, 2003

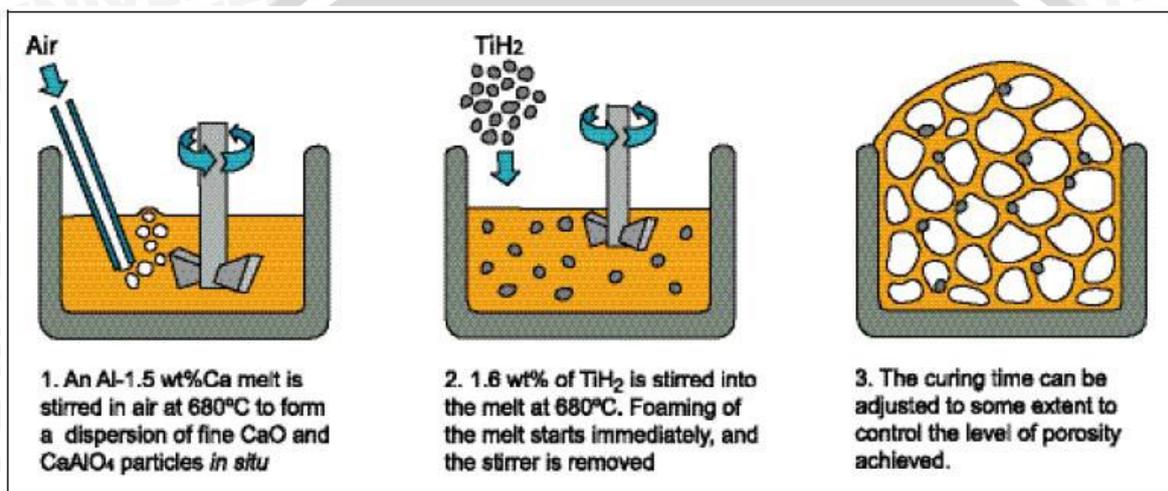
Tahap pertama pada metode ini dengan meleburkan (*melting*) logam dan paduannya, setelah melebur secara sempurna kemudian ditambahkan partikel penguat seperti *silicon-carbide*(SiC), *aluminium-oxide*(Al₂O₃) atau *magnesium-oxide*(Mg₂O₃) yang tujuannya untuk menaikkan viskositas dan menstabilkan gelembung gas sehingga gelembung gas tidak naik ke permukaan. Kemudian diaduk secara merata.

Kemudian untuk tahap kedua yaitu dengan menginjeksi atau menyuntikkan gas (nitrogen, argon atau oksigen) ke dalam logam cair dengan menggunakan *rotating impeller* atau *vibrating nozzle*, tujuannya untuk menciptakan gelembung gas yang baik dan mendistribusikannya secara merata. Kemudian logam cair yang telah diinjeksi tersebut akan mengembang naik keatas dan mengalami pembekuan. Busa cair yang naik keatas

permukaan ini, kemudian dapat ditarik keluar dan dibiarkan mengalami solidifikasi dan mengeras.

B. Metode Penambahan *Blowing Agent*

Metode pembuatan *metal foam* ini yaitu menambahkan serbuk *blowing agent* kedalam logam cair. Panas dari logam cair mengakibatkan serbuk *blowing agent* terdekomposisi dan menghasilkan gas yang mengakibatkan terjadinya proses *foaming*. Berikut skema dari metode penambahan *blowing agent*.



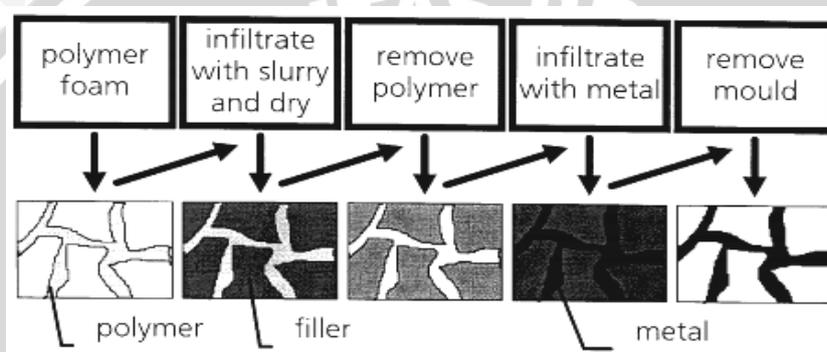
Gambar 2.7 Skema proses pembuatan *aluminiumfoam* dengan metode *blowing agent* (Alporas™).

Sumber : Helmi, 2003

Tahap pertama yang dilakukan yaitu meleburkan logam pada suhu 680°C-700°C. Kemudian menambahkan serbuk kalsium (Ca) sebesar 1,5%-3%. Logam cair ini diaduk selama 8-12 menit. Viskositas logam cair akan bertambah secara bertahap, karena dibantu oleh terbentuknya *calcium-oxide* (CaO), *calcium-aluminium-oxide* (CaAl₂O₄) atau pun Al₄Ca. Setelah proses ini, ditambahkan serbuk *titanium hidrida* (TiH₂) sekitar 1,6% kedalam aluminium cair. Fungsi dari serbuk *titanium hidrida* yaitu sebagai *blowing agent* untuk melepas gas hidrogen dalam logam cair dan secara perlahan-lahan mulai mengembang. Setelah mengalami pendinginan, busa cair akan berubah menjadi *solid*, dan kemudian dikeluarkan dari cetakan untuk proses selanjutnya. Rata-rata pori yang dihasilkan yaitu 2-10 mm dan densitas yang dihasilkan berkisar diantara 0,18-0,24g/cm³.

C. Investment Casting

Salah satu metode pembuatan *metal foam* dengan menggunakan busa polymer sebagai pola untuk memproduksi *metal foam*. Busa polymer tersebut kemudian diisi dengan material tahan panas, seperti halnya campuran dari resin dan kalsium karbonat. Kemudian busa polimer dikeluarkan dengan pemanasan dan logam cair dituangkan ke dalam cetakan. Setelah proses solidifikasi, cetakan (material tahan panas) dikeluarkan, sehingga terbentuklah *metal foam*. Di pasaran metode *investment casting* ini disebut Duocel™ dan mempunyai nilai porositas sebesar 80%-97%. Aplikasi penggunaannya antara lain sebagai *heat exchanger*, elektrode berpori, dan filter kimia.



Gambar 2.8 Skema proses *investment casting* dengan penggunaan pola *polymer*.

Sumber : Banhart,2001:581

2.3 Aluminium Foam

Aluminium merupakan salah satu jenis logam yang ringan yang mana hanya 1/3 dari berat baja, kuningan dan tembaga. Aluminium memiliki kekuatan yang baik, bahkan beberapa aluminium paduan kekuatannya melebihi baja. Aluminium termasuk dalam kategori logam *non ferrous* dan banyak dijadikan untuk bahan dasar dan matriks dalam membuat material *metal foam*. Aluminium mempunyai sifat mekanis yang baik dan suhu leburnya lebih rendah dari logam yang lainnya sehingga dapat menekan biaya produksi. *Aluminium foam* memiliki struktur berpori karena proses pembuatannya melalui proses pembusaan (*foaming*) dan memiliki nilai porositas yang tinggi, umumnya mulai dari 70%-95%. (Babsan,2003:12).

Aluminium foam memiliki sifat khas dari material selular karena strukturnya yang berpori tanpa menghilangkan sifat asli dari logam aluminium itu sendiri. *Aluminium foam* sangat berpotensi untuk diaplikasikan pada berbagai bidang industry khususnya otomotif dan manufaktur, sehingga. Karakteristik utama yang dimiliki *aluminium foam* yaitu:

1. Massa jenis (densitas) rendah,
2. Kekakuan tinggi terhadap massa jenis dan kekuatan spesifik yang tinggi,
3. Penyerapan energi impact dan tumbukan yang baik,
4. Penghalang panas dan peredam suara.

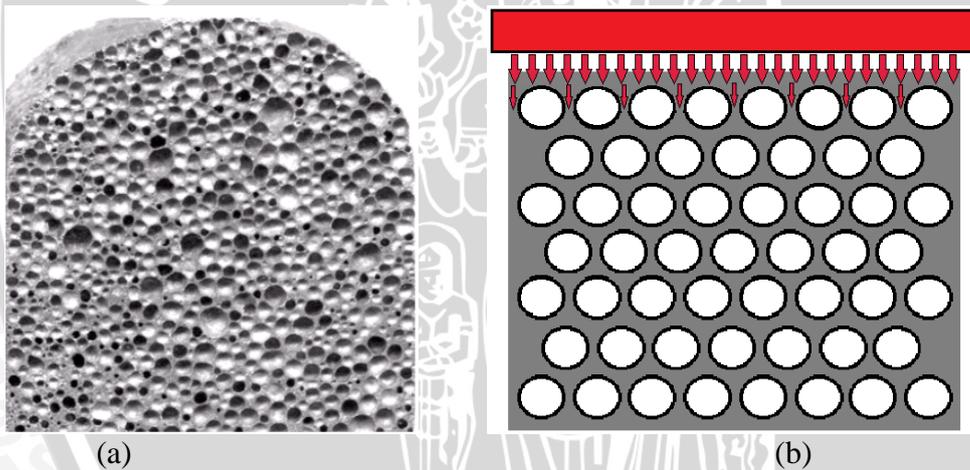
Berikut keunggulan dan fungsi utama dari *aluminium foam* (Banhart,2007:282):

1. Material ringan

Dikatakan ringan karena strukturnya yang berpori, memiliki kekakuan spesifik yang lebih baik dan nilai densitas (massa jenis) yang lebih rendah dibandingkan aluminium biasa. *Aluminium foam* dapat digunakan untuk mengoptimalkan antara kekakuan terhadap berat (kekakuan spesifik).

2. Penyerapan energi

Aluminium foam dapat menyerap energi mekanik dengan kuantitas yang tinggi. Hal ini dikarenakan *aluminium foam* memiliki porositas yang tinggi. Material ini, juga dapat berperan sebagai penyerap energi impact, tergantung pada percepatan saat tabrakan.



Gambar 2.9 (a) tampak samping *aluminium foam*, (b) struktur *foam* saat dikenai suatu energi .

Sumber : V. Gergely, *Adv. Eng. Mater.*, 2 (2000), hal. 175

Aluminium foam memiliki nilai porositas yang tinggi, umumnya mulai dari 70%-95% dan terlihat pada gambar diatas struktur dari *aluminium foam*. Ketika dikenai suatu energi, *aluminium foam* dapat meredam energi yang diterimanya, hal ini dikarenakan adanya media udara (pori-pori) pada *aluminium foam* yang mengurangi beban energi yang diterimanya. Pada lapisan pertama *aluminium foam* menerima sejumlah energi, namun hanya sebagian energi yang disalurkan karena sedikitnya media solid (dinding sel) dan

sebagian energi hilang (terserap) oleh pori-pori. Kemudian energi disalurkan ke struktur foam dibelakangnya dan energi yang tersalurkan semakin sedikit akibat banyaknya pori-pori pada *aluminium foam* sehingga energi dapat diredam.

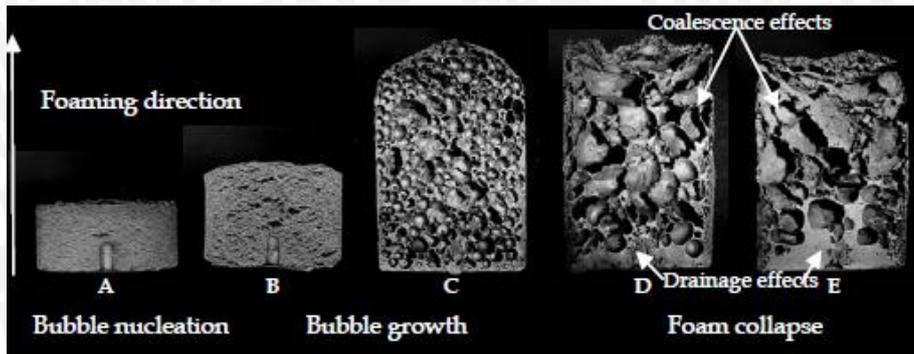
3. Pengontrol panas dan peredam suara

Aluminium foam dapat meredam getaran dan menyerap suara dalam kondisi tertentu. Selain itu, kelebihan dari *aluminium foam* adalah konduktivitas termal rendah dan dapat menahan suhu yang tinggi.

2.3.1 Mekanisme Pembentukan Struktur Foam

Proses pembentukan struktur busa / *foam* dibagi dalam tiga tahapan yaitu nukleasi (pembentukan inti) gelembung, pertumbuhan gelembung ,dan pengempisan atau *collapses*. Nukleasi gelembung terjadi dalam fase padat, tekanan dalam gas yang berlebih dapat merusak bentuk dari matriks logam, pertumbuhan gelembung dipengaruhi oleh dekomposisi termal serbuk *blowing agent* dan dari proses peleburan logam. Gelembung gas memiliki bentuk yang sangat beragam saat proses *foaming*. Pertumbuhan gelembung gas tergantung pada karakteristik dari bahan atau material yang digunakan. Proses perubahan morfologi *foam* dapat diklasifikasikan menjadi 4 macam, yaitu:

1. Aliran adalah pergerakan gelembung gas terhadap satu sama yang lainnya disebabkan oleh kekuatan eksternal atau perubahan tekanan gas internal misalnya selama proses pembusaan.
2. *Drainase* adalah logam cair akan mengalir melewati perbatasan *Plateau* - perpotongan tiga film (lapisan) busa sampai keadaan kesetimbangan tercapai, hal ini disebabkan oleh gaya kapiler dan gravitasi.
3. Pecah (atau pergabungan) adalah ketidakstabilan yang terjadi secara tiba-tiba dalam sebuah film yang mengarah pada hilangnya gelembung gas. Jika dinding sel terlalu kurus dan lemah, hal itu akan pecah. Akhirnya busa akan runtuh dan lenyap.
4. Pengasaran (atau *Ostwald ripening*) adalah difusi gas yang terjadi secara lambat dari gelembung kecil menjadi gelembung yang lebih besar disebabkan oleh perbedaan tekanan gas internal.



Gambar 2.10 Tahapan pembentukan pori pada *aluminium foam*

Sumber : Duarte dan Oliveira,2012:61

Gelembung gas yang terjadi pada logam cair dikatakan stabil jika tidak mengalami suatu perubahan yang signifikan dalam jangka waktu antara proses pembusaan (*foaming*) dan proses solidifikasi atau pemadatan. Faktor yang mempengaruhi stabilitas struktur foam antara lain:

- Difusi gas yang terjadi dalam logam cair
- Dekomposisi dari *blowing agent*
- Viskositas
- Tegangan permukaan
- Oksidasi pada aluminium

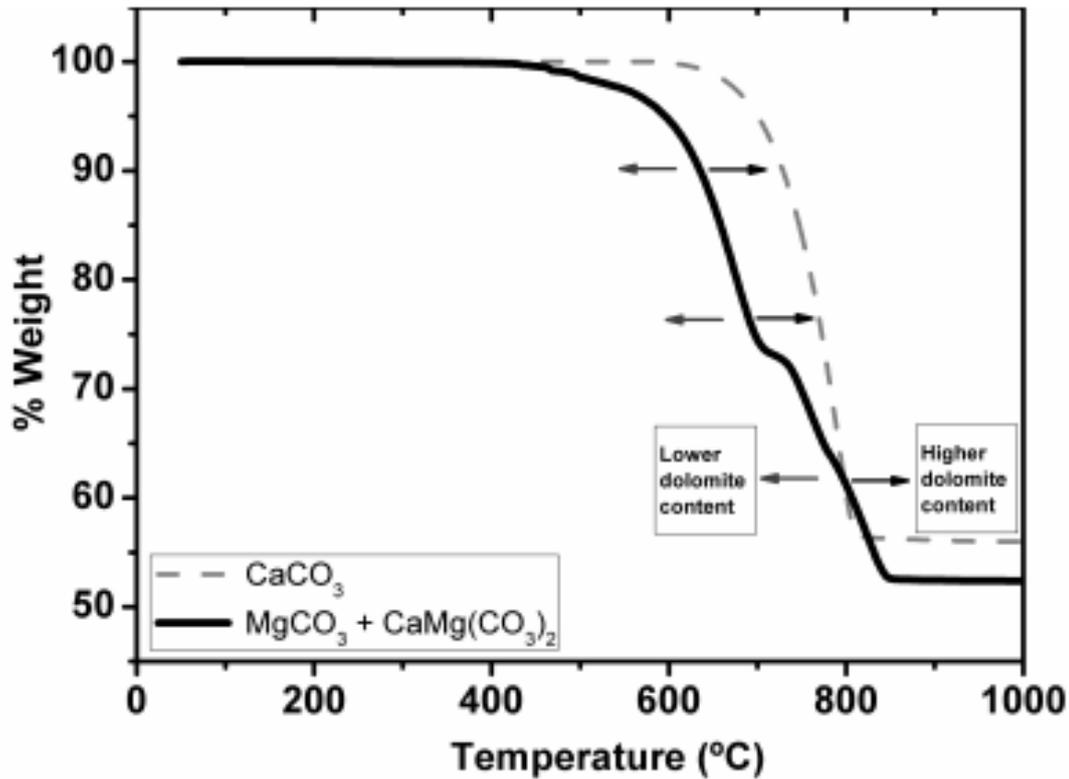
2.4 *Blowing Agent*

Blowing agent atau sering disebut *foaming agent* merupakan senyawa kimia yang dicampurkan kedalam material dasar yang berkondisi cair atau lebur. Akibat panas ini *blowing agent* terdekomposisi dan menghasilkan gelembung gas dan membentuk struktur berpori. Untuk memperoleh *foam* berkualitas tinggi yang harus diperhatikan adalah distribusi dari serbuk *blowing agent* ke dalam matriks logam harus seragam dan karakteristik dekomposisi termal dari serbuk *blowing agent*. Hal ini untuk menghindari perbedaan perilaku antara logam cair dan serbuk *blowing agent* untuk mencegah terbentuknya retakan (cacat). Senyawa penghasil gas harus memiliki densitas yang relatif sama dengan lelehan agar dapat terdispersi secara merata.

Blowing agent yang sering digunakan untuk proses pembuatan *aluminium foam* atau adalah senyawa hidrida logam, seperti titanium hidrida (TiH_2), zirkonium hidrida (ZrH_2) dan magnesium hidrida (MgH_2) (Duarte dan Banhart,2000). Senyawa logam termasuk oksida, nitride, sulfide dan karbonat juga cocok digunakan sebagai *blowing agent*.

2.4.1 Kalsium Karbonat (CaCO₃)

Kalsium karbonat (CaCO₃) mempunyai kriteria yang cocok untuk dijadikan *blowing agent* karena mempunyai densitas yang mirip dengan aluminium (2710 kg/m³) dan proses dekomposisi serbuk CaCO₃ dimulai pada temperatur 650°C sampai 800°C. sehingga kalsium karbonat dapat terdispersi dengan baik terhadap aluminium cair.



Gambar 2.11 Analisis termal dari kalsium karbonat

Sumber : Lazaro, 2014:276

Reaksi kimia yang terjadi:



Dilihat pada reaksi diatas bahwa serbuk kalsium karbonat yang terkena panas pecah dan kalsium karbonat berubah menjadi kalsium oksida (CaO). Hal ini dikarenakan pada reaksi tersebut tiap molekul dari kalsium berikatan dengan 1 atom oksigen sedangkan molekul yang lainnya berikatan dengan oksigen dan menghasilkan gas karbon dioksida (CO₂). Gas karbon dioksida ini yang nantinya dimanfaatkan untuk proses pembusaan (*foaming*) dan menyebabkan terbentuknya pori-pori pada *aluminium foam*..

2.4.2 Aluminium Oksida(Al_2O_3)

Alumina (Al_2O_3) diperoleh dari pengolahan biji bauksit yang mengandung 50-60% Al_2O_3 ; 1-20% Fe_2O_3 ; 1-10% silika; sedikit sekali titanium, zirkonium dan oksida logam transisi lain; dan sisanya (20- 30%) adalah air. Aluminium oksida (Al_2O_3) atau yang lebih dikenal dengan alumina adalah insulator (penghambat) panas dan listrik yang baik. Penggunaan alumina pada penelitian kali ini yaitu untuk memperbaiki sifat mampu basah (*wettability*) pada serbuk CaCO_3 sebagai *blowing agent* yang tujuannya agar serbuk kalsium karbonat (CaCO_3) dicampur ke dalam aluminium cair dapat terdispersi secara merata dan mampu terdekomposisi secara sempurna. Serbuk alumina juga berfungsi untuk partikel penstabil gelembung gas setelah terjadinya dekomposisi serbuk CaCO_3 .

2.5 Aluminium

Aluminium memiliki kekuatan yang baik, beberapa aluminium paduan memiliki kekuatan yang melebihi baja. Aluminium itu sendiri berasal dari biji aluminium (bauksit). Pemurnian pada bauksit menghasilkan oksida aluminium atau sering disebut alumina yang kemudian dielektrosa menjadi oksigen dan aluminium murni. Aluminium merupakan salah logam terpenting dari logam nonferro dimana penggunaannya setelah besi dan baja (Surdia dan Saito 1999 : 129).

Aluminium mempunyai beberapa sifat-sifat fisik yang ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut :

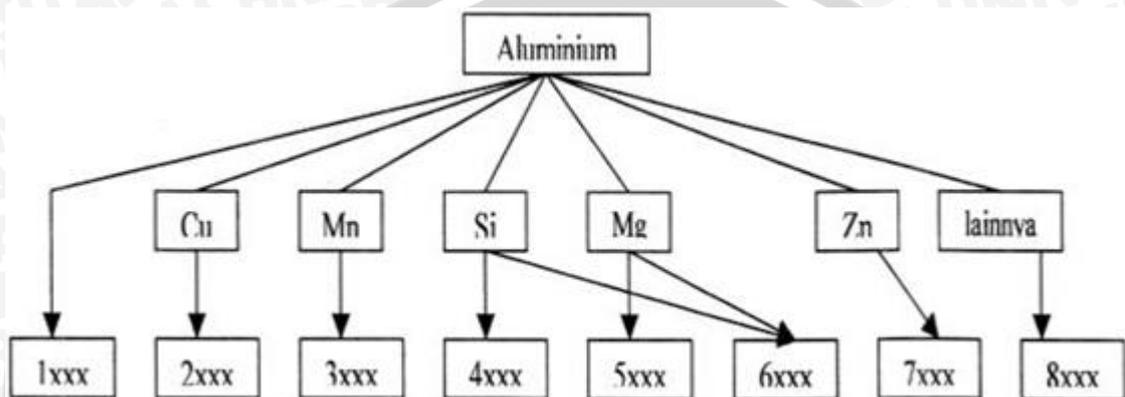
Tabel 2.1 Sifat-Sifat Fisik Aluminium

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	>99,0
Masa jenis (20°C)	2,6989	2,71
Titik cair	660,2	653-657
Panas jenis ($\text{cal/g.}^\circ\text{C}$)(100°C)	0,2226	0,2297
Hantaran listrik (%)	64,94	59(dianil)
Tahanan listrik koefisien temperature ($^\circ\text{C}$)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuaian (20 - 100°C)	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$
Jenis kristal, konstanta kisi	$\text{fcc}, a = 4,013 \text{ kX}$	$\text{fcc}, a = 4,04 \text{ kX}$

Sumber : Surdia dan Saito, 1999 : 13

2.5.1 Klasifikasi Aluminium Paduan

Aluminium murni relatif lunak dan penambahan unsur paduan dapat meningkatkan sifat mekanisnya. Pengelompokan paduan Al didasarkan pada jenis unsur paduan dengan menggunakan sistem 4 digit dimana digit pertama menunjukkan kelompok aluminium, digit kedua menunjukkan modifikasi dari paduan aslinya atau Batas unsur pengotor dan 2 digit terakhir menunjukkan kemurnian aluminium.



Gambar 2.12 Klasifikasi aluminium dan paduannya

Sumber : Surdia dan Saito, 1999 : 34

Paduan aluminium secara umum diklasifikasikan berdasarkan cara pengolahan produk yang dihasilkan dikategorikan menjadi dua kategori yaitu:

1. Yang Dapat Dibentuk/Ditempa/Diramas (*Wrought Alloys*)

Wrought Alloys ini dihasilkan dengan proses *forming* untuk meningkatkan kekuatannya. Prosesnya dibedakan menjadi 2 yaitu:

- a. Paduan yang dapat diperlaku – panaskan (*Heat Treatable Alloys*) artinya paduan jenis ini merupakan paduan yang kekuatannya dapat ditingkatkan dengan cara perlakuan panas.
- b. Paduan yang tidak dapat diperlaku – panaskan (*Non-heat Treatable Alloys*) artinya paduan jenis ini merupakan paduan yang kekuatannya dapat ditingkatkan dengan pengerjaan dingin.

2. Yang Dapat Dituang (*Cast Alloys*)

Cast Alloys merupakan paduan aluminium yang pengerjaannya dengan cara pengecoran yang dituang pada cetakan dengan *finishing* sebagai pengerjaan akhir agar sesuai dengan desain yang direncanakan.

2.5.2 Pengaruh Unsur-Unsur Paduan

Unsur-unsur pemadu aluminium antara lain :

a. Silikon (Si)

Pengaruh dari penambahan silikon yaitu memiliki sifat mampu cor, mengurangi penyusutan coran sampai satu setengah dari penyusutan aluminium murni, meningkatkan daya alirnya. Selain itu, paduan silikon akan meningkatkan ketahanan korosinya, baik ditambah unsur lain ataupun tidak.

b. Besi (Fe)

Penambahan besi memiliki fungsi yaitu mengurangi penyusutan. Namun kandungan besi yang besar juga akan menyebabkan struktur butir yang kasar dan dalam hal ini dapat diperbaiki dengan menambah sejumlah kecil Mn dan Cr.

c. Magnesium (Mg)

Penambahan unsur magnesium digunakan untuk meningkatkan daya tahan aluminium dan meningkatkan sifat mampu bentuk serta mampu mesin aluminium tanpa menurunkan keuletannya.

d. Mangan (Mn)

Penambahan mangan akan meningkatkan daya tahan karat aluminium dan bila dipadukan dengan Mg akan memperbaiki kekuatan aluminium.

e. Zinc (Zn)

Penambahan seng akan meningkatkan sifat-sifat mekanis tanpa perlakuan panas serta memperbaiki sifat mampu mesin.

f. Tembaga (Cu)

Tembaga merupakan konduktor panas dan listrik yang baik serta tahan terhadap korosi. Tembaga juga bersifat *paramagnetic*. Penambahan tembaga akan memperbaiki sifat mampu aluminium paduan. Selain itu dengan atau tanpa paduan lainnya akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan.

2.5.3 Aluminium Paduan

Logam aluminium dapat dengan mudah dipadukan dengan logam lain. Paduan aluminium yang penting antara lain :

a. Paduan Al-Si

Keunggulan paduan Al-Si mempunyai sifat mampu cor dan ketahanan korosi yang baik, ringan, dan sebagai penghantar listrik dan panas yang baik. Paduan Al-Si banyak dipakai sebagai bahan untuk logam las, baik pada paduan cor maupun paduan tempa.

b. Paduan Al-Mg

Paduan Al-Mg memiliki ketahanan korosi yang baik. Paduan Al-Mg sekitar 4% atau 10% memiliki ketahanan korosi dan sifat mekanis yang baik. Paduan ini biasa dipakai untuk bagian dari alat-alat industri kimia, kapal laut, kapal terbang dan sebagainya.

c. Paduan Al-Mg-Si

Paduan Aluminium-Magnesium-Silikon termasuk dalam jenis yang dapat diberi perlakuan panas dan mempunyai sifat mampu potong, mampu las dan tahan korosi yang cukup. Penambahan Magnesium diperlukan untuk memperoleh efek pengerasan dari Mg_2Si . Tetapi sifat paduan ini akan menjadi getas jika terlalu banyak kandungan magnesium, sehingga untuk mengurangi hal tersebut penambahan dibatasi seperti tabel dibawah: (Hiene, 1995 : 320).

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Al-Mg-Si

Paduan	Al (%)	Mg (%)	Si (%)	Fe (%)	Mn (%)	Zn (%)	Cu (%)	Cr (%)	Ti (%)	Kandungan lainnya (%)
6061	95,8-98,6	0,80-1,2	0,40-0,80	Max 0,70	Max 0,15	Max 0,25	0,15-0,40	0,040-0,35	Max 0,15	Max 0,15

Sumber : ASM Aero Space Metal Inc.

Tabel 2.3 Sifat Aluminium Paduan Al-Mg-Si

Sifat	Nilai
<i>Density</i>	2,70 g/cm ³
<i>Melting Point</i>	650 °C
<i>Thermal Expansion</i>	23,4 x 10 ⁻⁶ /K
<i>Modulus of Elasticity</i>	70 Gpa
<i>Thermal Conductivity</i>	166 W/m.K
<i>Electrical Resistivity</i>	0,040 x 10 ⁶ Ω.m
<i>Tensile Strength</i>	310 MPa

Sumber : Aalco, 2013

d. Paduan Al-Cu

Jenis paduan Al-Cu adalah jenis yang dapat diperlakukan panas. Dengan melalui pengerasan endapan/penyepuhan sifat mekanis paduan ini dapat menyamai sifat dari baja lunak tetapi daya tahan korosinya lebih bila dibandingkan jenis paduan lainnya (Heine, 1976 : 294). *Copper* adalah salah satu unsur paduan penting yang digunakan pada Al karena dengan paduan ini akan membentuk *solid-solution strengthening* dan dengan *heat treatment* yang sesuai dapat meningkatkan kekuatannya dengan membentuk *precipitate*.

e. Paduan Al-Cu-Mg

Paduan ini mengandung 4% Cu dan 0,5% Mg dan merupakan paduan yang memiliki kekuatan yang tinggi. Biasanya disebut dengan *duralumin*. Dalam penggunaannya biasa dipakai konstruksi pesawat terbang dan konstruksi lainnya yang membutuhkan perbandingan antara kekuatan dan berat yang cukup besar.

f. Paduan Al-Zn

Paduan ini lebih banyak mengandung aluminium dan merupakan paduan yang memiliki ketahanan korosi yang baik. Dalam penggunaan biasa diaplikasikan untuk konstruksi tempat duduk pesawat terbang, perkantoran dan konstruksi lainnya yang membutuhkan perbandingan antara ketahanan korosi dan berat yang tidak terlalu besar. Titik lebur dari aluminium paduan Al-Zn 476°C - 657°C.

g. Paduan Al-Mn

Al-Mn merupakan unsur yang memperkuat aluminium tanpa mengurangi ketahanan korosinya dan dipakai untuk membuat paduan yang tahan korosi. Jumlah paduan yang terkandung dalam paduan ini adalah 25,3%.

2.6 Densitas

Densitas (massa jenis) merupakan sebuah perbandingan massa per volume. Rata-rata kepadatan dari suatu obyek yang sama massa totalnya dibagi oleh volume totalnya.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2-1)$$

dengan:

ρ = densitas (gr/cm³).

m = massa total benda (gr).

v = volume benda (cm³).

- *Apparent density*

Adalah berat setiap unit volume material termasuk cacat yang terdapat pada material yang akan diuji (gr/cm^3). Menurut ASTM B311-93 rumus dari *Apparent density* adalah:

$$\rho_s = \rho_w \frac{W_s}{W_s - (W_{sb} - W_b)} \quad (2-2)$$

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).

- *True density*

True density atau densitas teoritis merupakan kepadatan dari sebuah benda tanpa adanya porositas yang terdapat di dalamnya. Dapat didefinisikan sebagai perbandingan massa terhadap volume sebenarnya (gr/cm^3). Persamaan dari *True density* ada pada standar ASTM E252-84 sebagai berikut:

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

dengan:

ρ_{th} = *True Density* (gr/cm^3).

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

$\%Al, \%Cu, \text{etc}$ = Prosentase berat unsur (%).

2.7 Pengujian Tekan (*Compression Test*)

2.7.1 Definisi Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan (*Compressive Strength*) adalah kapasitas dari suatu bahan atau struktur dalam menahan beban yang akan mengurangi ukurannya. Kekuatan tekan dapat diukur dengan memasukkannya ke dalam kurva tegangan-regangan dari data yang didapatkan dari mesin uji. Beberapa bahan akan patah pada batas tekan, beberapa mengalami deformasi yang tidak dapat dikembalikan. Deformasi tertentu dapat dianggap sebagai batas kekuatan

tekan, meski belum patah, terutama pada bahan yang tidak dapat kembali ke kondisi semula (irreversible).

- Tegangan (*stress*).

Tegangan didefinisikan sebagai distribusi gaya tekan persatuan luas penampang bahan atau material, karena arah pembebanannya negatif maka hasil uji akan memberikan harga negative. tegangan (*stress*) 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).

- Regangan (*Strain*)

Regangan didapat dari perubahan panjang spesimen yang diukur dibagi dengan panjang awal specimen, karena spesimen mengalami pemampatan maka hasilnya akan bernilai negatif, rumusnya:

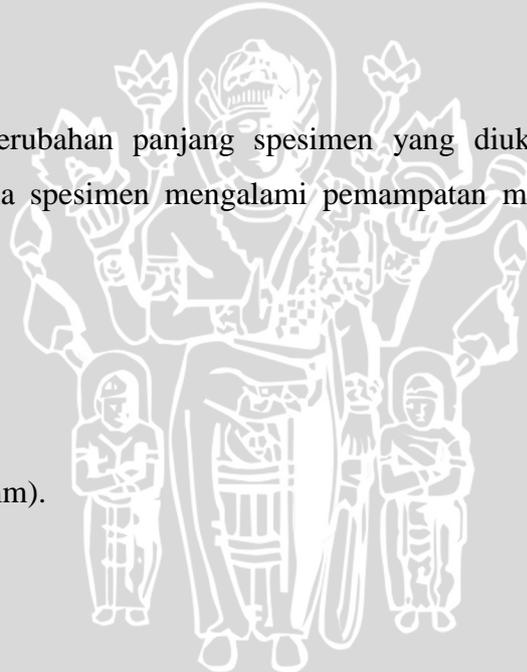
$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \quad (2-6)$$

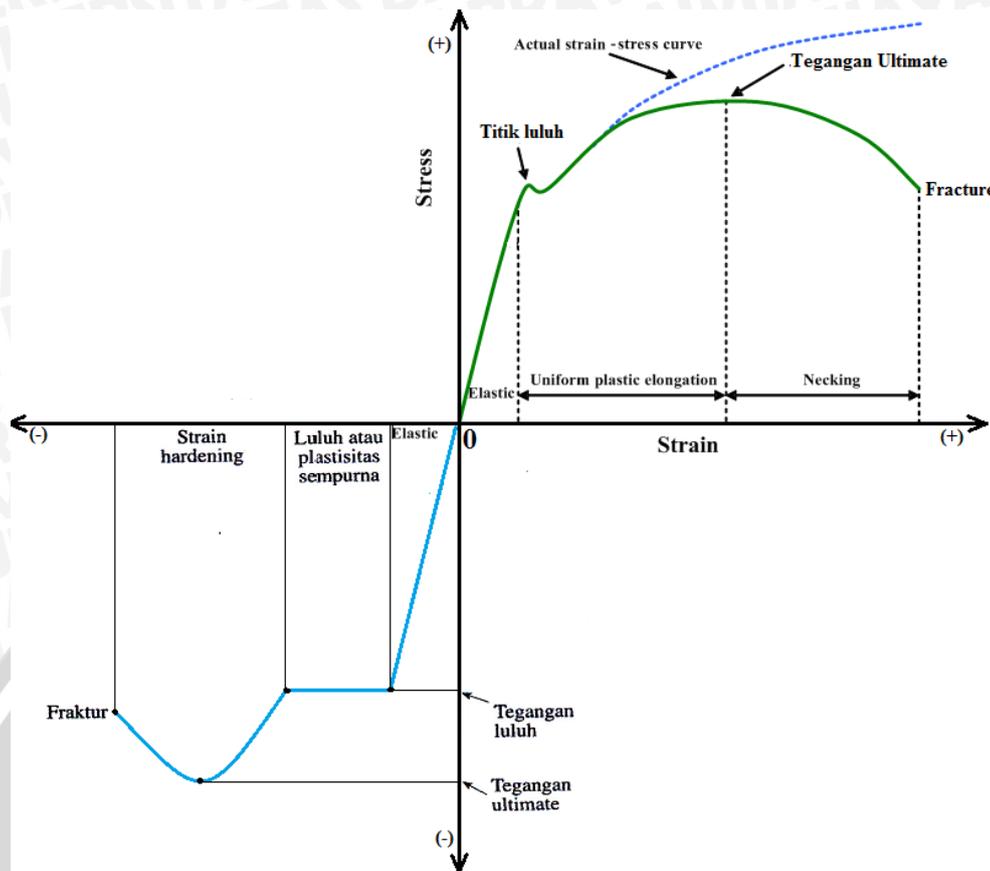
dengan:

ε = Regangan (mm/mm).

$\Delta \ell$ = Perubahan panjang (mm).

ℓ_0 = Panjang awal (mm).





Gambar 2.13 Diagram tegangan – regangan pengujian tarik (kuadran I) dan pengujian tekan (kuadran III).

Sumber :Mulyati, 2013

Pada gambar 2.13 diatas menunjukkan diagram tegangan – regangan. Jika dilihat dari arah pembebanan dan pertambahan panjang pada spesimen yang diuji dapat dilihat dimana pada pengujian tarik spesimen dikenai beban tarik sehingga arah gaya yang bekerja terhadap sumbu y (*stress*) bernilai positif dan pada pengujian tarik ini menyebabkan spesimen mengalami pertambahan panjang (meregang) terhadap sumbu x (*strain*) bernilai positif. Sebaliknya pada pengujian tekan dimana spesimen dikenai beban tekan sehingga arah gaya yang bekerja bernilai negatif dan pada pengujian tekan ini menyebabkan spesimen yang diuji termampatkan maka nilai *strain* pada sumbu x adalah negatif.

- Modulus Elastisitas

Elastisitas didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen setelah tegangan dihilangkan, sering disebut juga deformasi elastik. Modulus Elastisitas merupakan nilai yang menunjukkan sifat keelastisitasan material. Bila hanya ada deformasi elastik, maka

regangan sebanding dengan tegangan. Perbandingan antara tegangan (σ) dengan regangan elastis (ϵ) disebut modulus elastisitas (*modulus young*) yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2-7)$$

ϵ = Regangan (mm/mm).

E = Modulus elastisitas (N/mm²).

σ = Tegangan tekan (N/mm²).

Persamaan ini dikenal juga dengan Hukum Hooke. Hukum Hooke berlaku di bawah batas elastik, dimana untuk sebagian besar bahan selama beban atau tegangan tidak melampaui batas elastik, regangan akan sebanding dengan tegangan. Regangan elastik akan sebanding dengan tegangan bila pada bahan/logam hanya terjadi deformasi elastik.

- *Yield strength* atau tegangan luluh adalah tegangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan sejumlah kecil deformasi plastis yang ditetapkan. Nilai Kekuatan luluh merupakan titik awal sebuah material bahan atau logam mulai terdeformasi secara plastik. Tegangan luluh sebuah bahan dinotasikan dengan S_y dan dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$S_y = \frac{P_y}{A_0} \quad (2-7)$$

Dimana :

P_y = gaya pada titik luluh.

A_0 = luas penampang awal sampel uji

- **Deformasi Plastis**

Pada tegangan yang lebih tinggi (melewati batas elastis), terjadi pergeseran tetap atom-atom dalam suatu bahan disamping regangan elastik. Regangan tetap ini tidak mampu kembali pada keadaan semula ketika tegangan ditiadakan. Regangan ini disebut regangan plastis (*plastic strain*). Pada daerah plastis, ukuran benda tidak dapat kembali seperti semula apabila gaya telah dihilangkan.

2.7.2 Deformasi pada *Aluminium Foam*

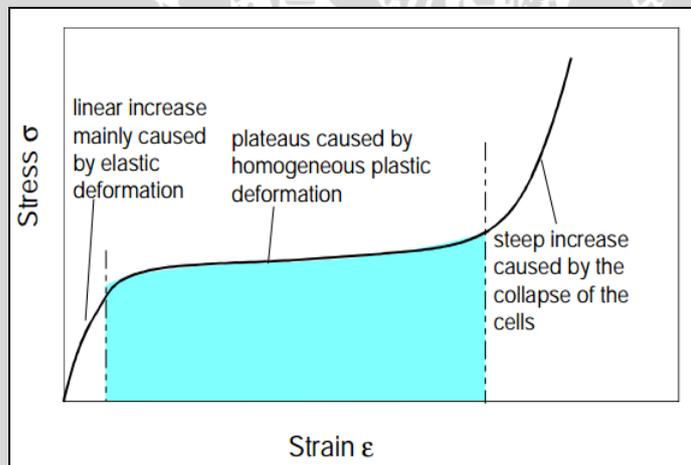
Deformasi adalah perubahan ukuran dan bentuk karena pengaruh beban yang diberikan kepadanya. Deformasi dibagi menjadi dua yaitu deformasi plastis dan deformasi elastis. Deformasi elastis yaitu perubahan bentuk yang terjadi setelah diberi beban tetapi

akan kembali seperti bentuk semula apabila beban dihilangkan. Sedangkan deformasi plastis yaitu suatu perubahan bentuk yang terjadi setelah diberi beban dan tidak kembali ke bentuk semula meskipun beban yang diberikan telah dihilangkan.

Keunggulan dari *aluminium foam* atau *metal foam* yaitu memiliki kapasitas penyerapan energi tekan plastis dengan jumlah yang besar pada saat pemberian tegangan yang kecil dan kemudian diserap dan disalurkan secara konstan. Saat ditekan *aluminium foam* atau *metal foam* mengalami deformasi elastis yang sangat sedikit sebelum akhirnya runtuh. Runtuhnya *aluminium foam* menandakan deformasi plastis yang besar terjadi pada dinding pori-pori dan merambat pada pori-pori yang lain akibat pemberian tegangan yang kecil dan hampir konstan.

2.7.4 Hubungan Tegangan-Regangan pada Aluminium Foam

Karakteristik *aluminium foam* dipengaruhi oleh material dasar yang digunakan, bentuk dan ukuran pori-pori dan densitas dari *aluminium foam*. Pengujian tekan merupakan salah satu pengujian mekanik yang digunakan untuk mengetahui karakteristik tekan dan kemampuan menyerap energi dari *aluminium foam*.



Gambar 2.14 Skema kurva tegangan-regangan pada *aluminium foam* pada kondisi ideal.

Sumber :TALAT,1999:9

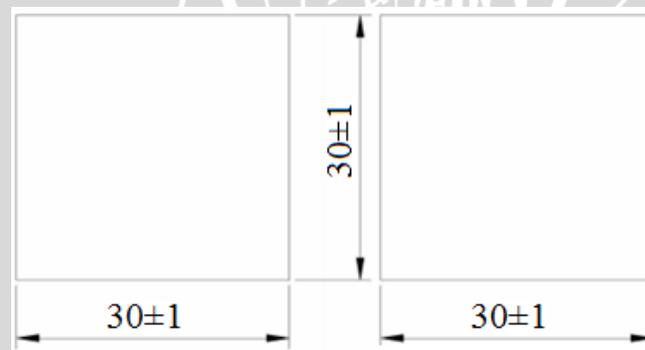
Pada gambar 2.14 menunjukkan kurva tegangan-regangan dari *aluminium foam* pada hasil pengujian pembebanan tekan. Kurva tegangan-regangan tersebut dibagi menjadi 3 daerah yang khas yaitu yang pertama menunjukkan peningkatan tegangan secara linear, kemudian daerah kedua pada awal deformasi dan tegangan *plateaus* hampir konstan di bagian tengah, dan daerah yang ketiga diikuti oleh kenaikan tegangan yang curam atau tajam pada tahap akhir. Proses dibawah menjelaskan perilaku khas dari *aluminium foam*.

1. Tahap pertama disebabkan oleh terjadinya deformasi elastis namun tidak menyeluruh, beberapa bagian mengalami deformasi plastis walaupun pada tegangan yang rendah.
2. Tahap kedua adanya daerah *plateaus* ini disebabkan karena adanya deformasi plastis yang seragam.
3. Tahap ketiga peningkatan yang tajam karena runtuhnya sel. Dinding sel yang saling berlawanan mulai menyentuh satu sama yang lain.

Karena dari kurva tegangan-regangan pengujian tekan adanya ciri khas terutama daerah *plateaus* yang panjang, oleh karenanya *aluminium foam* mampu menyerap energi dengan jumlah besar pada tegangan yang relatif rendah. Dengan meningkatnya densitas relatif, kapasitas tegangan *plateaus* dan kapasitas penyerapan energi juga akan meningkat, tetapi densifikasi regangan akan menurun.

2.7.5 Bentuk dan Dimensi Benda Uji

Bentuk dan ukuran benda uji untuk pengujian kekuatan tekan berdasarkan ISO 13314. Benda uji yang akan digunakan untuk uji tekan yaitu berbentuk kubus dengan ukuran 3cmx3cmx3cm. Uji tekan atau *Compression Test* dilakukan dengan memberikan beban tekan kepada spesimen.



Gambar 2.15 Dimensi spesimen uji tekan (mm)

2.8 Hipotesa

Dengan memvariasikan temperatur peleburan *aluminium foam* maka maka densitas akan menurun karena karbon dioksida (CO_2) yang terbentuk dari dekomposisi kalsium karbonat (CaCO_3) semakin banyak seiring dengan temperatur yang meningkat, sehingga pori-pori yang terbentuk juga semakin banyak yang seharusnya densitasnya menurun. Selain itu juga, temperatur peleburan *aluminium foam* mempengaruhi nilai kekuatan tekan dari *aluminium foam* yang dihasilkan dengan menggunakan metode *melt process*.