

**PENGARUH CASTING TEMPERATURE TERHADAP POROSITAS
DAN DAYA LISTRIK ALUMINIUM AIR-BATTERY**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



TITO AZIZ ARIFIYANTO

NIM. 105060201111025

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2015

LEMBAR PENGESAHAN
PENGARUH CASTING TEMPERATURE TERHADAP POROSITAS DAN DAYA
LISTRIK ALUMINIUM AIR-BATTERY

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



TITO AZIZ ARIFIYANTO
NIM. 105060201111025

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 19 November 2015

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng.
NIP. 19750710 199903 1 004

Dosen Pembimbing II

Ir. Tjuk Oerbandono, MSc. CSE.
NIP. 19670923 199303 1 002

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.
NIP. 19750802 199903 2 002

JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh *Casting Temperature* Terhadap Porositas dan Daya Listrik *Aluminium Air-Battery*

Nama Mahasiswa : Tito Aziz Arifiyanto

NIM : 105060201111025

Program Studi : Teknik Mesin

Minat : Teknik Material

KOMISI PEMBIMBING:

Pembimbing 1 : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.

Pembimbing 2 : Ir. Tjuk Oerbandono, MSc. CSE.

TIM DOSEN PENGUJI:

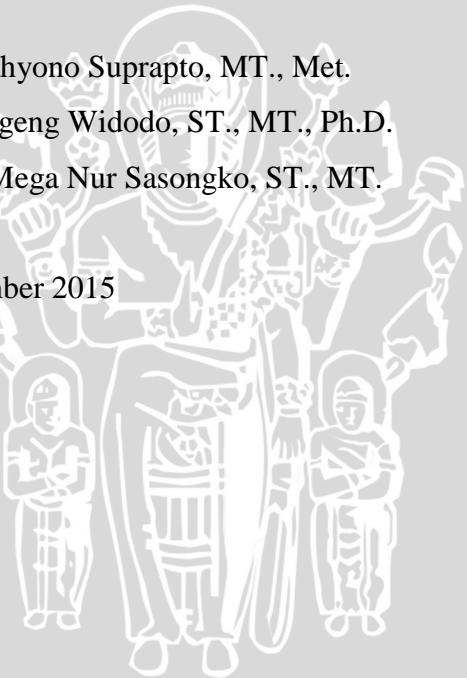
Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Wahyono Suprapto, MT., Met.

Dosen Penguji 2 : Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D.

Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.

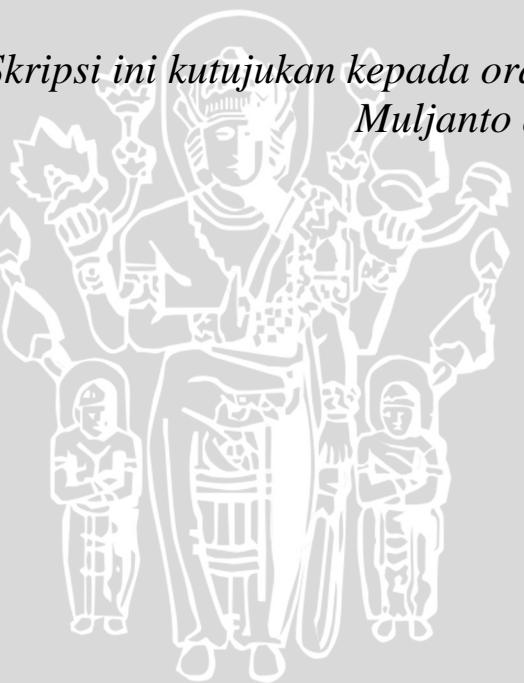
Tanggal Ujian : 19 November 2015

SK Penguji :



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

*Skripsi ini kutujukan kepada orang tua tercinta,
Muljanto dan Lilik Susiati*



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 26 November 2015

Mahasiswa,

Tito Aziz Arifyanto
NIM. 105060201111025



PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang senantiasa melimpahkan berkat dan rahmat-Nya sehingga penyusun dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini merupakan laporan akhir yang harus dipenuhi dalam mata kuliah Tugas Akhir pada Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang. Untuk memenuhi syarat tersebut maka penyusun melakukan penelitian dengan judul "**Pengaruh Variasi Casting Temperature terhadap Porositas dan Daya Listrik Aluminium Foam**".

Skripsi ini tidak dapat diselesaikan dengan baik tanpa bantuan, bimbingan, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng Nurkholis Hamidi, ST, M.Eng., selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Purnami, ST, MT., selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, S.T., M.Eng selaku dosen pembimbing 1 yang telah banyak memberikan pengarahan dan motivasi selama pelaksanaan skripsi.
5. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE selaku dosen pembimbing 2 dan pembimbing akademik yang telah banyak memberikan pengarahan dan motivasi selama pelaksanaan skripsi dan perkuliahan.
6. Bapak Gatot Siswanto, selaku Laboran Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
7. Seluruh dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
8. Faris Adhi Wicaksana selaku partner dalam penggerjaan skripsi.
9. Ibunda Lilik Susiati dan Bapak .Muljanto dan kakak Arif yang telah memberikan dukungan secara penuh dan doa yang selalu dipanjatkan kepada Allah SWT.
10. Keluarga Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (Mas Har, Habib, Doblo, Hafidz, Mas Hendra Mas Yudo, Mas Dimas, Mas Samsul, Mas Muklis, Mas Fikri, Cak To, Ibon, Septi, Rofi, Budi, Banteng, Rega dan Gede), Keluarga Besar IMMORTAL M'10, KBMM (Keluarga Besar Mahasiswa Mesin), Keluarga Kahyangan (Mamat, Drembis, Ricat dan Oye) keluarga Nirwana (Anong dan Dodit), dan keluarga Permata Jingga Palem 3 (Om Dayat, Tante Atik, Kaji, Marbot,

Cipto dan Surip) yang sudah menjadi keluarga, memberikan warna dan semangat selama menempuh studi.

11. Dan semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, yang telah banyak membantu dan memberikan arahan selama penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak lepas dari kekurangan. Oleh karena itu penulis sangat menghargai setiap saran dan masukan untuk kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan rekan-rekan yang lain.

Malang, November 2015

Penulis



DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|---------|
| PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | iii |
| DAFTAR TABEL | v |
| DAFTAR GAMBAR | vi |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3. Batasan Masalah | 3 |
| 1.4. Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5. Manfaat Penelitian | 3 |
| | |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 4 |
| 2.1 Penelitian Sebelumnya | 4 |
| 2.2 <i>Metal Foam</i> | 5 |
| 2.2.1 Definisi <i>Metal Foam</i> | 5 |
| 2.2.2 Klasifikasi <i>Metal Foam</i> | 8 |
| 2.2.3 Metode Pembuatan <i>Metal Foam</i> | 9 |
| 2.3 Baterai | 12 |
| 2.3.1 <i>Metal Air Batteries</i> | 14 |
| 2.3.2 <i>Aluminium Air Batteries</i> | 15 |
| 2.4 <i>Blowing Agent</i> | 17 |
| 2.4.1 Definisi <i>Blowing Agent</i> | 17 |
| 2.4.2 Titanium Hidrida (TiH_2) | 17 |
| 2.4.3 Aluminium Oksida (Al_2O_3) | 17 |
| 2.4.4 Kalsium Karbonat ($CaCO_3$) | 18 |
| 2.5 Aluminium | 18 |
| 2.5.1 Sifat – Sifat Aluminium | 19 |
| 2.5.2 Paduan Aluminium | 19 |
| 2.6 Pengujian Porositas | 20 |
| 2.6.1 Definisi Porositas | 20 |
| 2.6.2 Perhitungan Porositas | 21 |
| 2.7 Pengujian Daya Listrik | 22 |
| 2.8 Hipotesis | 22 |
| | |
| BAB III METODE PENELITIAN | 23 |
| 3.1 Metode Penelitian | 23 |
| 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian | 23 |
| 3.3 Variabel Penelitian | 23 |
| 3.4 Alat dan Bahan Penelitian | 24 |
| 3.4.1 Alat – Alat Penelitian | 24 |
| 3.4.2 Bahan Penelitian | 26 |
| 3.5 Prosedur Penelitian | 26 |
| 3.5.1 Prosedur Pembuatan Spesimen | 26 |

| | | |
|--|---|----|
| 3.5.2 | Prosedur Pemotongan Spesimen | 27 |
| 3.5.3 | Dimensi Spesimen..... | 28 |
| 3.5.4 | Prosedur Pengujian Porositas dan Pengambilan Data Tegangan dan Arus Listrik | 28 |
| 3.6 | Diagram Alir Penelitian | 31 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | | 32 |
| 4.1 | Pengujian Porositas | 32 |
| 4.1.1 | Data Hasil Pengujian <i>True Density</i> Spesimen <i>Aluminium Foam</i> | 32 |
| 4.1.2 | Data Hasil Pengujian <i>Apparent Density</i> Spesimen <i>Aluminium Foam</i> ... | 34 |
| 4.1.3 | Perhitungan Porositas Spesimen <i>Aluminium Foam</i> | 35 |
| 4.1.4 | Pembahasan Hasil Pengujian Porositas | 37 |
| 4.2 | Pengujian Daya Listrik | 39 |
| 4.2.1 | Data Hasil Pengujian Daya Listrik | 39 |
| 4.2.2 | Perhitungan Daya Listrik Spesimen <i>Aluminium Air-Battery</i> | 41 |
| 4.2.3 | Pembahasan Hasil Pengujian Daya Listrik | 42 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | | 44 |
| 5.1 | Kesimpulan | 44 |
| 5.2 | Saran | 44 |

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

| No. | Judul | Halaman |
|------------|--|---------|
| Tabel 2.1 | Keuntungan dan kerugian dari <i>metal air batteries</i> | 15 |
| Tabel 2.2 | Karakteristik logam sebagai <i>metal air batteries</i> | 16 |
| Tabel 4.1 | Data Hasil Komposisi EDAX Al-Foam untuk Variasi I (750 °C)..... | 32 |
| Tabel 4.2 | Data Hasil Komposisi EDAX Al-Foam untuk Variasi II (800 °C) | 32 |
| Tabel 4.3 | Data Hasil Komposisi EDAX Al-Foam untuk Variasi III (850 °C) | 33 |
| Tabel 4.4 | Data Hasil Perhitungan <i>True Density</i> | 33 |
| Tabel 4.5 | Data Hasil Perhitungan <i>Apparent Density</i> | 35 |
| Tabel 4.6 | Data Hasil Perhitungan Porositas Spesimen <i>Aluminium Foam</i> | 36 |
| Tabel 4.7 | Data perhitungan statistik hasil pengujian porositas <i>aluminium foam</i> | 36 |
| Tabel 4.8 | Data hasil pengujian voltase <i>aluminium air-battery</i> | 39 |
| Tabel 4.9 | Perhitungan statistik hasil pengujian voltase <i>aluminium air-battery</i> | 40 |
| Tabel 4.10 | Data hasil pengujian arus <i>aluminium air-battery</i> | 40 |
| Tabel 4.11 | Perhitungan statistik hasil pengujian arus <i>aluminium air-battery</i> | 41 |
| Tabel 4.12 | Data hasil perhitungan daya listrik <i>aluminium air-battery</i> | 41 |



DAFTAR GAMBAR

| No. | Judul | Halaman |
|-------------|---|---------|
| Gambar 2.1 | Dispersi dari satu fase ke fase lainnya | 5 |
| Gambar 2.2 | <i>Aluminium foam</i> | 6 |
| Gambar 2.3 | Skema densifikasi dari <i>foam</i> – regangan tergantung dari tegangan | 7 |
| Gambar 2.4 | Ilustrasi penyerapan energi mekanik pada <i>metal foam</i> | 7 |
| Gambar 2.5 | Ilustrasi penyerapan energi berupa suara pada <i>aluminium foam</i> | 8 |
| Gambar 2.6 | <i>Open cell iron foam</i> | 8 |
| Gambar 2.7 | <i>Close cell aluminium foam</i> | 9 |
| Gambar 2.8 | Klasifikasi metode pembuatan <i>aluminium foam</i> | 9 |
| Gambar 2.9 | <i>Direct foaming with gas</i> | 10 |
| Gambar 2.10 | Proses <i>direct foaming</i> menggunakan <i>blowing agent</i> | 10 |
| Gambar 2.11 | Teknik <i>Space Holder</i> | 11 |
| Gambar 2.12 | <i>Electro Disposition Technique</i> | 12 |
| Gambar 2.13 | (a) Sel kering (b) Sel basah | 13 |
| Gambar 2.14 | Klasifikasi baterai..... | 14 |
| Gambar 2.15 | Ilustrasi aluminium air batteries | 15 |
| Gambar 2.16 | Thermogravimetric (TG) dari CaCO ₃ (garis putus – putus) dan garis hitam digunakan oleh Lazaro dkk | 18 |
| Gambar 2.17 | Sistem klasifikasi aluminium paduan menggunakan kode 4 digit | 20 |
| Gambar 2.18 | Ilustrasi baterai B dalam sirkuit | 22 |
| Gambar 3.1 | Dapur listrik..... | 24 |
| Gambar 3.2 | Timbangan digital | 25 |
| Gambar 3.3 | Bagian produk coran yang diambil sebagai spesimen | 27 |
| Gambar 3.4 | Dimensi spesimen (mm)..... | 28 |
| Gambar 3.5 | Instalasi pengujian daya listrik | 29 |
| Gambar 4.1 | Alat pengujian <i>apparent density</i> dengan metode piknometri..... | 34 |
| Gambar 4.2 | Grafik pengaruh variasi <i>casting temperature</i> terhadap porositas rata- rata <i>aluminium foam</i> | 37 |
| Gambar 4.3 | Foto produk <i>aluminium foam</i> dengan variasi <i>casting temperature</i> | 37 |
| Gambar 4.4 | Foto makro spesimen <i>aluminium foam</i> dengan variasi <i>casting temperature</i> (a) 750°C (b) 800°C (c) 850°C | 38 |
| Gambar 4.5 | Hasil foto SEM spesimen <i>aluminium foam</i> dengan variasi <i>casting temperature</i> (a) 750°C (b) 800°C dan (c) 850°C | 38 |
| Gambar 4.6 | Grafik hubungan antara porositas rata – rata dengan daya listrik yang dihasilkan <i>aluminium air-battery</i> | 42 |
| Gambar 4.7 | Kandungan unsur pada elektroda <i>aluminium air-battery</i> | 43 |



RINGKASAN

Tito Aziz Arifiyanto, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, November 2015, *Pengaruh Casting Temperature Terhadap Porositas dan Daya Listrik Aluminium Air-Battery*Dosen Pembimbing: Yudy Surya Irawan dan Tjuk Oerbandono.

Krisis energi menjadi permasalahan global dikarenakan cadangan akan minyak mentah sebagai sumber energi utama semakin menipis tiap tahunnya. Sehingga diperlukan adanya pengembangan sumber energi baru. Salah satunya adalah *aluminium foam* sebagai *metal air batteries*. Studi sebelumnya mengenai *aluminium air-battery* menggunakan *aluminium foam* sebagai elektroda juga telah dilakukan. Memanfaatkan struktur berongga dari *aluminium foam* diharapkan mampu meningkatkan kemampuannya sebagai *metal air-batteries*. Dengan demikian *aluminumair-batteries* menawarkan potensi yang menarik untuk dikembangkan lebih lanjut.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi *casting temperature* terhadap porositas dan daya listrik *aluminium air-battery*. Dimana dalam sistem *aluminium air-battery* elektroda yang digunakan adalah *aluminium foam*. Jenis aluminium yang digunakan adalah aluminium paduan yaitu A6061. *Aluminium foam* dalam penelitian ini diproduksi dengan variasi *casting temperature* 750, 800, dan 850°C menggunakan CaCO₃ 3% wt sebagai *blowing agent* yang dicampur serbuk alumina (Al₂O₃) dengan rasio pencampuran 2:1. Struktur busa dibentuk melalui keadaan cair (*melt process*) menggunakan metode *direct foaming with blowing agent* dengan *stir casting* 650 rpm selama 2 menit. Data porositas diperoleh menggunakan metode piknometri dan untuk data pengujian daya berupa voltase dan arus diambil tiap 5 menit selama 1 jam.

Hasil analisis dari data yang diambil menunjukkan bahwa *casting temperature* memiliki pengaruh terhadap porositas dan daya listrik yang dihasilkan. Semakin tinggi *casting temperature* yang digunakan maka porositas dan daya listrik semakin tinggi. Porositas dan daya listrik yang dihasilkan pada variasi 750°C sebesar 55,93% dengan daya listrik sebesar 20,45 W, variasi 800°C sebesar 64,65% dengan daya listrik sebesar 32,37W dan tertinggi pada variasi 850°C sebesar 66,68% dengan daya listrik 37,61 W.

Kata kunci: *casting temperature*, *aluminium foam*,porositas, *aluminium air-battery*, daya listrik



SUMMARY

Tito Aziz Arifiyanto, Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Brawijaya University, November 2015, *Influence of Casting Temperature on Porosity and Electrical Power of Aluminium Air-Battery*. Academic Supervisor : Yudy Surya Irawan and Tjuk Oerbandono.

Energy crisis becomes global issues caused due to crude oil as the primary source are running low each year. Thereby, it be necessary to develop new energy sources. One of them is aluminium foam as metal air batteries. Previous studies on aluminium air-battery using aluminium foam as electrode have been done. Utilizing porous structure of aluminium foam, it's ability as electrode in metal air-batteries is expected to increase. Thus aluminium air-battery have an interesting offer for further development.

This research conducted to find out the effect of casting temperature on porosity and electrical power of aluminium air-battery. Wherein aluminium air battery system, aluminium foam is used as electrode. In this research, aluminium foam was produced with variations of casting temperature 750°C, 800°C and 850°C, using CaCO_3 3% wt as blowing agent mixed with Al_2O_3 with mixing ratio 2:1. Foam structure formed through liquid state (melt process) using direct foaming with blowing agent with stir casting 650 rpm for 2 minutes. Porosity data is obtained using picnometry method and for electrical power test data such as voltage and current was taken every five minute for an hour.

Analysis from data taken shows that casting temperature having influence on porosity and electrical power generated. The higher casting temperature used, porosity and electrical power are also higher. Porosity produced in each casting temperature variations 750°C, 800°C and 850°C respectively 55,93%, 64,65% and 66,68%. For electrical power generated respectively 20,45 W, 32,37 W and 37,61 W.

Keywords : casting temperature, aluminium foam, porosity, aluminium air battery, electrical power



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Semenjak penemuan *metal foam* pada abad ke 20, pengembangan *metal foam* semakin meluas. Hal ini dikarenakan *metal foam* merupakan material yang termasuk baru yang menawarkan aplikasi yang luas. *Metal foam* dapat digunakan untuk memproduksi struktur ringan, implan biomedis, penyaring, *heat exchangers*, peredam suara, alat peredam mekanik, elektroda, sensor dan substrat katalis. Konferensi internasional mengenai *porous metal* dan *metal foam* telah diselenggarakan di berbagai tempat seperti Bremen pada tahun 1999 dan 2001, tahun 2003 di Berlin Jerman, Kyoto Jepang pada tahun 2005 dan pada tahun 2007 di Montreal Kanada (Lefebvre, Banhart:2008). Pada konferensi tersebut aluminium adalah salah satu jenis logam yang banyak diteliti sebagai *porous metal* dan *metal foam*.

Krisis energi menjadi permasalahan global dikarenakan cadangan akan minyak mentah sebagai sumber energi utama semakin menipis tiap tahunnya. Sehingga diperlukan adanya pengembangan sumber energi baru. Salah satunya adalah *aluminium foam* sebagai *metal air batteries*. Energi spesifik dari aluminium menggunakan sistem garam untuk aplikasi daya yang relatif rendah seperti pelampung laut dan aplikasi baterai portabel dengan baterai kering sebesar 800 Wh/kg dan untuk sistem alkali mencapai 400 Wh/kg (Hamlen & Atwater, 2002:38-30). Memanfaatkan struktur berongga dari *aluminium foam* diharapkan mampu meningkatkan kemampuannya sebagai *metal air batteries*. Dengan demikian *aluminumair batteries* menawarkan potensi yang menarik untuk dikembangkan lebih lanjut.

Aluminium foam masih memiliki kekurangan – kekurangan yang menjadi penghambat untuk pengembangan lebih lanjut. Kekurangan tersebut antara lain dikarenakan proses pembuatannya yang menggunakan TiH_2 (*titanium hydride*) dan ZrH_2 (*zirconium hydride*) sebagai *blowing agent* termasuk material yang mahal. **Agustian (2013)** melakukan penelitian dengan menggunakan $CaCO_3$ (kalsium karbonat) sebagai *blowing agent*. Penelitian tersebut menghasilkan bahwa $CaCO_3$ dapat digunakan sebagai *blowing agent* menggantikan TiH_2 dan ZrH_2 .

Fischer (2013) melakukan penelitian tentang pengaruh temperatur pengecoran dan cetakan pada mikrostruktur dan perilaku tekan dari *open-pore aluminium foam* yang menggunakan metode *investment-cast*. Jenis aluminium yang digunakan adalah A356. Penelitian tersebut membandingkan dua *open-pore aluminium foam* 10 ppi dan 15 ppi. Temperatur yang divariasikan adalah temperatur pengecoran 740° C dengan temperatur cetakan 640° C dan variasi yang kedua temperatur pengecoran 750° C dengan temperatur cetakan 700° . Hasilnya temperatur pengecoran dan cetakan mempengaruhi *strut diameter* dan juga kekuatan tekan dari aluminium foam.

Ma dkk. (2014) meneliti performa dan korosi yang dialami dari *aluminium air battery* dengan membandingkan dua anoda yang berbeda, yaitu Al – 1 Mg – 0,1 Ga – 0,1 Sn dengan Al – 1 Mg – 1 Zn – 0,1 Ga – 0,1 Sn (wt%). Menggunakan tiga macam larutan elektrolit yaitu 2 M NaCl, 4 M NaOH dan 7 M KOH. Hasil yang didapat dari penelitian tersebut adalah anoda dengan Al – 1 Mg – 1 Zn – 0,1 Ga – 0,1 Sn mengungguli dalam hal performa dan ketahanan korosi dibandingkan dengan anoda tanpa Al – 1 Mg – 0,1 Ga – 0,1 Sn. Tegangan yang dihasilkan dari Al – 1 Mg – 1 Zn – 0,1 Ga – 0,1 Sn sebesar 1,17 V pada 2 M NaCl, 1,60 V pada 4 M NaOH dan 1,50 V pada 7 M KOH.

Irawan, Akhyari, Oerbandono (2015) melakukan penelitian mengenai pengaruh penambahan CaCO₃ sebagai *blowing agent* terhadap porositas dan kekuatan tekan pada *aluminium foam* menggunakan aluminium jenis A6061. CaCO₃ yang divariasikan antara lain 0%, 1%, 3% dan 5%. Menggunakan metode *melt process* yaitu *stir casting* dengan suhu peleburan 750°C. Menghasilkan bahwa penambahan kadar CaCO₃ menyebabkan prosentase porositas menjadi 5,69% pada kadar 0%, 64,94% pada kadar 1%, 62,61% pada kadar 3% dan 61,24% pada kadar 5%. Sedangkan untuk kekuatan tekan spesifik rata –rata semakin meningkat dimana pada kadar 0% sebesar 726,270 MPa, 150,759 MPa pada kadar 1%, 242,285 MPa pada kadar 3% dan 314,348 MPa pada 5%.

Irawan, Halim, Widodo (2015) melakukan penelitian akan pengaruh porositas elektroda terhadap tegangan listrik *aluminium air – battery*. Aluminium yang digunakan adalah A6061. Metode yang digunakan dalam pembuatan *aluminium foam* adalah *stir casting* dan menggunakan CaCO₃ sebagai blowing agent. Hasilnya tegangan tertinggi dihasilkan porositas 21,9% pada fraksi berat CaCO₃ 3% sebesar 1103 mV dan kemudian mengalami penurunan voltase pada porositas di atas 21,9% dikarenakan kandungan oksigen dalam pori di elektroda sebagai bahan reaksi elektrokimia semakin sedikit.

Menimbang akan potensi dan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, penelitian ini menggunakan serbuk CaCO₃ sebagai *blowing agent* dan serbuk alumina (Al₂O₃)

ditambahkan dengan tujuan memperbaiki sifat *wettability* yang disebabkan penambahan serbuk CaCO_3 dalam memproduksi *aluminium foam*. Berdasarkan uraian di atas akan dicari pengaruh *casting temperature* terhadap porositas dan daya listrik dari *aluminium air battery*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang diatas, rumusan masalah dalam skripsi ini adalah “Bagaimana pengaruh *casting temperatur* terhadap porositas *aluminium foam* dan daya listrik yang dihasilkan dalam *aluminium air battery*? ”

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

1. Aluminium yang digunakan adalah aluminium paduan tipe A6061.
2. Proses untuk memproduksi aluminium foam yang digunakan adalah direct foaming with blowing agent dengan stir casting.
3. *Blowing agent* yang digunakan adalah kalsium karbonat (CaCO_3) dengan jumlah 3% fraksi berat dan serbuk alumina (Al_2O_3) sebesar 1,5% ditambahkan untuk memperbaiki *wettability*.
4. Setelah proses *foaming*, dilanjutkan dengan pendinginan pada suhu ruang.

1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh pengaruh temperatur peleburan terhadap porositas dan daya listrik yang dihasilkan dari *aluminum foam* sebagai elektroda *aluminium air-battery*.

1.5. Manfaat Penelitian

Dengan luasnya pengembangan *aluminium foam*, penelitian ini diharapkan memberikan manfaat antara lain :

1. Menambahkan pengetahuan tentang pengaruh *casting temperature* terhadap sifat mekanis yaitu porositas dan daya listrik yang mampu dihasilkan dari *aluminium foam* berbasis *metal air batteries*.
2. Memberikan solusi yang tepat untuk memproduksi *aluminium foam* sebagai *metal air-batteries* sehingga mendapatkan hasil yang maksimal.
3. Digunakan sebagai referensi untuk mengembangkan *aluminium air-battery* pada penelitian selanjutnya.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Lázaro dkk. (2013) melakukan penelitian mengenai kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai alternatif pengganti titanium hidrida (TiH_2) selaku *blowing agent* pada proses pembuatan *aluminium foam* jenis AA2030. Proses yang digunakan adalah menggunakan melalui jalan cair yaitu *stir casting*. Menggunakan 3 variasi prosentase berat dari kalsium karbonat yang dicampurkan yaitu 0,5%, 1% dan 2%. Penelitian tersebut menghasilkan bahwa kalsium karbonat dapat digunakan sebagai *blowing agent*.

Egan dkk. (2013) melakukan review penelitian mengenai perkembangan elektroda dan elektrolit untuk *aluminium air batteries*. Penelitian tersebut mencakup tingkat korosi dari aluminium murni sebagai elektroda, pengaruh paduan dan elektrolit terhadap performa baterai. Salah satu hasil dari penelitian tersebut adalah paduan aluminium tertentu atau menambahkan inhibitor dalam elektrolit dapat mengurangi tingkat *self-corrosion* dan meningkatkan tingkat oksidasi. Sifat dari paduan yang dapat ditambahkan untuk meningkatkan performa dari *aluminium airbatteries* antara lain : (1) temperatur leleh yang rendah untuk membentuk *solid solution* dengan aluminium, (2) tingkat kelarutan dengan aluminium, (3) tingkat reaktifitas dalam reaksi elektrokimia yang lebih rendah dari aluminium (4) kelarutan dalam elektrolit dan (5) berpotensi menghasilkan banyak hidrogen.

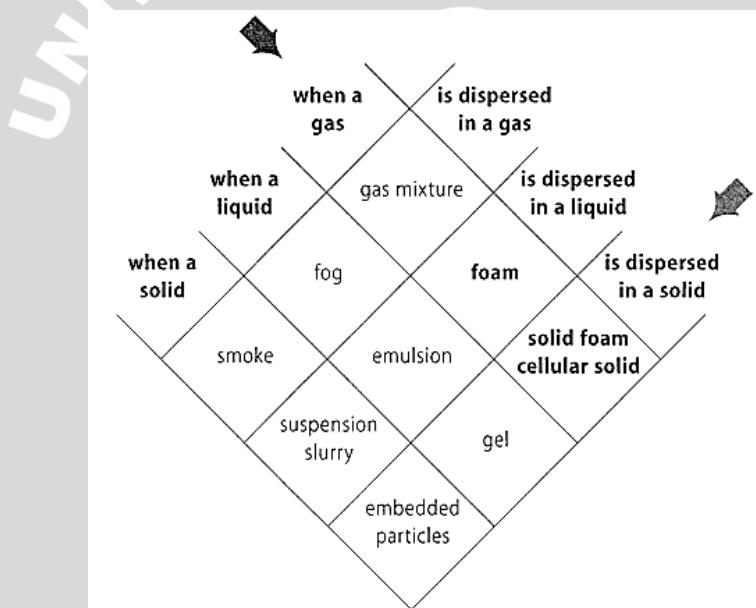
Cho dkk. (2014) meneliti pengaruh kemurnian aluminium sebagai anoda pada *aluminium air batteries*. Membandingkan dua jenis aluminium dengan tingkat kemurnian yang berbeda yaitu aluminium komersil 2N5 (99,5%) dengan aluminium murni 4N (99,99%). Menggunakan natrium hidroksida (NaOH) 4M sebagai elektrolit, menghasilkan bahwa kandungan Fe sebesar 0,03% dalam Al 2N5 menurunkan performa baterai dibandingkan dengan Al 4N. Tingkat efisiensi dari Al 2N5 mengalami penurunan dari 76% pada tegangan 0,8 volt menjadi 19% pada tegangan 1 volt. Al 4N juga mengalami penuruan efisiensi namun tidak sebesar Al 2N5, yaitu dari 71,96% pada tegangan 0,8 volt menjadi 50,93% pada tegangan 1 volt.

2.2 Metal Foam

2.2.1 Definisi Metal Foam

Semua logam dengan fase fluida (cair atau, biasanya gas) yang didistribusikan ke seluruh bagian logam tersebut dapat diklasifikasikan sebagai logam berpori (*porous metal*), meskipun dalam prakteknya studi mengenai bahan ini umumnya terbatas pada mereka yang menunjukkan tingkat porositas yang signifikan (lebih besar dari 50%) dan dimana daerah kedua fase merata di seluruh bahan (seperti dalam kasus *gips* dengan bagian pori internal yang besar) (Goodal 2013:274).

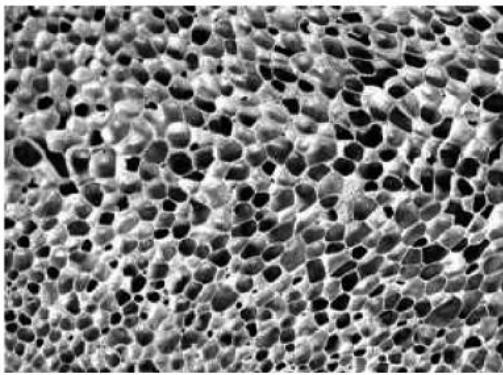
Busa dan bahan yang sangat berpori lainnya dengan struktur selular, diketahui memiliki banyak kombinasi sifat fisik dan mekanis, seperti kekakuan yang tinggi dengan berat spesifik yang sangat rendah atau permeabilitas gas yang tinggi dikombinasikan dengan konduktivitas termal yang tinggi (Banhart 2001:561).



Gambar 2.1 Dispersi dari satu fase ke fase lainnya

Sumber : Banhart (2001:562)

Kata *foam* disini terkadang menimbulkan pemahaman yang berbeda, maka dari itu perlu didefinisikan dengan jelas. Pengertian secara umum dari busa (*foam*) adalah dispersi dari gelembung gas dalam cairan. Morfologi dari busa tersebut juga dapat diartikan dengan membiarkan cairan tersebut memadat, dengan demikian dapat diperoleh busa padat (*solid foam*) (Banhart 2001:562-563). Untuk memperjelas perbedaan dari kata *foam* yang dimaksudkan disini dapat dilihat pada gambar 2.1 diatas.



Gambar 2.2 *Aluminium foam*

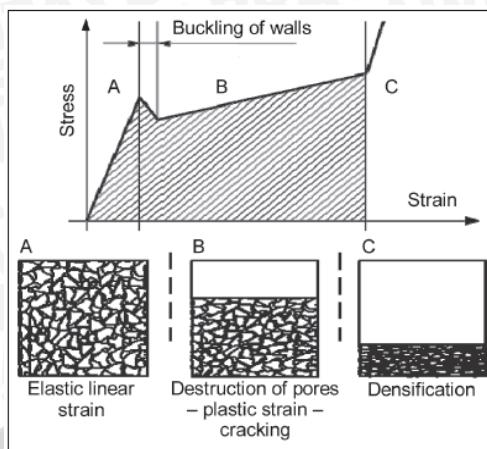
Sumber : Liu & Chen (2014:9)

Karakteristik dari *metal foam* dapat dikenali melalui logam itu dibuat dan struktur berpori yang dimiliki. Komposisi dari bagian padat dan berpori tersebut dapat dianalisa dengan mudah melalui sinar X atau mikroskop optik biasa. Berdasarkan sifat – sifat yang dimiliki, karakteristik dari *metal foam* antara lain (Gladysz, Chawla, 2015:49):

1. Densitas yang sangat rendah : densitas menurun signifikan dengan bertambahnya sel yang berisi gas
2. Kekakuan dan kekuatan tekan yang tinggi, contohnya kekakuan dan kekuatan dibagi berdasarkan densitas : ini dapat dimodifikasi lebih lanjut melalui konstruksi *sandwich* (dua permukaan padat dan satu inti busa).
3. Kemampuan untuk menyerap energi dengan baik.
4. Mampu meredam kebisingan dan getaran.

Metode, proses dan material yang digunakan dapat mempengaruhi karakteristik dari *metal foam* yang dihasilkan nantinya. Karena dengan metode, proses dan material yang digunakan dapat mempengaruhi ukuran dan distribusi pori dari *metal foam*.

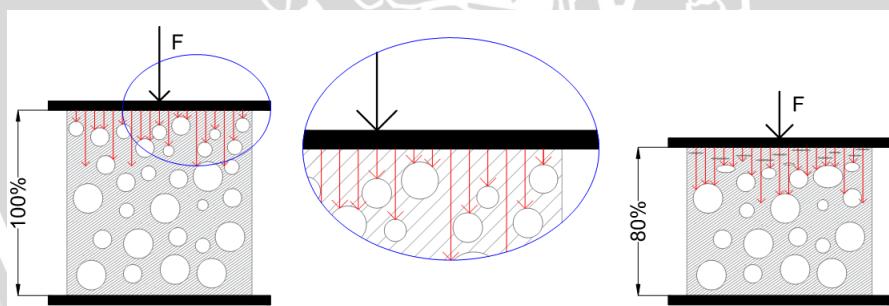
Struktur dari *metal foam* dimana terdiri dari dua jenis penyusun yaitu logam (*solid*) dan gas yang terjebak di dalamnya. Keduanya memberikan pengaruh dalam penyerapan energi. Hal ini disebabkan energi kinetik tersebut diserap oleh *foam*, kemudian diteruskan menjadi tegangan ke seluruh bagian dari struktur *foam*. Ketika struktur *foam* menerima tegangan lebih dari kekuatannya, dinding mulai terdeformasi secara plastis dengan menekuk kemudian hancur. Hancurnya dinding dari struktur berongga tersebut terjadi secara bertahap dari bagian yang dekat dengan permukaan yang dikenai tekanan hingga semua struktur rongga hancur. Dinding dari foam yang hancur tersebut menyebabkan densifikasi, dimana terjadi berkurangnya volume dengan massa yang tetap.



Gambar 2.3 Skema densifikasi dari *foam* – regangan tergantung dari tegangan

Sumber : K. Gawdzinska dkk (2015)

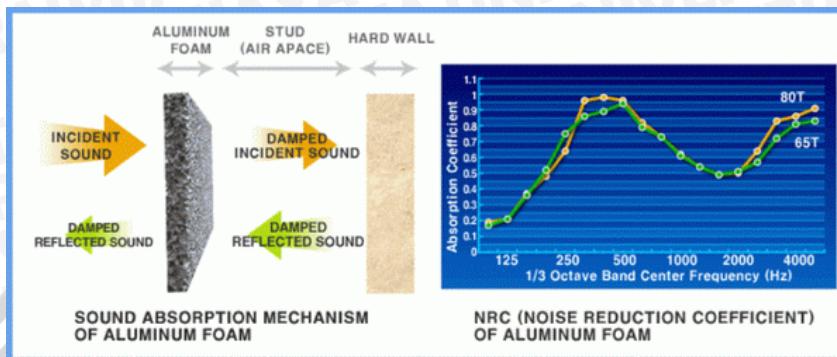
Densifikasi terus terjadi seiring dengan energi yang diterima hingga seluruhnya terserap. Jika masih ada energi yang tersisa meskipun struktur *foam* telah hancur semua, maka energi yang tersisa tersebut akan diteruskan ke struktur di belakangnya. Sedangkan gas yang terjebak memberikan peran *damping*. Pada saat dinding *foam* mengalami deformasi gas yang terjebak didalamnya tertekan. Gas tersebut mengalami penurunan volume hingga dinding hancur. Dinding yang hancur tidak menahan gas, sehingga gas keluar dari pori tersebut.



Gambar 2.4 Ilustrasi penyerapan energi mekanik pada *metal foam*

Kemampuan penyerapan energi dari *metal foam* dipengaruhi oleh densitasnya. Semakin besar densitasnya maka gas yang terjebak semakin sedikit dan dindingnya semakin tebal sehingga kekuatan tekannya semakin tinggi, namun regangan yang terjadi semakin kecil. Demikian pula sebaliknya, semakin kecil densitas maka gas yang terjebak semakin banyak dan dindingnya semakin tipis sehingga kekuatan tekannya semakin rendah namun regangan yang terjadi semakin tinggi.

Selain penyerapan energi mekanik, *metal foam* juga dapat menyerap energi suara seperti yang dijelaskan pada gambar 2.5 berikut. Beberapa produsen *aluminium foam* telah menjual secara komersial sebagai media penyerap suara salah satunya China Bei Hai Building Material Co. Ltd.



Gambar 2.5 Ilustrasi penyerapan energi berupa suara pada *aluminium foam*

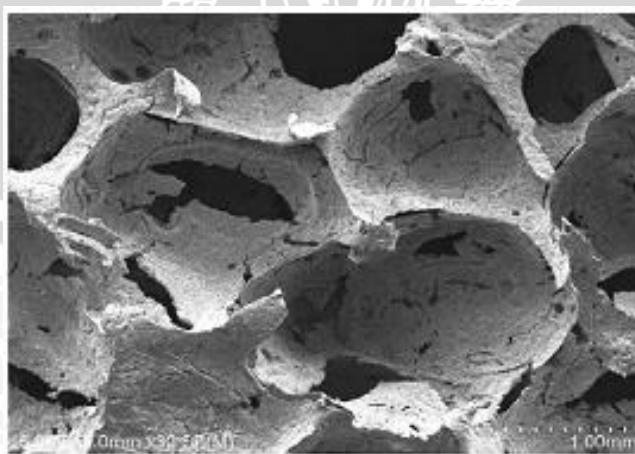
Sumber :China Bei Hai Building Material Co.Ltd. (2015)

2.2.2 Klasifikasi Metal Foam

Metal Foam dapat diklasifikasikan menurut struktur pori yang dimiliki, *metal foam* dibagi menjadi dua yaitu :

a. *Open cell metal foam*

Merupakan *metal foam* dengan pori yang terbuka dan saling terhubung dengan pori yang lain. Penghubung antar pori dari *open cell* berbentuk seperti batang yang tersusun rapi dan saling berhubungan satu sama lain. Penghubung ini dinamakan *strut*. *Open cell foam* pada umumnya menggunakan proses *investment casting* dalam pembuatannya.

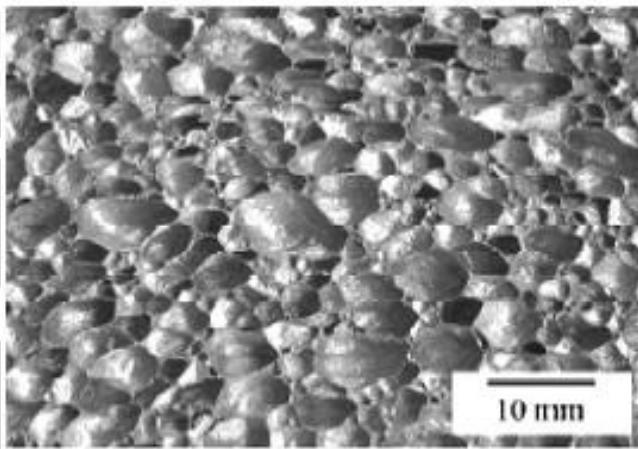


Gambar 2.6 *Open cell iron foam*

Sumber : Liu & Chen (2014:3)

b. *Close cell metal foam*

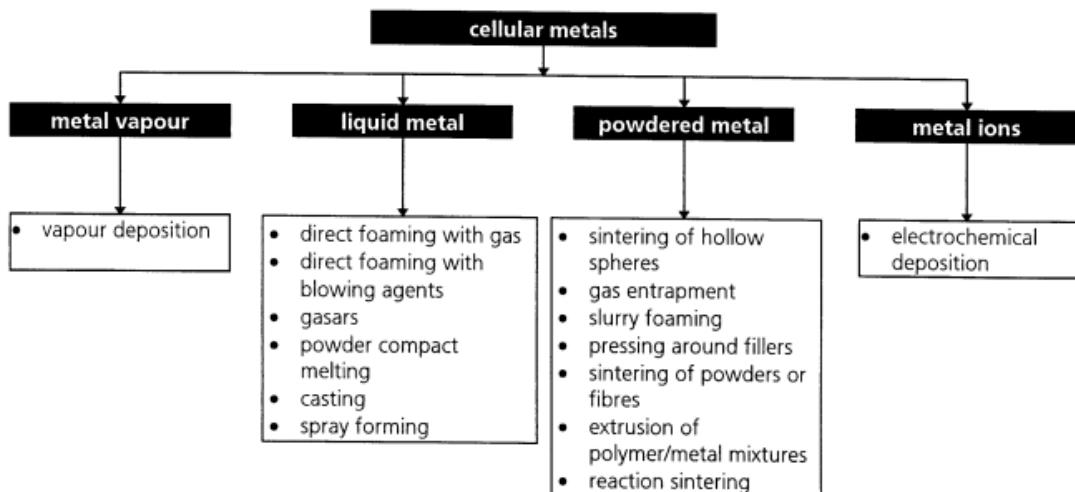
Berbeda dengan *open cell*, pada *close cell* masing – masing pori tertutup oleh dinding logam tipis. Hal ini disebabkan pada saat solidifikasi, gelembung gas yang terletak didalam logam cair terperangkap dan antar gelembung gas terbentuk batas tipis dari logam cair. Batas tipis inilah yang membuat pori tertutup.



Gambar 2.7 *Close cell aluminium foam*

Sumber : Liu & Chen (2014:2)

2.2.3 Metode Pembuatan *Metal Foam*



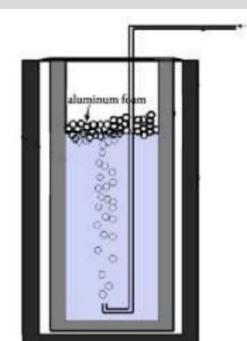
Gambar 2.8 Klasifikasi metode pembuatan *aluminium foam*

Sumber : Banhart (2001:563)

Banyak metode yang dapat digunakan untuk membuat *metal foam* seperti contohnya *powder metallurgy* dan *stir casting*. Tujuan yang diperoleh dari keduanya adalah sama, yaitu memperoleh struktur logam busa. Gambar 2.5 diatas menunjukkan klasifikasi dari pembuatan *aluminium foam* menurut J. Banhart.

1. Proses pembuatan *metal foam* melalui keadaan cair

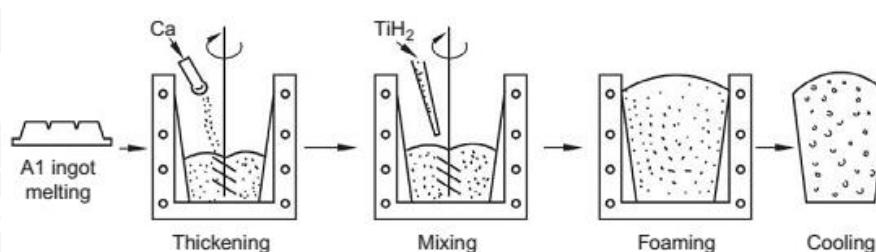
Merupakan proses pembuatan *metal foam* yang paling banyak digunakan. Logam dipanaskan hingga mencapai fase cair lalu dimasukkan gas – gas baik secara mekanik ataupun dengan reaksi kimia. *Direct foaming with gas*, *direct foaming with blowing agents*, *gasars (solid-gas eutectic solidification)*, *powder compact melting*, *casting*, dan *spray forming* adalah macam – macam proses yang termasuk dalam pembuatan *metal foam* melalui keadaan cair.



Gambar 2.9 *Direct foaming with gas*

Sumber : Malekjafarian dkk. (2011)

Pada *direct foaming with gas*, gas dimasukkan langsung ke dalam logam cair melalui *injector*. Gelembung gas yang ada didalam logam cair cenderung untuk keluar dengan cepat karena gaya apung yang tinggi dalam cairan logam. Hal ini bisa diatasi dengan meningkatkan viskositas dari logam cair.

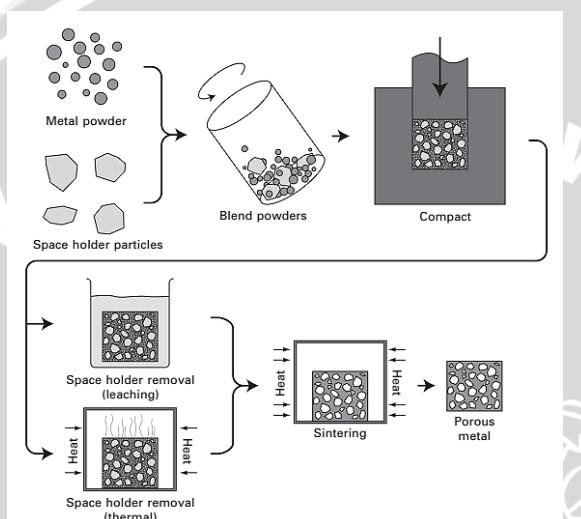


Gambar 2.10 Proses *direct foaming* menggunakan *blowing agent*

Sumber : Liu & Chen (2014:60)

Berbeda dengan *direct foaming with gas*, pada *direct foaming with blowing agent* menggunakan unsur yang dapat menghasilkan gas pada temperatur yang tinggi. *Blowing agent* ini dimasukkan pada logam cair dan diaduk. Titanium hidrida(TiH_2), zirkonium hidrida (ZrH_2) dan magnesium hidrida (MgH_2) merupakan hidrida logam yang sering digunakan sebagai *blowing agent* untuk pembuatan *aluminium foam* dan *aluminium foam* paduan (Duarte & Banhart 2002).

2. Proses pembuatan *metal foam* melalui keadaan padat



Gambar 2.11 Teknik Space Holder

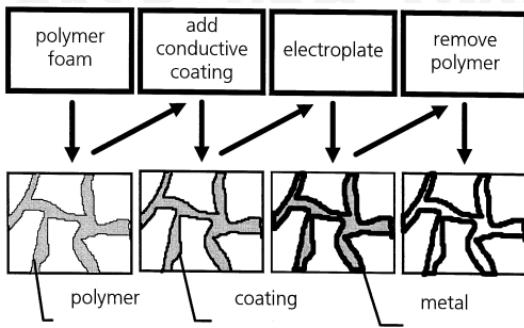
Sumber : Goodall (2013:279)

Dalam keadaan padat, logam juga dapat dibentuk menjadi *metal foam*. Untuk proses pembuatan melalui keadaan padat ini, pada umumnya menggunakan teknik *powder metallurgy* dan proses sintering karena tergolong lebih mudah jika dibandingkan dengan teknik lain seperti *gas entrapment* dan *space holder*.

3. *Electro disposition technique*

Teknik ini dimulai dari keadaan logam dalam bentuk ion. Ion dari logam dibuat menempel ke busa polimer sebagai cetakan. Cetakan dari busa polimer ini nantinya akan dibuang. Dapat dikatakan teknik ini menggunakan konsep *investment casting* dan memanfaatkan bantuan sifat elektrolit dari ion logam. Namun teknik ini memerlukan busa polimer yang memiliki konduktivitas listrik yang baik.





Gambar 2.12 *Electro Disposition Technique*

Sumber : Banhart (2001:595)

4. Vapour deposition

Metal foam dapat dibuat dari logam gas atau senyawa logam gas. Uap logam dalam ruang vakum dapat diproduksi dan uap tersebut dibiarkan mengembun. Lapisan dari logam yang terkondensasi tersebut melapisi cetakan dari polimer dengan densitas tertentu yang dapat diketahui dari densitas uap logam dan waktu pendinginan.

2.3 Baterai

Baterai adalah sebuah alat yang mengkonversi energi kimia yang terkandung dalam material aktif ke energi listrik secara langsung dengan reaksi elektrokimia oksidasi-reduksi. Dalam *rechargeable system*, baterai diisi ulang dengan kebalikan dari proses (Linden, 2002:1-3).

Secara umum baterai diklasifikasikan sebagai berikut (Linden, 2002:6.3) :

1. Primary batteries

Biasanya diaplikasikan dari peralatan dengan daya rendah hingga cukup tinggi, sebagian besar diproduksi dengan bentuk pipih, kancing dan silinder. Baterai jenis ini sangat mudah ditemukan, murah, sumber tenaga yang ringan, dengan demikian sering digunakan pada peralatan listrik portable, sering disebut dengan “*dry-cell*”. *Primary batteries* juga diproduksi dengan ukuran besar, dimana kapasitas dan densitas energi yang tinggi, umur pakai dan tanpa pengisian ulang dan perawatan menjadi pertimbangan utama. Contoh dari *primary batteries* adalah baterai jam tangan, baterai AA yang digunakan pada senter, kalkulator dan radio.

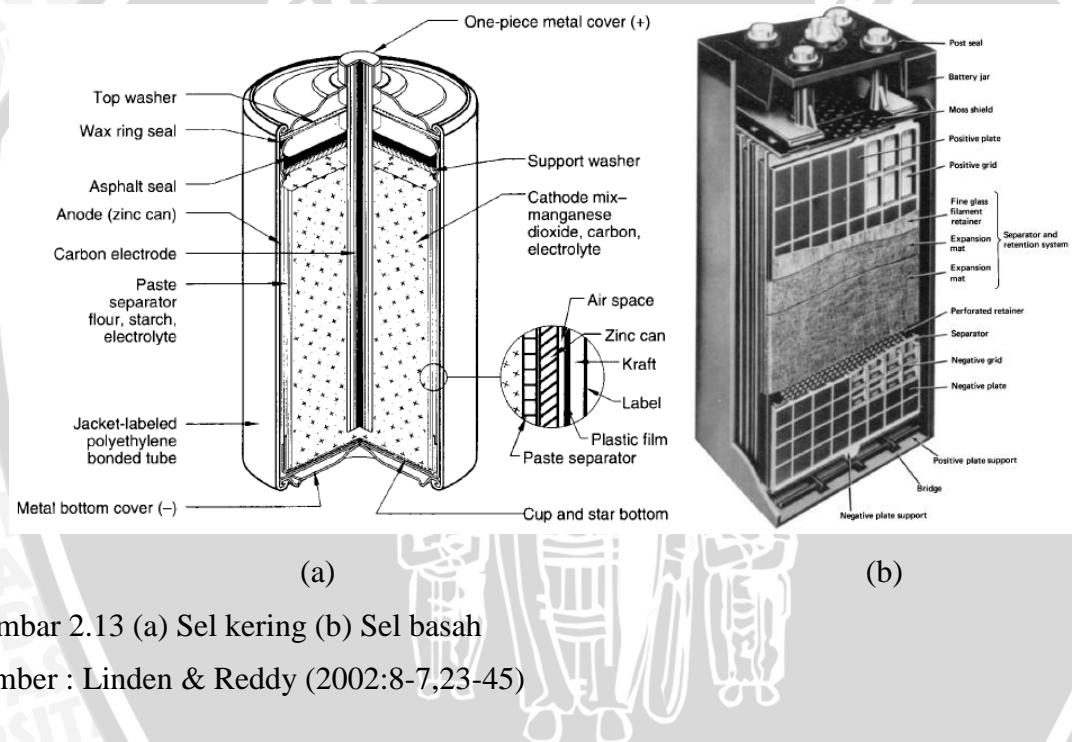
2. Secondary (rechargeable) batteries

Digunakan sebagai media penyimpan energi, umumnya terhubung dan diisi oleh sumber energi utama dan memberikan energi pada beban sesuai dengan permintaan. Baterai jenis ini juga diaplikasikan dimana memberikan energi dan kemudian diisi ulang secara terpisah dari

sumber energi utama. Contoh dari jenis ini adalah sistem penyalaan motor bakar, baterai mobil listrik, UPS, dan telepon seluler dimana meminimalisir biaya operasional dan untuk menangani tingkat daya yang lebih tinggi dari baterai konvensional.

3. Reserve system batteries

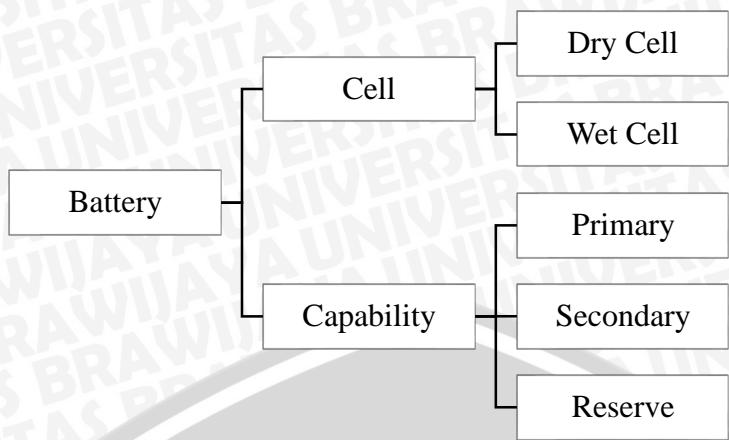
Baterai jenis ini digunakan pada aplikasi khusus yang membutuhkan baterai dengan *high rate discharge* dalam waktu yang singkat setelah disimpan dengan kondisi tidak aktif dalam waktu yang lama atau kondisi sebagai cadangan. Untuk jenis ini kebanyakan digunakan di bidang militer seperti torpedo, misil dan persenjataan lainnya. Selain itu, *reserve system batteries* juga didesain untuk memenuhi kebutuhan penyimpanan energi pada waktu yang sangat panjang dan lingkungan yang ekstrim.



Gambar 2.13 (a) Sel kering (b) Sel basah

Sumber : Linden & Reddy (2002:8-7,23-45)

Baterai juga dapat diklasifikasikan menurut desain atau struktur yang digunakan, yaitu sel kering (*dry cell*) dan sel basah (*wet cell*). Sel kering menggunakan elektrolit berupa pasta dengan kelembaban yang cukup untuk memungkinkan arus mengalir atau menggunakan medium gel. Karena tidak adanya cairan bebas dalam sel, sel kering ini sering digunakan sebagai sumber energi portabel seperti pada laptop, telepon genggam dan jam tangan. Berbeda dengan sel basah dimana elektrolit yang digunakan berupa cairan. Cairan elektrolit pada sel basah bebas bergerak sehingga beresiko tumpah dan berbahaya mengingat jenis larutan yang digunakan pada umumnya bersifat asam. Sel basah sering digunakan pada otomotif.



Gambar 2.14 Klasifikasi baterai

2.3.1 Metal Air Batteries

Metal air batteries adalah kopel elektrokimia yang terdiri dari anoda reaktif terhadap elektroda udara yang mendukung baterai dengan reaktan katoda tidak ada habisnya, dan dalam beberapa kasus memiliki energi spesifik dan densitas energi yang sangat tinggi (Hamlen & Atwater, 2002:38-1).

Metal air batteries merupakan jenis baterai yang tergolong unik, hal ini dikarenakan *metal air batteries* menggunakan oksigen sebagai katoda. Untuk elektrolit yang sering digunakan pada *metal air batteries* adalah jenis *aqueous based electrolyte*, namun ada juga yang menggunakan *non aqueous based electrolyte*. Untuk lebih jelasnya berikut adalah reaksi yang terjadi di elektroda *metal air batteries* :

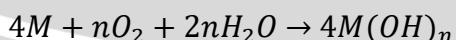
Reaksi reduksi oksigen pada katoda



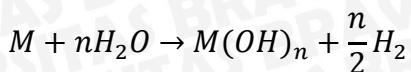
Reaksi oksidasi logam pada anoda



Reaksi total



Pada katoda terjadi reaksi reduksi dari oksigen berupa penyerapan elektron dan pada anoda terjadi reaksi oksidasi berupa pelepasan elektron dari logam. Nilai n pada reaksi oksidasi tergantung pada valensi dari logam. Namun pada *metal air batteries* yang menggunakan *aqueous based electrolyte* kebanyakan logam cenderung untuk tidak stabil dan menghasilkan hidrogen, sehingga reaksinya menjadi seperti berikut :



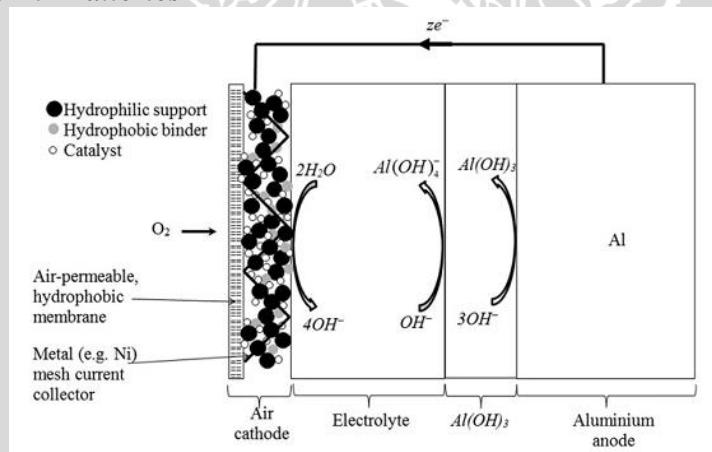
Reaksi ini menimbulkan kerugian berupa korosi, *self discharge*, menurunkan efisiensi coulomb dari anoda dan harus dikontrol untuk meminimalisir kehilangan kapasitas ini (Hamlen & Atwater, 2002:38-2).

Tabel 2.1 Keuntungan dan kerugian dari *metal air batteries*

| Advantages | Disadvantages |
|--|---|
| High energy density | Dependent on environmental conditions: |
| Flat discharge voltage | Drying-out limits shelf life once opened to air |
| Long shelf life (dry storage) | Flooding limits power output |
| No ecological problems | Limited power output |
| Low cost (on metal use basis) | Limited operating temperature range |
| Capacity independent of load and temperature when within operating range | H ₂ from anode corrosion |
| | Carbonation of alkali electrolyte |

Sumber : Hamlen & Atwater (2002:38-2)

2.3.2 Aluminium Air Batteries



Gambar 2.15 Ilustrasi aluminium air batteries

Sumber : Egan dkk. (2012)

Logam yang dapat digunakan sebagai *metal air batteries* cukup banyak, antara lain seng (Zn), lithium (Li), magnesium (Mg), besi (Fe), dan aluminium (Al). Yang paling sering menarik perhatian dan sudah dikembangkan bahkan digunakan adalah seng (Zn) dikarenakan seng merupakan logam yang paling *electropositive* yaitu kecenderungan untuk melepas elektron dan membentuk ion positif diantara logam yang lain. Selain itu seng relatif stabil dalam *aqueous* dan *alkaline electrolyte* tanpa mengalami korosi yang signifikan, menyediakan penghambat (*inhibitor*) yang tepat (Hamlen & Atwater, 2002:38-1).

Tabel 2.2 Karakteristik logam sebagai *metal air batteries*

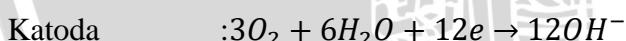
| Metal anode | Electrochemical equivalent of metal, Ah/g | Theoretical cell voltage,* V | Valence change | Theoretical specific energy (of metal), kWh/kg | Practical operating voltage, V |
|-------------|---|------------------------------|----------------|--|--------------------------------|
| Li | 3.86 | 3.4 | 1 | 13.0 | 2.4 |
| Ca | 1.34 | 3.4 | 2 | 4.6 | 2.0 |
| Mg | 2.20 | 3.1 | 2 | 6.8 | 1.2–1.4 |
| Al | 2.98 | 2.7 | 3 | 8.1 | 1.1–1.4 |
| Zn | 0.82 | 1.6 | 2 | 1.3 | 1.0–1.2 |
| Fe | 0.96 | 1.3 | 2 | 1.2 | 1.0 |

*Cell voltage with oxygen cathode.

Sumber : Hamlen & Atwater (2002:38-2)

Logam selain seng, aluminium juga menarik perhatian untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai *metal air batteries*. Dengan energi spesifik sebesar 8,1 kWh/kg dan mampu menghasilkan tegangan sebesar 1,1 – 1,4 volt menjadikan aluminium masuk dalam pertimbangan untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai *metal air batteries*. Ditambah lagi aluminium dikenal memiliki kelimpahan geologi (elemen ketiga paling banyak dalam kerak bumi), berpotensi dengan biaya yang rendah dan relatif mudah penanganannya (Hamlen & Atwater, 2002:38-2).

Reaksi dari *aluminium air batteries* adalah sebagai berikut:



Aluminium air batteries dapat terjadi korosi pada anoda jika menggunakan elektrolit alkali. Hal ini tentunya mengurangi performa dari *aluminium air batteries*. Dengan penambahan zat pelindung (*inhibitor*) seperti seng, reaksi korosi dari aluminium dapat dihindari.

Beberapa studi mengenai faktor – faktor yang mempengaruhi performa *aluminium air-battery* telah dilakukan. Berikut adalah faktor – faktor yang mempengaruhi performa *aluminium air-battery* :

1. Tingkat kemurnian dari aluminium (Egan dkk : 2012).
2. Jenis elektrolit yang digunakan (Ma dkk : 2014).
3. Ukuran butir aluminium (Fan & Lu : 2015)

2.4 Blowing Agent

2.4.1 Definisi Blowing Agent

Blowing agent adalah substansi yang digunakan untuk menghasilkan gelembung gas saat proses *foaming* sehingga dapat menghasilkan struktur pori pada logam busa. *Blowing agent* mampu menghasilkan gas pada saat pencampuran dengan logam cair karena temperatur dekomposisinya yang sesuai dengan temperatur lebur dari logam. Pada saat dekomposisi, *blowing agent* menghasilkan gas, gas inilah yang bertanggung jawab untuk menghasilkan struktur pori pada logam saat proses solidifikasi nantinya.

Pada umumnya *blowing agent* merupakan senyawa yang terdiri dari logam dan hidrogen (logam hidrida) seperti zirkonium hidrida (ZrH_2), titanium hidrida (TiH_2) dan magnesium hidrida (MgH_2). Gas yang dilepas oleh senyawa hidrida pada saat dekomposisi merupakan gas hidrogen. Namun bukan hanya senyawa logam hidrida yang bisa digunakan sebagai *blowing agent*. Senyawa logam seperti karbonat dan oksida juga dapat digunakan. Karena pada dasarnya *blowing agent* diharuskan untuk menghasilkan gas pada saat dekomposisi. Untuk menghasilkan struktur pori dengan distribusi yang merata, densitas dari *blowing agent* saat dekomposisi harus relatif sama dengan densitas dari logam cair.

2.4.2 Titanium Hidrida (TiH_2)

Titanium hidrida adalah senyawa logam hidrida yang unsur penyusunnya terdiri dari titanium dan hidrogen. Senyawa titanium hidrida telah lama digunakan sebagai *blowing agent* dalam memproduksi *metal foam*. Shinko Wire di Amagasaki, Jepang pada tahun 1986 telah memproduksi *metal foam* hingga 1000 kg/hari menggunakan titanium hidrida 1,6% sebagai *blowing agent* setelah penambahan kalsium logam 1,5 – 3% (Banhart 2001:569). Namun senyawa ini termasuk senyawa dengan mahal.

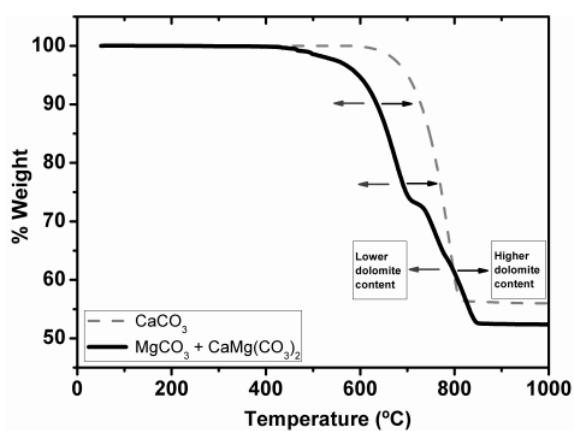
2.4.3 Aluminium Oksida (Al_2O_3)

Aluminium oksida didapatkan dari hasil pemurnian bijih aluminium yaitu bauksit. Aluminium oksida memiliki sifat mekanik yang baik, antara lain kekerasan dan kekuatan yang tinggi dan ketahanan terhadap abrasi yang baik. Selain itu aluminium oksida atau alumina, sering digunakan untuk memproduksi aluminium karena dapat melindungi dari korosi. Pada penelitian ini aluminium oksida ditambahkan untuk meningkatkan sifat mampu basah (wettability) dari aluminium cair.



2.4.4 Kalsium Karbonat (CaCO_3)

Kalsium karbonat berwarna putih, dan terdiri dari 3 unsur yaitu kalsium, karbon, dan oksigen. Dengan densitas sebesar $2,711 \text{ g/cm}^3$ dimana mendekati dengan densitas aluminium yaitu $2,7 \text{ g/cm}^3$, kalsium karbonat mampu terdispersi dengan baik pada aluminium cair nantinya. Selain dari densitas yang mendekati dengan aluminium, temperatur dekomposisi dari kalsium karbonat juga mendekati dari temperatur cair aluminium yaitu $600 - 800^\circ\text{C}$ dapat dilihat pada gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2.16 Thermogravimetric (TG) dari CaCO_3 (garis putus – putus) dan garis hitam digunakan oleh Lazaro dkk

Sumber : Lazaro dkk. (2014)

Reaksi dekomposisi dari kalsium karbonat sebagai berikut :



Dari reaksi tersebut terlihat bahwa pada saat dekomposisi yang disebabkan oleh temperatur tinggi, kalsium karbonat terpecah menjadi kalsium oksida (CaO) dan karbon dioksida (CO_2). Gas karbon dioksida inilah yang nantinya bertanggung jawab untuk membentuk gelembung gas dalam aluminium cair pada saat proses pembusaan nantinya. Pada saat proses pembekuan aluminium ini terjadi gas karbon dioksida yang masih terjebak akan membentuk struktur pori ketika aluminium memadat.

2.5 Aluminium

Aluminium merupakan unsur ketiga terbanyak di dalam kerak bumi dan unsur logam paling melimpah. Selama 50 tahun terakhir aluminium menjadi unsur kedua paling banyak digunakan setelah besi (Lumley, 2011:1). Diperoleh dari pengolahan biji aluminium yaitu bauksit. Estimasi total produksi aluminium dari bauksit berkisar antara 55 – 75 miliar ton,

dimana berlokasi di Afrika (33%), Oceania (34%), Amerika Selatan dan Karibia (22%), Asia (15%) dan ditempat lain (6%) (Bray, 2009).

2.5.1 Sifat – Sifat Aluminium

Aluminium dikenal karena ringan, konduktivitas termal dan listrik yang baik, tidak magnetik dan tahan korosi. Berikut adalah sifat – sifat fisik dari aluminium yang dijelaskan berikut ini berdasarkan TALAT 1501.

1. Struktur atom dan Kristal

Dengan nomor atom 13, aluminium memiliki kecenderungan untuk membentuk ion positif dengan menyumbangkan 3 elektron terluarnya dalam membentuk ikatan kimia. Untuk struktur kristal dari aluminium adalah FCC (*face centered cubic*).

2. Densitas

Berat jenis dari aluminium sebesar $2,7 \text{ g/cm}^3$. Dengan berat jenis tersebut berat aluminium tergolong ringan mencapai $1/3$ berat dari jenis logam lain pada umumnya.

3. Konduktivitas termal

Konduktivitas termal dari aluminium murni (99,99%) sebesar 244 W/mK pada temperatur antara $0 - 100^\circ\text{C}$. Konduktivitas termal dari aluminium akan menurun sedikit apabila ada penambahan paduan.

4. Temperatur lebur

Temperatur lebur aluminium murni (99,99%) pada tekanan atmosfer adalah 660°C . Namun pada aluminium murni komersil (99.5%) terjadi penurunan temperatur lebur menjadi 635°C . Tentunya paduan juga akan mempengaruhi temperatur lebur dari aluminium.

5. Ketahanan korosi

Aluminium mendapatkan sifat ketahanan terhadap korosi yang didapatkan dari aluminium oksida yang terdapat pada permukaan. Lapisan ini selalu ada dalam permukaan aluminium di atmosfer oksigen.

2.5.2 Paduan Aluminium

Aluminium dalam penggunaan secara komersil sering dipadukan dengan logam lain contohnya magnesium, silikon dan tembaga. Penambahan paduan ini bertujuan untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanik dari aluminium yang masih dirasa kurang memenuhi.

Paduan dari aluminium ini memiliki kode khusus untuk tiap aluminium yang diproduksi dengan paduan logam lain maupun proses dan perlakuannya. Pemberian kode khusus ini



untuk memudahkan konsumen mendapatkan aluminium dengan kriteria yang dibutuhkan. Kode empat digit adalah salah satu sistem pengkodean yang sering digunakan.

| | | Major alloying element | Atoms in solution | Work hardening | Precipitation hardening |
|---|-------|------------------------|-------------------|----------------|---------------------------|
| WROUGHT ALLOYS*) EN AW- | 1XXX | None (min. 99.00% Al) | | X | |
| | 3XXX | Mn | X | X | |
| | 4XXX | Si | X | X | |
| | 5XXX | Mg | X | X | Non-heat treatable alloys |
| | 2XXX | Cu | X | (X) | X |
| CASTING ALLOYS*) EN AB- EN AC- EN AM- | 6XXX | Mg + Si | X | (X) | X |
| | 7XXX | Zn | X | (X) | X |
| | 8XXX | Other | X | (X) | X |
| | 1XXX0 | None (min. 99.00% Al) | | | |
| | 2XXX0 | Cu | | | |
| | 4XXX0 | Si | | | |
| | 5XXX0 | Mg | | | |
| | 7XXX0 | Zn | | | |
| | 8XXX0 | Sn | | | |
| | 9XXX0 | Master Alloys | | | |

*) letters preceding the alloy numbers have the following meaning
 EN = European Standard
 A = Aluminium
 B = Ingot
 C = Cast Alloy
 M = Master Alloy
 W = Wrought Alloy

Gambar 2.17 Sistem klasifikasi aluminium paduan menggunakan kode 4 digit

Sumber : TALAT 1501 (1994)

Gambar 2.12 diatas menunjukkan sistem klasifikasi aluminium paduan menggunakan kode 4 digit yang digunakan di Eropa. Ada dua penggolongan aluminium berdasarkan prosesnya, yaitu aluminium paduan tempa (*wrought alloy*) dan aluminium paduan cor (*casting alloy*). Aluminium paduan tempa menggunakan metode *forming*, *rolling*, *forging* dan *drawing*. Sedangkan pada aluminium paduan cor menggunakan metode pengecoran.

2.6 Pengujian Porositas

2.6.1 Definisi Porositas

Porositas adalah salah satu cacat coran yang umum terjadi pada pengecoran logam. Porositas terjadi karena adanya gas hidrogen yang terperangkap saat proses penuangan logam cair ke cetakan. Porositas akan menyebabkan turunnya kekuatan dan kesempurnaan geometri dari coran. Umumnya porositas diminimalisir dengan menjaga kecepatan penuangan sehingga aliran dari logam cair laminar dan gas hidrogen yang terperangkap lebih sedikit. Hal ini dikarenakan pada saat logam berfase cair, hidrogen lebih mudah larut bila dibandingkan dengan fase padat.

2.6.2 Perhitungan Porositas

Porositas dapat diketahui dengan membandingkan *apparent density* (densitas sampel) dengan *true density* (densitas teoritis) (Taylor, 2000), yaitu :

$$\%P = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}} \times 100\% \quad (2-1)$$

Keterangan :

$\%P$ = Prosentase porositas (%)

ρ_s = Apparent density (gr/cm^3)

ρ_{th} = True density (gr/cm^3)

Untuk perhitungan dari *apparent density* (ASTM B311-93) menggunakan persamaan (2-2) dan *true density* (ASTM E252-84) menggunakan persamaan (2-3) adalah sebagai berikut :

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

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

Keterangan :

ρ_s = Apparent density (gr/cm^3)

ρ_{th} = True density (gr/cm^3)

ρ_w = Densitas air (gr/cm^3)

W_s = Berat sampel di udara (gr).

W_b = Berat keranjang di dalam air (gr).

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

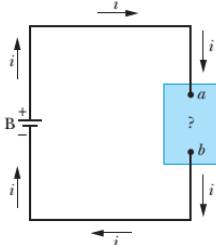
ρ_{Al} , ρ_{Cu} , ρ_{Fe} , etc = Densitas unsur (gr/cm^3).

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



2.7 Pengujian Daya Listrik

The battery at the left supplies energy to the conduction electrons that form the current.



Gambar 2.18 Ilustrasi baterai B dalam sirkuit

Sumber : Walker (2014:760)

Prinsip dari konservasi energi dimana energi potensial listrik dari *a* ke *b* disertai transfer energi ke bentuk lainnya. Daya *P* dihubungkan dengan transfer energi dimana laju transfer dU/dt yang ditunjukkan dalam persamaan berikut :

$$dU = dqV = idtV \quad (2-4)$$

$$P = i \cdot V \quad (2-5)$$

Keterangan :

P = Daya listrik (W)

i = Arus listrik (A)

V = Voltase (V)

Dimana jumlah dari muatan yaitu *dq* yang bergerak dari *a* ke *b* dalam interval waktu *dt* sama dengan *i dt*. Dengan demikian daya *P* merupakan laju dimana energi yang ditransfer dari baterai ke perangkat lain dalam sirkuit (Walker, 2007:760). Sehingga diperlukan adanya dua data untuk mendapatkan nilai daya, yaitu arus (*i*) dan voltase (*V*). Kedua data tersebut dapat diperoleh dengan menghubungkan alat ukur pada titik *a* dan *b*. Alat ukur yang disebutkan adalah amperemeter untuk arus dan voltmeter untuk voltase.

2.8 Hipotesis

Dengan pertambahan temperatur peleburan aluminium pada proses pembuatan akan meningkatkan porositas sehingga meningkatkan daya listrik yang dihasilkan dari *aluminium foam* sebagai anoda dalam *aluminium air battery*.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



3.1 Metode Penelitian

Dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh dari *casting temperature* terhadap porositas *aluminium foam* dan daya listrik yang mampu dihasilkan sebagai elektroda dalam *aluminium air-battery*, maka penelitian eksperimental nyata digunakan sebagai metode penelitian.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Semua kegiatan penelitian antara lain pengecoran, pemotongan, pengujian komposisi, porositas dan daya listrik dilakukan di Universitas Brawijaya. Dimana untuk proses pengecoran dan pemotongan spesimen dilakukan di Laboratorium Pengecoran Logam dalam kurun waktu 15 Juni – 20 Agustus 2015 dan untuk pengujian porositas pada tanggal 11 – 12 Oktober 2015. Pengujian komposisi spesimen yang digunakan adalah SEM EDAX dilakukan pada tanggal 11 – 12 Oktober 2015 di Laboratorium Biosains Universitas Brawijaya, Malang.

3.3 Variabel Penelitian

Ada tiga variabel yang ditentukan sebelum penelitian dilakukan. Variabel – variabel tersebut antara lain:

- Variabel Bebas

Dalam penelitian ini adalah *casting temperature* yang digunakan pada proses pembuatan spesimen *aluminium foam*. Ada 3 variasi *casting temperature* yang dipakai yaitu 750°C, 800°C dan 850 °C

- Variabel Terikat

Pada penelitian ini adalah porositas dan daya listrik yang dihasilkan spesimen *aluminium foam* sebagai anoda dalam *aluminium air-battery*.

- Variabel Terkontrol

Untuk variabel ini dimana besarnya dijaga konstan selama penelitian antara lain :
- Bahan utama yang digunakan adalah aluminium paduan A6061.

- Pada proses pembuatan *aluminium foam* menggunakan metode *direct foaming with blowing agent* dengan *stir casting* 650 rpm. Proses pengadukan dengan *stir casting* dilakukan selama 2 menit.
- Kalsium karbonat (CaCO_3) 3% sebagai *blowing agent* dan serbuk alumina (Al_2O_3) 1,5% sebagai *wetting agent* dicampur dengan putaran 240 rpm selama 10 menit menggunakan mesin bubut sebelum dimasukkan ke dalam aluminium cair.
- Campuran serbuk kalsium karbonat dan alumina ditambahkan ke aluminium cair dengan bantuan pengadukan manual selama 1 menit.
- Proses *holding* setelah pengadukan dilakukan selama 10 menit.
- Larutan elektrolit yang digunakan pada *aluminium air-battery* adalah 2 M NaCl.

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat – Alat Penelitian

1. Dapur Listrik



Gambar 3.1 Dapur listrik

Sumber : Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2015)

Dapur listrik digunakan pada proses peleburan aluminium. Untuk spesifikasi dapur listrik sebagai berikut :

Merk : Nabertherm

Tahun : 1990

Buatan : Jerman

| | |
|---------------|--------------|
| No. Seri | : 079660 |
| Suhu Maksimal | : 1300°C |
| Daya | : 10260 Watt |
| Arus | : 27 A |
| Frekuensi | : 50 Hz |
| Voltase | : 380 V |

2. Timbangan Digital



Gambar 3.2 Timbangan digital

Sumber : Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2015)

Digunakan untuk menimbang serbuk kalsium karbonat dan alumina. Selain itu juga digunakan untuk menimbang berat dari spesimen yang diperlukan untuk perhitungan porositas. Spesifikasinya sebagai berikut :

Merk : Melter

Type : PJ 3000

Frekuensi : 50-60 Hz

Voltage : 100-120 V 80 mA / 200-240 V 45 mA

Kapasitas : 3000 gram

Ketelitian : 0,01 gram

3. Crucible

Crucible yang digunakan sebagai tempat peleburan aluminium terbuat dari tanah liat yang tahan api (*fireclay*).

4. Tabung Pencampur

Tabung pencampur digunakan untuk mencampur kalsium karbonat dan serbuk alumina sebelum dimasukkan ke dalam aluminium cair.

5. Mesin *Hand Drill*

Mesin *hand drill* digunakan untuk mengaduk aluminium cair sehingga tercampur dengan *blowing agent*.

6. *Infrared Thermometer*

Digunakan untuk mengetahui temperatur pengecoran.

7. Kamera Digital

Digunakan untuk dokumentasi selama proses penelitian.

8. *Digital Multitester*

Digunakan untuk mengukur voltase dan arus yang dihasilkan *aluminium air battery*.

9. *Stopwatch*

Digunakan untuk menghitung waktu pada saat proses pengecoran dan pengambilan data.

3.4.2 Bahan Penelitian

1. Aluminium 6061 (Al-Mg-Si) sebagai bahan utama pembuatan *aluminium foam*.
2. Serbuk kalsium karbonat (CaCO_3).
3. Serbuk alumina (Al_2O_3).
4. Serbuk karbon
5. Larutan 2M NaCl sebagai elektrolit.

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Prosedur Pembuatan Spesimen

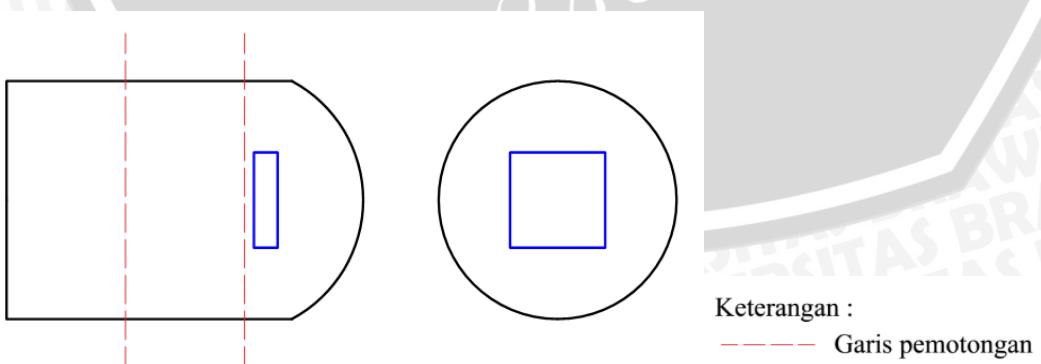
Pembuatan spesimen *aluminium foam* menggunakan *melt process* dengan temperatur peleburan yang berbeda. Langkah pembuatan dari sampel sebagai berikut :

1. Bahan – bahan antara lain aluminium 6061, serbuk kalsium karbonat dan alumina ditimbang sesuai dengan fraksi beratnya masing – masing.

2. Serbuk kalsium karbonat dan serbuk alumina dicampur pada 240 rpm selama 10 menit menggunakan mesin bubut.
3. Alat – alat dipersiapkan seperti dapur listrik, mesin *hand drill* dan *stopwatch*.
4. Aluminium dimasukkan ke dalam *crucible* kemudian dilebur menggunakan dapur listrik dengan variasi *casting temperature* yang ditentukan.
5. Hasil pencampuran serbuk kalsium karbonat dan serbuk alumina dituangkan ke dalam aluminium cair yang dilanjutkan dengan proses pengadukan secara manual selama 1 menit.
6. Pengadukan dilanjutkan dengan menggunakan metode *stir casting* dengan putaran 650 rpm selama 2 menit.
7. Kemudian dapur listrik ditutup dimana proses *foaming* pada aluminium cair mulai terjadi.
8. Dilanjutkan dengan proses *holding* selama 10 menit pada temperatur yang sama dengan peleburan.
9. Proses pendinginan dilakukan di luar dapur listrik dengan temperatur lingkungan.
10. Mengulangi langkah nomor 4 sampai 9 dengan variasi *casting temperature* yang lain hingga semua produk variasi *casting temperature* selesai dimana dilakukan pengulangan masing masing 3 kali.

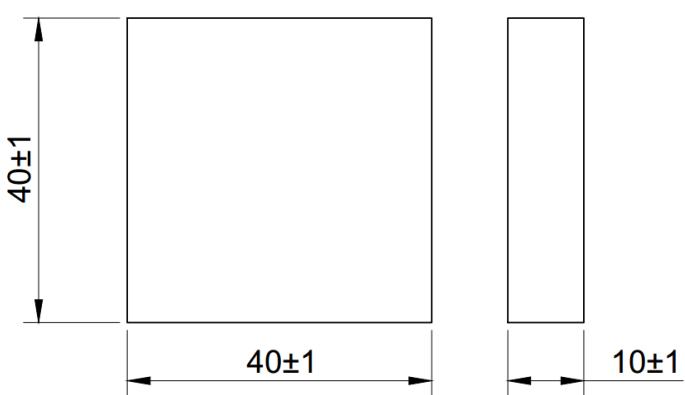
3.5.2 Prosedur Pemotongan Spesimen

Proses pemotongan spesimen dari produk hasil coran dilakukan secara manual menggunakan gergaji tangan. Bagian produk yang diambil adalah sepertiga bagian atas yang ditunjukkan oleh gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.3 Bagian produk coran yang diambil sebagai spesimen

3.5.3 Dimensi Spesimen



Gambar 3.4 Dimensi spesimen (mm)

3.5.4 Prosedur Pengujian Porositas dan Pengambilan Data Tegangan dan Arus Listrik

Untuk proses pengujian porositas *aluminium foam* menggunakan Uji Piknometri sebagai berikut :

1. Pemotongan spesimen sesuai dengan bentuk dan dimensi.
2. Menyiapkan alat – alat yang dibutuhkan seperti timbangan digital, kawat, keranjang dan air.
3. Menimbang dan mencatat berat spesimen di udara dengan menggunakan timbangan digital.
4. Menghitung volume keranjang dan kawat sebagai alat bantu pengujian.
5. Menuangkan air ke dalam timba.
6. Spesimen dimasukkan ke dalam keranjang, kemudian dimasukkan ke dalam timba sehingga seluruh permukaan spesimen tercelup ke dalam air. Catat berat spesimen di air.
7. Menghitung *apparent density* spesimen dengan menggunakan rumus dibawah ini.

$$\rho_s = \rho_w \frac{W_s}{W_s - (W_{sb} - W_b)} \quad (3-1)$$

dengan:

ρ_s = Apparent density (gr/cm³)

W_s = Berat sampel di udara (gr).

W_b = Berat keranjang di dalam air (gr).

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

8. Menghitung *true density* spesimen dengan menggunakan rumus dibawah ini.

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

dengan:

ρ_{th} = *True density* atau densitas teoritis(gr/cm^3).

ρ_{Al} , ρ_{Cu} , *etc* = Densitas unsur (gr/cm^3).

$\%Al$, $\%Cu$, *etc* = Prosentase berat unsur (%).

9. Menghitung porositas spesimen dengan menggunakan rumus dibawah ini

$$\%P = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}} \times 100\% \quad (3-3)$$

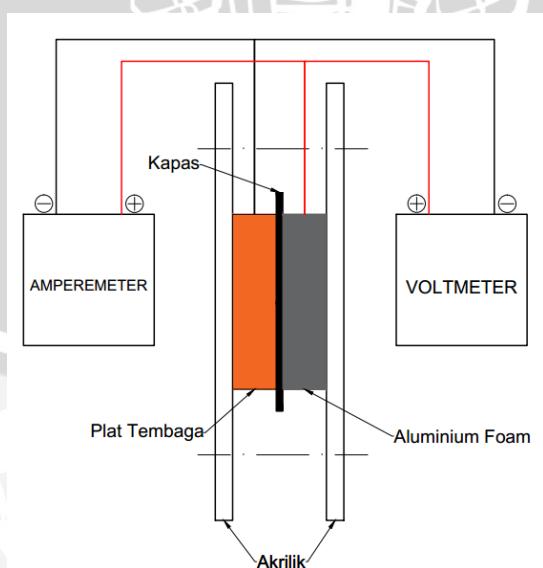
Keterangan :

$\%P$ = Prosentase porositas (%)

ρ_s = *Apparent density* (gr/cm^3)

ρ_{th} = *True density* (gr/cm^3)

10. Mengulang langkah nomor 3 sampai 9 untuk spesimen dengan temperatur peleburan $800^\circ C$ dan $850^\circ C$.

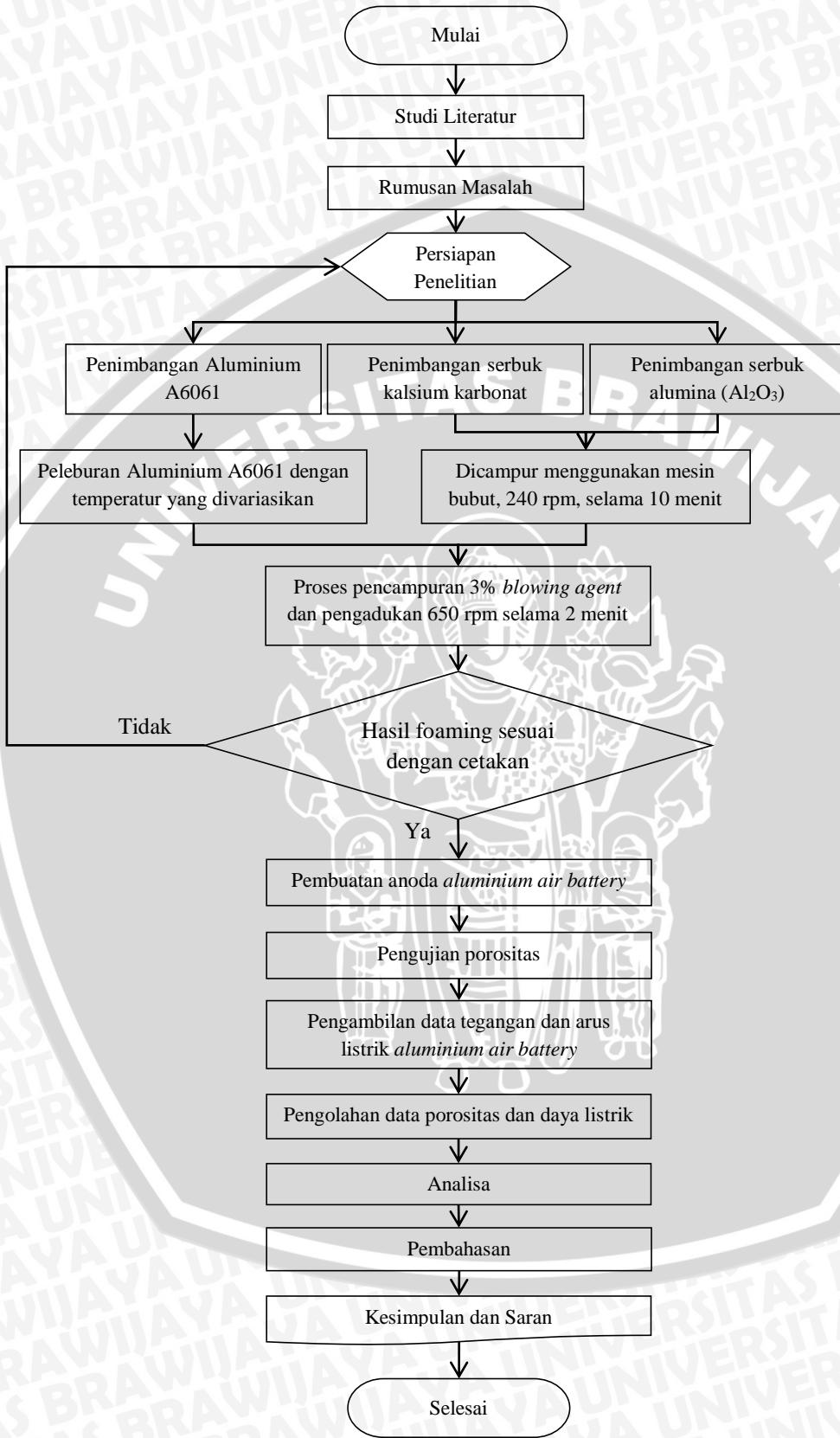


Gambar 3.5 Instalasi pengujian daya listrik

Untuk proses pengambilan data tegangan listrik, langkah – langkahnya sebagai berikut:

1. Mempersiapkan semua peralatan dan bahan yang dibutuhkan antara lain multimeter, kabel, spesimen *aluminium foam*, plat tembaga, kapas, serbuk karbon aktif, akrilik dan baut.
2. Melapisi salah satu sisi plat tembaga dengan serbuk karbon aktif, kemudian tutup dengan kapas dan ditumpuk dengan spesimen *aluminium foam* yang akan diuji.
3. Letakkan tumpukan spesimen tersebut diatas diantara dua lembar akrilik kemudian kencangkan baut hingga spesimen tidak geser.
4. Memasang kabel pada spesimen dan hubungkan dengan multimeter.
5. Menghidupkan multimeter.
6. Menyiapkan larutan 2M NaCl kemudian basahi kapas dengan larutan (± 45 ml).
7. Mencatat data voltase dan arus, tiap 5 menit sampai menit ke 60
8. Mengulangi langkah nomor 4 dan 5 dengan elektroda *aluminium foam* yang dibuat dengan temperatur peleburan 800 dan 850 °C.
9. Melepas kabel pada multimeter dan semua rangkaian *alumunium air-battery* dicopot, lalu bersihkan tempat penelitian.

3.6 Diagram Alir Penelitian





UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Porositas

4.1.1 Data Hasil Pengujian *True Density* Spesimen *Aluminium Foam*

True density merupakan nilai densitas secara teoritis dari spesimen tanpa porositas.

Untuk mendapatkan nilai *true density* diperlukan komposisi elemen penyusun dari tiap – tiap spesimen yang diperoleh dengan pengujian EDAX. Tabel 4.1, 4.2 dan 4.3 berikut menyajikan hasil pengujian SEM EDAX berupa komposisi dari tiap – tiap spesimen *aluminium foam*.

Tabel 4.1 Data Hasil Komposisi EDAX *Al-Foam* untuk Variasi I (750 °C)

| Elemen | Berat (%) | ρ (gr/cm ³) | %/ ρ |
|----------------|-----------|------------------------------|-----------|
| Aluminum (Al) | 41,829 | 2,7 | 15,4922 |
| Magnesium (Mg) | 2,81 | 1,74 | 1,6149 |
| Silikon (Si) | 0,7 | 2,33 | 0,3004 |
| Kalsium (Ca) | 1,241 | 1,55 | 0,8006 |
| Besi (Fe) | 1,903 | 7,86 | 0,2421 |
| Oksigen (O) | 29,804 | 1,14 | 26,1438 |
| Karbon (C) | 21,672 | 2,26 | 9,5893 |

Tabel 4.2 Data Hasil Komposisi EDAX *Al-Foam* untuk Variasi II (800 °C)

| Elemen | Berat (%) | ρ (gr/cm ³) | %/ ρ |
|----------------|-----------|------------------------------|-----------|
| Aluminum (Al) | 68,76 | 2,7 | 25,4667 |
| Magnesium (Mg) | 1,821 | 1,74 | 1,0465 |
| Silikon (Si) | 0,693 | 2,33 | 0,2974 |
| Kalsium (Ca) | 1,367 | 1,55 | 0,8819 |
| Besi (Fe) | 0,726 | 7,86 | 0,0923 |
| Oksigen (O) | 11,127 | 1,14 | 9,7605 |
| Karbon (C) | 15,507 | 2,26 | 6,8615 |



Tabel 4.3 Data Hasil Komposisi EDAX *Al-Foam* untuk Variasi III (850 °C)

| Elemen | Berat (%) | ρ (gr/cm³) | %/ρ |
|----------------|------------------|--|----------------------------|
| Aluminum (Al) | 55,51 | 2,7 | 20,5592 |
| Magnesium (Mg) | 3,75 | 1,74 | 2,1552 |
| Silikon (Si) | 1,11 | 2,33 | 0,4764 |
| Kalsium (Ca) | 2,519 | 1,55 | 1,6251 |
| Besi (Fe) | 2,108 | 7,86 | 0,2682 |
| Oksigen (O) | 21,155 | 1,14 | 18,557 |
| Karbon (C) | 13,848 | 2,26 | 6,1274 |

Dari data hasil pengujian EDAX yang ditampilkan tabel diatas, kemudian dilakukan perhitungan *true density*. Perhitungan *true density* menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\rho_{th} = \frac{100}{\left(\left(\%Al / \rho_{Al} \right) + \left(\%Cu / \rho_{Cu} \right) + \left(\%Fe / \rho_{Fe} \right) + etc. \right)} \quad (4-1)$$

Keterangan :

- ρ_{th} = *True density* (gr/cm³)
 ρ_{Al} , ρ_{Cu} , ρ_{Fe} , *etc* = Densitas unsur (gr/cm³)
 %Al, %Cu, *etc* = Persentase berat unsur (%)

Tabel 4.4 Data Hasil Perhitungan *True Density*

| Variasi Casting Temperature | 750 °C | 800 °C | 850 °C |
|---|---------------|---------------|---------------|
| <i>True Density</i> (gr/cm ³) | 1,8456 | 2,2519 | 2,0093 |

Contoh perhitungan *True Density* variasi 750 °C :

$$\rho_{th} = \frac{100}{\left(\left(\%Al / \rho_{Al} \right) + \left(\%Cu / \rho_{Cu} \right) + \left(\%Fe / \rho_{Fe} \right) + etc. \right)}$$

$$\rho_{th} = \frac{100}{\left\{ \left(\frac{41,82}{2,7} \right) + \left(\frac{2,81}{1,74} \right) + \left(\frac{0,7}{2,33} \right) + \left(\frac{1,241}{1,55} \right) + \right. \\ \left. \left(\frac{1,903}{7,86} \right) + \left(\frac{29,804}{1,14} \right) + \left(\frac{21,672}{2,26} \right) \right\}}$$

$$\rho_{th} = 1,8456 \text{ gr/cm}^3$$

4.1.2 Data Hasil Pengujian *Apparent Density* Spesimen Aluminium Foam



Gambar 4.1 Alat pengujian *apparent density* dengan metode piknometri

Nilai *apparent density* diperoleh dengan menggunakan metode piknometri dimana membandingkan berat spesimen di udara dengan di dalam air. Penimbangan berat spesimen di dalam air dilakukan setelah penimbangan berat di udara terlebih dahulu. Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk memperoleh *apparent density* dengan metode piknometri:

$$\rho_s = \rho_w \frac{W_s}{W_s - (W_{sb} - W_b)} \quad (4-2)$$

Keterangan :

- ρ_s = Apparent density (gr/cm³)
- ρ_{th} = True density (gr/cm³)
- ρ_w = Densitas air (gr/cm³)
- W_s = Berat sampel di udara (gr).
- W_b = Berat keranjang di dalam air (gr).
- W_{sb} = Berat sampel dan keranjang di dalam air (gr).

Tabel 4.5 Data Hasil Perhitungan *Apparent Density*

| Variasi Casting Temperature | Pengulangan | W_s (gr) | W_b (gr) | W_{sb} (gr) | ρ_s (gr/cm³) |
|------------------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--|
| 750 °C | 1 | 17,36 | 44,44 | 41,47 | 0,85 |
| | 2 | 12,43 | 44,44 | 41,05 | 0,79 |
| | 3 | 10,48 | 44,44 | 41,83 | 0,80 |
| 800 °C | 1 | 11,53 | 44,44 | 40,39 | 0,74 |
| | 2 | 12,65 | 44,44 | 41,42 | 0,81 |
| | 3 | 11,82 | 44,44 | 42,20 | 0,84 |
| 850 °C | 1 | 13,86 | 44,44 | 40,70 | 0,79 |
| | 2 | 6,63 | 44,44 | 39,98 | 0,60 |
| | 3 | 8,01 | 44,44 | 39,59 | 0,62 |

Contoh perhitungan *apparent density* untuk variasi 750 °C pengulangan ke-1 :

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

$$\rho_s = 1 \times \frac{17,36}{17,36 - (41,47 - 44,44)}$$

$$\rho_s = 0,85 \text{ gr/cm}_3$$

4.1.3 Perhitungan Porositas Spesimen *Aluminium Foam*

Dari data yang didapat pada tabel 4.4 dan 4.5, porositas dari spesimen *aluminium foam* dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$\%P = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}} \times 100\% \quad (4-3)$$

Keterangan :

$\%P$ = Prosentase porositas (%)

ρ_s = *Apparent density* (gr/cm³)

ρ_{th} = *True density* (gr/cm³)

Tabel 4.6 Data Hasil Perhitungan Porositas Spesimen *Aluminium Foam*

| Variasi Casting Temperature | Pengulangan | Porositas (%) | Rata - Rata |
|------------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| 750 °C | 1 | 57,73 | |
| | 2 | 57,43 | 55,93 |
| | 3 | 56,62 | |
| 800 °C | 1 | 67,14 | |
| | 2 | 64,15 | 64,65 |
| | 3 | 62,67 | |
| 850 °C | 1 | 60,81 | |
| | 2 | 70,25 | 66,68 |
| | 3 | 69,00 | |

Contoh perhitungan porositas untuk variasi 750 °C pengulangan ke – 1 :

$$\%P = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}}\right) \times 100\%$$

$$\%P = \left(1 - \frac{0,8539}{1,8456}\right) \times 100\%$$

$$\%P = 53,7321 \%$$

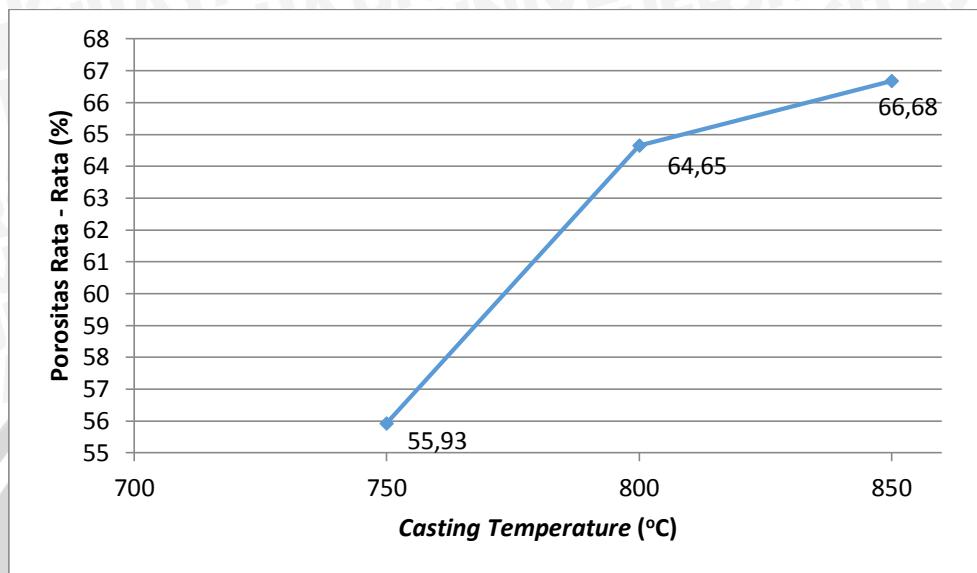
Tabel 4.7 Data perhitungan statistik hasil pengujian porositas *aluminium foam*

| Variasi Casting Temperature | P | \bar{P} | $P - \bar{P}$ | Standar Deviasi (δ) |
|------------------------------------|----------|-----------------------------|---------------------------------|--|
| Variasi I (750 °C) | 57,73 | | -2,19 | |
| | 57,43 | 55,93 | 1,50 | 1,94 |
| | 56,62 | | 0,69 | |
| Variasi II (800 °C) | 67,14 | | 2,48 | |
| | 64,15 | 64,65 | -0,50 | 2,28 |
| | 62,67 | | -1,98 | |
| Variasi III (850 °C) | 60,81 | | -5,88 | |
| | 70,25 | 66,68 | 3,56 | 5,13 |
| | 69,00 | | 2,32 | |

Contoh perhitungan statistik hasil pengujian porositas untuk variasi 750°C :

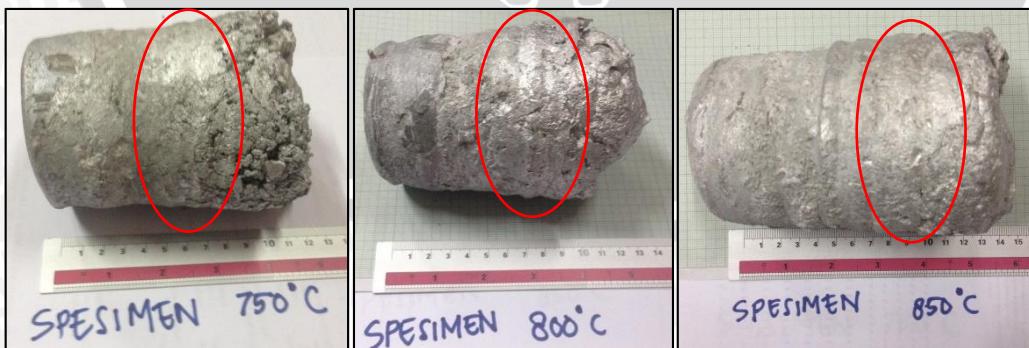
$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(P - \bar{P})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{7,5485}{2}} = 1,94$$

4.1.4 Pembahasan Hasil Pengujian Porositas



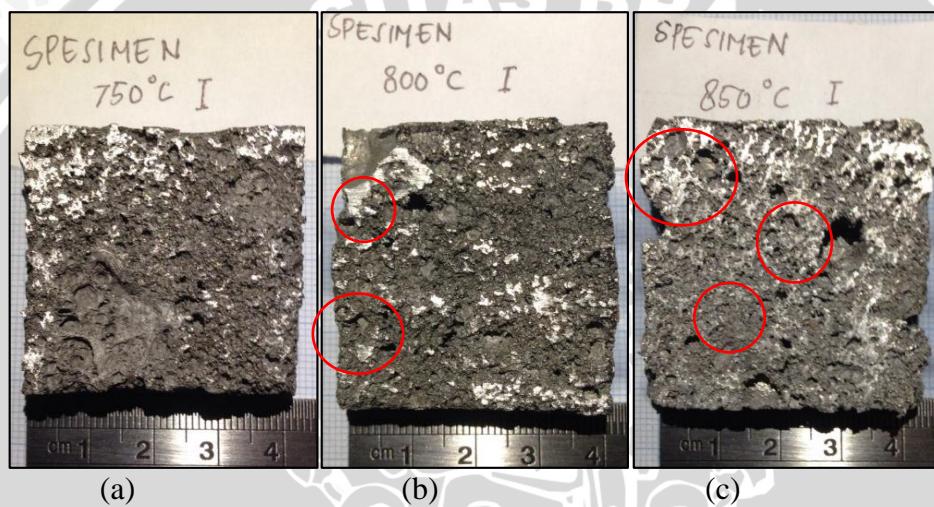
Gambar 4.2 Grafik pengaruh variasi *casting temperature* terhadap porositas rata- rata *aluminium foam*

Gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara *casting temperature* dengan porositas rata – rata pada spesimen *aluminium foam*. Seiring dengan meningkatnya *casting temperature*, porositas dari *aluminiuam foam* juga meningkat. Nilai porositas terendah pada variasi temperatur 750 °C sebesar 55,93 %, dilanjutkan dengan nilai porositas sebesar 64,65 % pada variasi 800 °C dan untuk nilai porositas tertinggi pada variasi temperatur 850 °C sebesar 66,68 %.

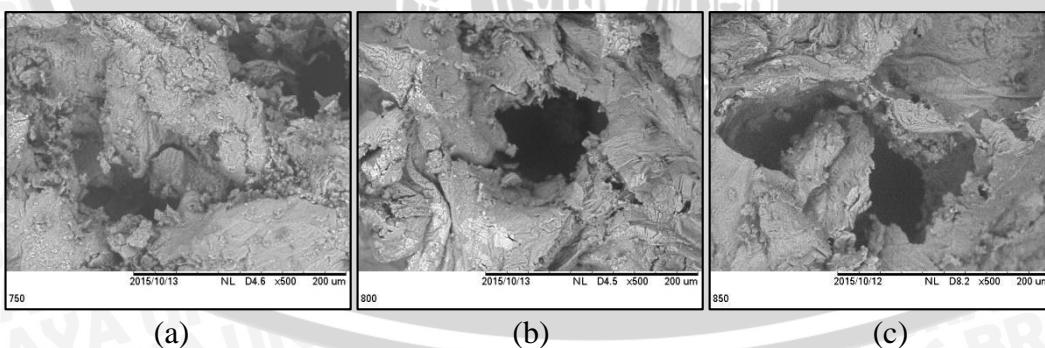


Gambar 4.3 Foto produk *aluminium foam* dengan variasi *casting temperature*

Pada gambar 4.3 merupakan foto produk *aluminium foam* yang akan dijadikan spesimen pengujian. Foto paling kiri dengan panjang ± 12 cm merupakan produk dengan variasi pertama (750°C) diikuti oleh variasi kedua (800°C) dengan panjang ± 13 cm dan yang paling kanan variasi ketiga (850°C) dengan panjang ± 14 cm. Terlihat bahwa pada produk dengan variasi ketiga memiliki panjang produk yang lebih panjang jika dibandingkan dengan produk variasi yang lain. Ini menunjukkan hasil dari proses foaming yang dialami oleh produk dengan variasi ketiga lebih baik. Selain itu pada variasi pertama bagian atas terdapat gumpalan – gumpalan aluminium yang tidak menyatu dengan produk. Ini juga ditemukan pada variasi kedua namun lebih sedikit.



Gambar 4.4 Foto makro spesimen *aluminium foam* dengan variasi *casting temperature* (a) 750°C (b) 800°C (c) 850°C



Gambar 4.5 Hasil foto SEM spesimen *aluminium foam* dengan variasi *casting temperature* (a) 750°C (b) 800°C dan (c) 850°C

Gambar 4.4 menunjukkan penampang produk *aluminium foam* yang sudah dipotong menurut ukuran spesimen untuk pengujian. Dapat dilihat bahwa pada spesimen pertama (750°C), ukuran pori yang terbentuk mayoritas kecil, sehingga prosentase porositas yang

dihasilkan relatif lebih kecil. Berbeda dengan spesimen kedua (800°C) dan spesimen ketiga (850°C), dimana terdapat beberapa pori dengan ukuran yang lebih besar. Namun pada spesimen ketiga pori dengan ukuran yang lebih besar jumlahnya lebih banyak dibandingkan dengan spesimen kedua. Hasil foto SEM pada gambar 4.5 juga menunjukkan permukaan spesimen variasi 750°C memiliki ukuran pori yang lebih kecil dibandingkan dengan spesimen variasi 800°C dan 850°C .

Hal ini sesuai dengan hipotesa dimana semakin tinggi *casting temperature* yang digunakan, semakin tinggi pula porositas yang didapatkan. Hal ini dikarenakan karbon dioksida (CO_2) yang terbentuk dari dekomposisi kalsium karbonat (CaCO_3) semakin banyak seiring dengan temperatur yang meningkat, sehingga pori yang terbentuk juga semakin banyak.

4.2 Pengujian Daya Listrik

4.2.1 Data Hasil Pengujian Daya Listrik

Untuk pengujian dari daya listrik yang dihasilkan dari *aluminium air-battery* menggunakan multimeter. Ada dua jenis data yang diambil untuk perhitungan daya listrik, yaitu tegangan dan arus. Dimana kedua jenis data tersebut diambil tiap 5 menit setelah pemberian larutan NaCl 2 M.

Tabel 4.8 Data hasil pengujian voltase *aluminium air-battery*

| t (menit) | Voltase (mV) | | | | | | | | |
|--------------------|--------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 750°C | | | 800°C | | | 850°C | | |
| | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| | 57,73 | 57,43 | 56,62 | 67,14 | 64,15 | 62,67 | 60,81 | 70,25 | 69,00 |
| 0 | 380 | 606 | 604 | 650 | 633 | 650 | 622 | 731 | 618 |
| 5 | 501 | 574 | 599 | 630 | 629 | 632 | 635 | 645 | 616 |
| 10 | 560 | 546 | 598 | 654 | 629 | 626 | 633 | 628 | 619 |
| 15 | 569 | 605 | 603 | 603 | 628 | 625 | 649 | 633 | 628 |
| 20 | 528 | 606 | 606 | 601 | 627 | 625 | 711 | 684 | 697 |
| 25 | 537 | 608 | 605 | 666 | 629 | 624 | 767 | 739 | 782 |
| 30 | 507 | 578 | 601 | 696 | 630 | 632 | 797 | 780 | 831 |
| 35 | 531 | 564 | 597 | 671 | 645 | 623 | 812 | 602 | 853 |
| 40 | 534 | 565 | 597 | 653 | 653 | 624 | 819 | 598 | 873 |
| 45 | 536 | 558 | 598 | 635 | 659 | 624 | 821 | 609 | 874 |
| 50 | 537 | 555 | 600 | 628 | 664 | 626 | 811 | 884 | 869 |
| 55 | 536 | 549 | 601 | 625 | 666 | 633 | 804 | 891 | 851 |
| 60 | 537 | 524 | 604 | 624 | 668 | 638 | 792 | 977 | 616 |
| Rata - rata | 565,23 | | | 637,64 | | | 737,21 | | |



Untuk perhitungan statistik dari data hasil pengujian voltase sebagai berikut :

Tabel 4.9 Perhitungan statistik hasil pengujian voltase *aluminium air-battery*

| Variasi Casting Temperature | \bar{V} | Standar Deviasi ($\bar{\delta}$) |
|-----------------------------|-----------|------------------------------------|
| Variasi I (750 °C) | 565,23 | 44,64 |
| Variasi II (800 °C) | 637,64 | 19,54 |
| Variasi III (850 °C) | 737,21 | 104,36 |

Contoh perhitungan statistik hasil pengujian voltase untuk variasi 750°C :

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(V - \bar{V})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{75718,92}{38}} = 44,64$$

Tabel 4.10 Data hasil pengujian arus *aluminium air-battery*

| t (menit) | Arus (mA) | | | | | | | | |
|--------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 750°C | | | 800°C | | | 850°C | | |
| | I | II | III | I | II | III | I | I | III |
| | 59,61 | 63,16 | 52,96 | 62,14 | 60,11 | 65,05 | 60,50 | 65,60 | 63,07 |
| 0 | 45,0 | 30,1 | 71,6 | 83,1 | 95,2 | 79,2 | 59,8 | 55,6 | 95,5 |
| 5 | 28,8 | 35,6 | 70,9 | 63,4 | 92,8 | 48,3 | 48,7 | 52,5 | 95,8 |
| 10 | 25,8 | 35,2 | 62,9 | 59,1 | 88,3 | 41,4 | 45,6 | 51,7 | 80,3 |
| 15 | 24,3 | 33,3 | 58,0 | 48,1 | 84,8 | 38,7 | 37,5 | 50,3 | 74,7 |
| 20 | 23,7 | 31,0 | 55,1 | 44,2 | 80,4 | 25,3 | 32,4 | 47,6 | 70,8 |
| 25 | 22,8 | 29,4 | 53,2 | 38,1 | 77,2 | 24,1 | 27,6 | 46,3 | 67,8 |
| 30 | 22,2 | 28,3 | 51,9 | 37,6 | 74,7 | 22,2 | 26,1 | 44,4 | 64,6 |
| 35 | 21,9 | 27,5 | 50,7 | 36,0 | 71,5 | 20,7 | 24,3 | 42,9 | 63,6 |
| 40 | 21,3 | 26,7 | 51,0 | 34,2 | 69,8 | 22,4 | 23,1 | 44,8 | 64,8 |
| 45 | 20,4 | 25,2 | 50,5 | 32,3 | 68,6 | 21,3 | 23,8 | 55,4 | 60,6 |
| 50 | 20,4 | 24,7 | 48,9 | 31,2 | 67,7 | 20,1 | 23,5 | 58,7 | 58,4 |
| 55 | 19,8 | 24,2 | 48,3 | 30,8 | 66,8 | 22,4 | 22,9 | 57,5 | 57,3 |
| 60 | 19,2 | 23,8 | 47,4 | 30,2 | 66,0 | 21,2 | 22,3 | 54,2 | 56,1 |
| Rata - rata | 36,18 | | | 50,76 | | | 51,02 | | |



Tabel 4.11 Perhitungan statistik hasil pengujian arus *aluminium air-battery*

| Variasi Casting Temperature | \bar{V} | Standar Deviasi (δ) |
|-----------------------------|-----------|------------------------------|
| Variasi I (750 °C) | 36,18 | 15,31 |
| Variasi II (800 °C) | 50,76 | 24,32 |
| Variasi III (850 °C) | 51,02 | 18,90 |

Contoh perhitungan statistik hasil pengujian arus untuk variasi 750°C :

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(P - \bar{P})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{8902,12}{38}} = 15,31$$

4.2.2 Perhitungan Daya Listrik Spesimen *Aluminium Air-Battery*

Dari tabel 4.7 dan 4.8 daya listrik yang dihasilkan dari *aluminium air-battery* dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$P = V \cdot I \quad (4-4)$$

Keterangan :

P = Daya listrik (W)

V = Voltase (V)

I = Arus listrik(A)

Tabel 4.12 Data hasil perhitungan daya listrik *aluminium air-battery*

| Variasi | Porositas Rata – Rata (%) | Voltase Rata – Rata (mV) | Arus Rata – Rata (mA) | Daya Listrik (W) |
|---------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|
| 750°C | 55,93 | 565,23 | 36,18 | 20,45 |
| 800°C | 64,65 | 637,64 | 50,76 | 32,37 |
| 850°C | 66,68 | 737,21 | 51,02 | 37,61 |

Contoh perhitungan daya listrik untuk variasi 750°C :

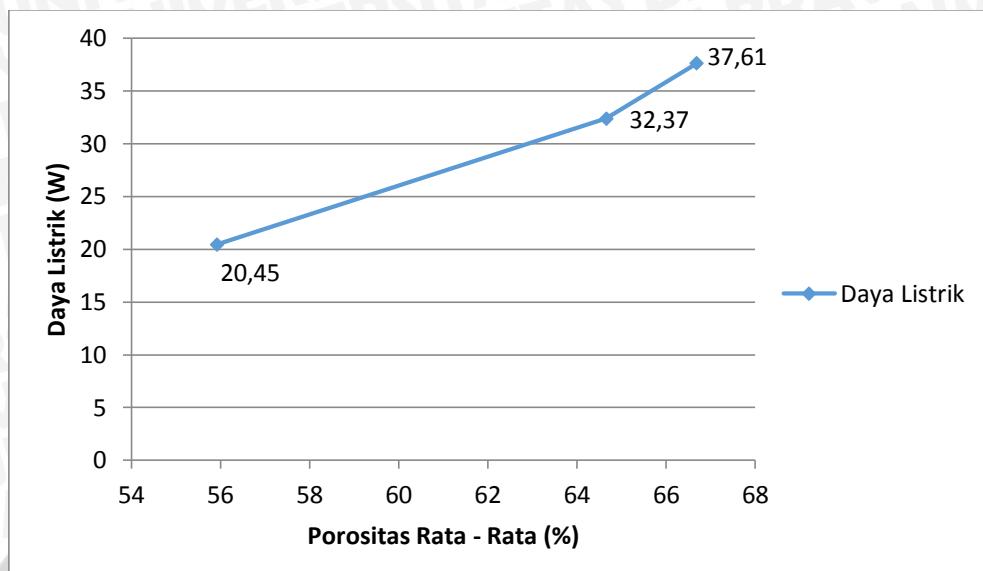
$$P = V \cdot I$$

$$P = 565,23 \cdot 36,18$$

$$P = 20449,76 \text{ mW} = 20,45 \text{ W}$$

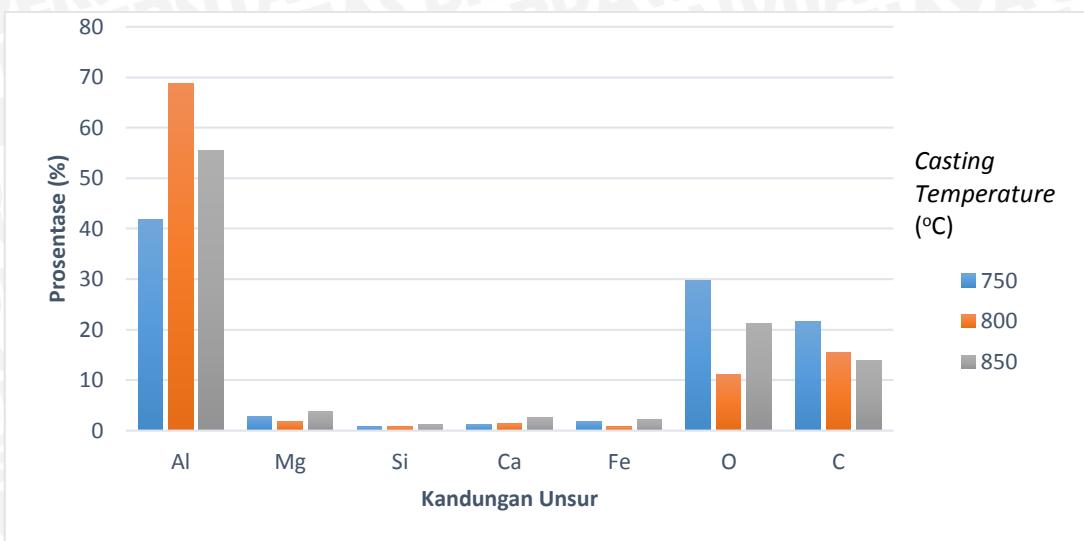


4.2.3 Pembahasan Hasil Pengujian Daya Listrik



Gambar 4.6 Grafik hubungan antara porositas rata – rata dengan daya listrik yang dihasilkan *aluminium air-battery*

Gambar 4.3 menunjukkan hubungan antara porositas rata – rata dengan daya listrik yang dihasilkan *aluminium air-battery* yang menggunakan *aluminium foam* sebagai elektroda. Pada grafik dapat dilihat bahwa semakin tinggi porositas *aluminium foam* sebagai anoda yang digunakan semakin tinggi pula daya listrik yang dapat dihasilkan. Daya listrik paling rendah dihasilkan dari *aluminium foam* dengan porositas 55,93% sebesar 20,45 mW, dan daya listrik paling tinggi dihasilkan dari *aluminium foam* dengan porositas 64,65% sebesar 37,61 mW. Hal ini disebabkan reaksi yang terjadi untuk menghasilkan listrik semakin efisien, dimana reaksi yang terjadi merupakan reaksi kimia. Laju reaksi kimia dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti, temperatur, konsentrasi, katalisator dan luas permukaan sentuh.



Gambar 4.7 Kandungan unsur pada elektroda *aluminium air–battery*

Kandungan unsur pada elektroda yang digunakan dalam *aluminium air–battery* dapat dilihat pada gambar 4.4. Dapat dilihat pada unsur aluminium mengalami peningkatan kandungan dari 41,829% pada variasi 750°C ke 68,76% pada variasi 800°C. Kenaikan unsur aluminium ini yang mengakibatkan daya listrik yang dihasilkan mengalami peningkatan, dimana reaksi dari aluminium semakin banyak terjadi. Sedangkan pada variasi 850°C dimana terjadi penurunan kandungan unsur aluminium namun mengalami kenaikan daya listrik. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh naiknya kandungan unsur lain seperti kalsium, magnesium dan oksigen. Unsur – unsur tersebut dapat mempengaruhi reaksi yang terjadi. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Irawan dkk. dimana menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 1103 mV pada porositas 22% sedikit berbeda, dikarenakan kandungan dari *aluminium foam* pada anoda yang digunakan berbeda. Dimana kandungan aluminium dari Irawan dkk. mencapai 91,19% pada tegangan tertingginya, sedangkan pada penelitian ini tegangan tertinggi yang mampu dicapai sebesar 977 mV dengan porositas 65,60% dan kadar aluminium 55,51%.

Pada pengujian ini faktor yang berpengaruh adalah luas permukaan sentuh antara profil permukaan berpori pada spesimen dengan kapas yang sudah dibasahi oleh natrium klorida. Semakin banyak pori yang terbentuk pada permukaan spesimen semakin luas permukaan sentuh. Dengan luasnya permukaan spesimen, elektron yang mampu diterima oleh spesimen menjadi lebih banyak, sehingga reaksi kimia dapat berjalan lebih efektif dan meningkatkan daya listrik yang dihasilkan. Selain dari luas permukaan sentuh, kandungan unsur pada *aluminium foam* sebagai anoda juga memiliki pengaruh pada reaksi sehingga berakibat daya listrik dari *aluminium air battery*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pengujian porositas dan daya listrik *aluminium foam* sebagai anoda dalam *aluminium air-battery* menghasilkan beberapa kesimpulan. Kesimpulan tersebut antara lain :

1. *Casting temperature* memiliki pengaruh pada prosentase porositas *aluminium foam*. Naiknya *casting temperature* menyebabkan reaksi dekomposisi dari *blowing agent* semakin cepat sehingga prosentase porositas semakin tinggi, yaitu sebesar 55,93% pada variasi 750°C, 64,65% pada variasi 800°C dan 66,68% pada variasi 850°C.
2. Ditunjukkan dari peningkatan pada porositas yang diikuti dengan meningkatnya daya listrik, yaitu 20,45 W pada porositas 55,93%, 32,37 W pada porositas 64,65% dan 37,61 W pada porositas 66,68%. Daya listrik yang dibangkitkan *aluminium air-battery* dipengaruhi oleh porositas dari *aluminium foam* sebagai anoda.
3. Kandungan unsur dari *aluminium foam* sebagai anoda pada *aluminium air-battery* juga berpengaruh pada daya listrik. Dimana unsur – unsur tersebut ikut bereaksi saat reaksi *aluminium air-battery* terjadi.

5.2 Saran

Untuk penelitian – penelitian selanjutnya mengenai *aluminium foam*, penulis memberikan saran antara lain :

1. Parameter – parameter yang dapat mempengaruhi hasil pori dari *aluminium foam*, hendaknya diperhatikan dengan seksama. Parameter yang dimaksudkan antara lain proses pengadukan, *blowing agent*, temperatur dan waktu *holding* spesimen. Hal ini dikarenakan dapat mempengaruhi ukuran dan distribusi pori dari *aluminium foam*.
2. Mencoba dengan metode pembuatan *aluminium* lain yang lain, seperti teknik *space holder* dan *direct foaming with gas*. Metode – metode tersebut dapat membentuk pori dengan ukuran dan distribusi yang lebih dapat dikontrol.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR PUSTAKA

- Agustian, W. I. 2013. *Pengaruh Kadar Magnesium Terhadap Ketangguhan Alumunium Alloy Foam Yang Menggunakan CaCO₃ Sebagai Blowing Agent Dengan Uji Impak dan Foto Mikro*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Banhart, J. 2001. *Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams*. Progress in Materials Science. 46 (2001): 559–632.
- Bray, E.L. 2009. *US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2009*, p 29.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bauxite/mcs-2009-bauxi.pdf>. Diakses pada 14 April 2015.
- China Bei Hai Building Material, Co. Ltd. 2010. *Properties of Aluminium Foam*. <http://www.chinabeihai.net/ProductList.Asp?SortID=19>. Diakses pada Oktober 2015.
- Irawan, Y.S., Akhyari, K.B., Oerbandono, T. 2015. *Porosity and Specific Compressive Strength of Aluminium 6061 Foam Produced by Metal Casting with CaCO₃ Powder as Blowing Agent*. Proceedring of The 5th Annual Basic Science International Conference, February 11 – 12, 2015, Ed. Lukman Hakim, Malang
- Egan, D.R., Ponce de León, C., Wood, R.J.K., Stokes, K.R., Walsh, F.C. 2013. *Developments in electrode materials and electrolytes for aluminium air batteries*. Journal of Power Source 236. Elsevier 2013. 293-310
- Fan, L. & Lu, H. 2015. *The Effect of Grain Size on Aluminium Anodes for Al Air Batteries in Alkaline Electrolytes*. Journal of Power Sources 284. Elsevier 2015. 409-415
- Gladysz, G.M. & Chawla, K. K. 2014. *Voids In Materials*. Elsevier 2015
- Goodall, R. 2013. *Advance in Powder Metallurgy : Properties, Processing and Application* (eds. I. Chang and Y. Zhao). United Kingdom. Woodhead Publishing Limited 2013. 273-307
- Hamlen, R.P. & Atwater, T.B. 2001. *Handbook of Batteries 3rd Edition* (eds. D. Linden and T. Reddy), McGraw-Hill, New York. 38-44
- Irawan, Y.S., Halim, R.P., Widodo, A.S. 2015. Pengaruh Penambahan Blowing Agent CaCO₃ terhadap Porositas dan Tegangan Listrik pada A6061 Foam sebagai Air Electrode dalam Al-Air Battery. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi, ISSN 2407-4845
- Gawdzinska, K., Grabian, J., Gucma, M., Kwiecinska, B. 2015. *Deformation Mechanism in Metal Composite Foams*. Metalurgija 56 2015, ISSN 0543-5846
- Lázaro, J., Solórzano, E., Rodríguez-Pérez, M.A. 2013. *Alternative Carbonates to Produce Aluminium Foams via Melt Route*. 8th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams, Metfoam 2013



Lefebvre, L.P., Banhart, J., Dunand, D. 2008. *Porous Metals and Metallic Foams.* Metfoam 2007 (*Preface*). Amerika Serikat. DEStech Publication 2008

Liu, P.S. & Chen, G.F. 2014. *Porous Materials Processing and Applications.* United Kingdom: Butterworth-Heinemann

M. Malekjafarian, S.K. Sadrnezhaad, M.S. Abravi, M. Golestanipour, H. Amini Mashhadi 2011 *Manufacturing Aluminium Foams by Melt Gas Injection Process.* 7th International Conference on Porous Metals and Metallic Foam: Iran 195-201

Ma, J., Wen, J., Gao, J., Li, Q. 2014. *Performance of Al – 1Mg – 1Zn – 0,1Ga – 0,1Sn as Anode for Al-Air Battery.* Electrochimica Acta 129. Elsevier 2014. 69-75

TALAT. 1994. *Aluminium : Physical Properties, Characteristics and Alloy.* TALAT 1501. Eropa. European Aluminium Association (EAA)

Walker, J. 2014. *Fundamental of Physics 10th edition (eds. Halliday D. & Resnick R.).* Amerika Serikat. John Wiley & Sons.



LAMPIRAN

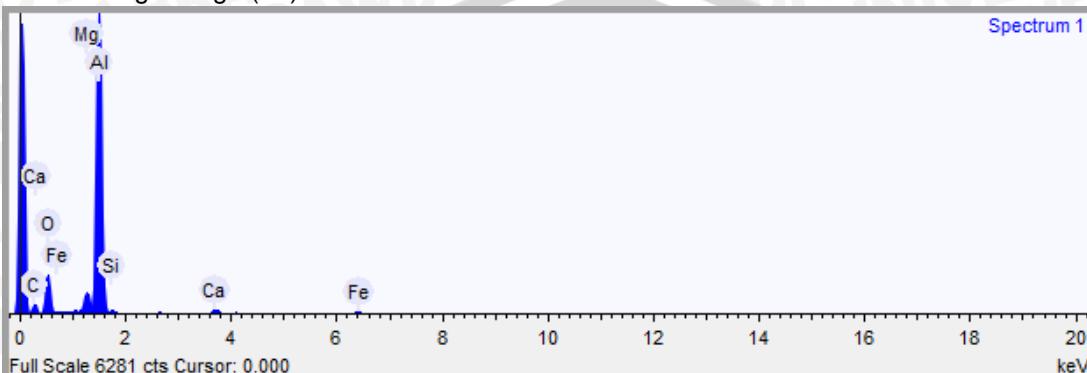
Hasil Uji Komposisi SEM EDAX spesimen 750°C

Spectrum details

Project 750°C Spectrum name Spectrum 1

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 100.0 Process time 4
Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method All elements (normalised)

Coating element None

Summary results

| Element | Weight % | Weight % σ | Atomic % |
|-----------|----------|------------|----------|
| Carbon | 21.672 | 0.878 | 33.262 |
| Oxygen | 29.804 | 0.573 | 34.340 |
| Magnesium | 2.851 | 0.111 | 2.162 |
| Aluminum | 41.829 | 0.569 | 28.578 |
| Silicon | 0.700 | 0.081 | 0.459 |
| Calcium | 1.241 | 0.089 | 0.571 |
| Iron | 1.903 | 0.193 | 0.628 |

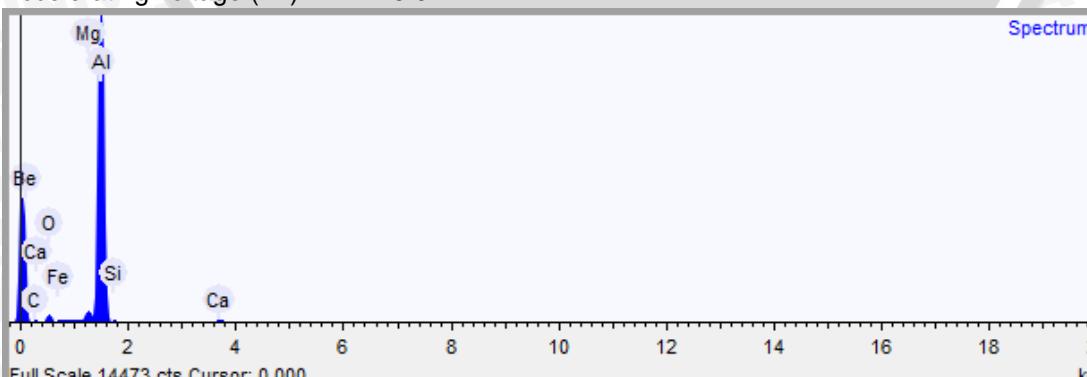
Hasil Uji Komposisi SEM EDAX spesimen 800°C

Spectrum details

Project 800°C Spectrum name Spectrum 1

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 100.0 Process time 4
Accelerating voltage (kV) 15.0



Quantification Settings

Quantification method

All elements (normalised)

Coating element

None

Summary results

| Element | Weight % | Weight % σ | Atomic % |
|-----------|----------|------------|----------|
| Carbon | 15.507 | 0.917 | 27.577 |
| Oxygen | 11.127 | 0.408 | 14.856 |
| Magnesium | 1.821 | 0.084 | 1.600 |
| Aluminum | 68.760 | 0.820 | 54.434 |
| Silicon | 0.693 | 0.088 | 0.527 |
| Calcium | 1.367 | 0.088 | 0.728 |
| Iron | 0.726 | 0.158 | 0.278 |

Hasil Uji Komposisi SEM EDAX 850°C

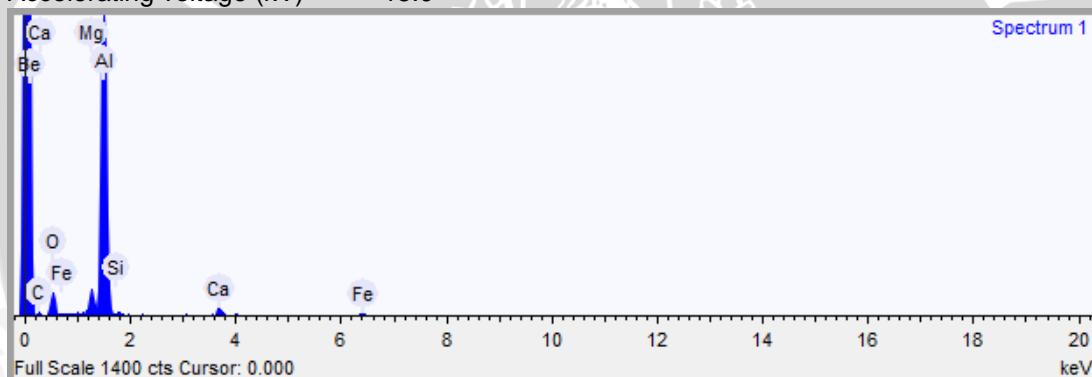
Spectrum details

Project 850°C Spectrum name Spectrum 1

Acquisition conditions

Acquisition time (s) 100.0 Process time 4

Accelerating voltage (kV) 15.0

**Quantification Settings**

Quantification method

All elements (normalised)

Coating element

None

Summary results

| Element | Weight % | Weight % σ | Atomic % |
|-----------|----------|------------|----------|
| Carbon | 13.848 | 2.153 | 23.886 |
| Oxygen | 21.155 | 1.280 | 27.394 |
| Magnesium | 3.750 | 0.296 | 3.196 |
| Aluminum | 55.510 | 1.683 | 42.622 |
| Silicon | 1.110 | 0.256 | 0.819 |
| Calcium | 2.519 | 0.278 | 1.302 |
| Iron | 2.108 | 0.558 | 0.782 |

Dokumentasi selama kegiatan penelitian

