

**TUGAS AKHIR – TL184834**

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA *ARTIFICIAL AGING* TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* MENGGUNAKAN *SPACE HOLDER NaCl***

**MUHAMAD ZAKI RAMADHAN**  
NRP. 02511840000028

Dosen Pembimbing  
**Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.**  
NIP. 198405152014042003  
**Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
NIP. 197708172005011001

**Program Studi Teknik Material**  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022





**TUGAS AKHIR – TL184834**

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA *ARTIFICIAL AGING* TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* MENGGUNAKAN *SPACE HOLDER NaCl***

**MUHAMAD ZAKI RAMADHAN**  
NRP. 0251184000028

Dosen Pembimbing  
**Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.**  
NIP. 198405152014042003  
**Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
NIP. 197708172005011001

**Program Studi Teknik Material**  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT – TL184834**

**THE EFFECT OF HOLDING TIME VARIATIONS ON  
ARTIFICIAL AGING ON PHYSICAL AND MECHANICAL  
CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si FOAM USING SPACE  
HOLDER NaCl**

**MUHAMAD ZAKI RAMADHAN**  
NRP. 0251184000028

Advisor  
**Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.**  
NIP. 198405152014042003  
**Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
NIP. 197708172005011001

**Study Program of Materials Engineering**  
Departement of Materials and Metallurgical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022

*(This page is intentionally blank)*

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA *ARTIFICIAL AGING* TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* MENGUNAKAN *SPACE HOLDER* NaCl

#### TUGAS AKHIR

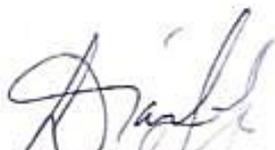
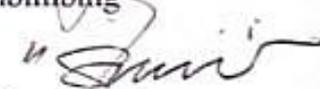
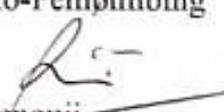
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Teknik Material  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **MUHAMAD ZAKI RAMADHAN**  
NRP. 0251184000028

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.
2. Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.
3. Yuli Setiyorini, S.T., M.Phil., Ph.D.Eng.
4. Haniffudin Nurdiasyah, S.T., M.T.



  
Pembimbing  
  
Ko-Pembimbing  
  
Penguji  
  
Penguji

**SURABAYA**  
**Juli, 2022**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## APPROVAL SHEET

### THE EFFECT OF HOLDING TIME VARIATIONS ON ARTIFICIAL AGING ON PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si FOAM USING SPACE HOLDER NaCl

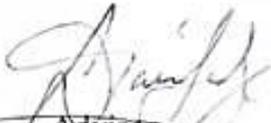
#### FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree of bachelor of engineering at  
Undergraduate Study Program of Materials Engineering  
Departement of Materials and Metallurgical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : MUHAMAD ZAKI RAMADHAN  
NRP. 025118000028

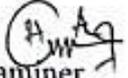
Approved by Final Project Examiner Team :

1. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.
2. Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.
3. Yuli Setiyorini, S.T., M.Phil., Ph.D.Eng.
4. Haniffudin Nurdiansyah, S.T., M.T.

  
Advisor

  
Co-Advisor

  
Examiner

  
Examiner



SURABAYA  
July, 2022

*(This page is intentionally blank)*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Muhamad Zaki Ramadhan/0251184000028  
Departemen : Teknik Material  
Dosen Pembimbing/NIP : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc./  
198405152014042003

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA *ARTIFICIAL AGING* TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* MENGGUNAKAN *SPACE HOLDER NaCl*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

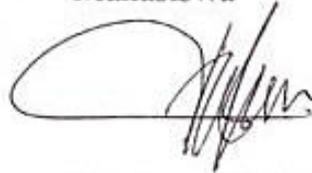
Surabaya, 14 Juli 2022

Mengetahui  
Dosen Pembimbing



(Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.)  
NIP. 198405152014042003

Mahasiswa



(Muhamad Zaki Ramadhan)  
NRP.0251184000028

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : Muhamad Zaki Ramadhan/0251184000028  
Departement : Material Engineering  
Advisor/NIP : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc./  
198405152014042003

Hereby declare that the Final Project with the title of "THE EFFECT OF HOLDING TIME VARIATIONS ON ARTIFICIAL AGING ON PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si FOAM USING SPACE HOLDER NaCl" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing..

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

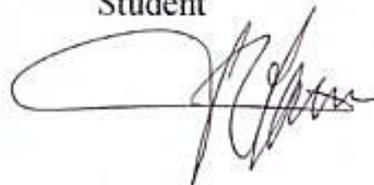
Surabaya, 14<sup>th</sup> July 2022

Acknowledged  
Advisor



(Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.)  
NIP. 198405152014042003

Student



(Muhamad Zaki Ramadhan)  
NRP. 0251184000028

*(This page is intentionally blank)*

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA *ARTIFICIAL AGING* TERHADAP  
KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM*  
MENGUNAKAN *SPACE HOLDER* NaCl**

**Nama Mahasiswa / NRP** : Muhamad Zaki Ramadhan/0251184000028  
**Departemen** : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
**Dosen Pembimbing 1** : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.  
**Dosen Pembimbing 2** : Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.

**Abstrak**

*Metal foam* telah dikembangkan dan semakin banyak digunakan sebagai bahan rekayasa baru. Salah satu logam yang sering digunakan sebagai *metal foam* adalah aluminium. Aluminium *foam* memiliki sifat yang ringan, baik terhadap benturan, getaran dan penyerapan suara. Sifat mekanik Aluminium *foam* dapat ditingkatkan dengan perlakuan panas yang sesuai seperti *precipitation hardening*. Salah satu aplikasi yang bisa digunakan pada aluminium *foam* adalah sebagai *filler* pada *crash box* karena sifatnya yang mampu meredam energi kinetik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *holding time* yang digunakan pada *artificial aging* pada paduan Al-Mg-Si *foam* sebagai aplikasi dari *filler* pada *crash box*. Paduan Al-Mg-Si digunakan sebagai bahan utama dengan digunakannya *space holder* NaCl yang berukuran 2,83 – 4,86 mm sebanyak 60 dari volume yang digunakan sebagai pembentuk *foam*. Paduan Al-Mg-Si dileburkan hingga temperatur 750°C dan dituang ke dalam cetakan berisi NaCl yang telah dilakukan *pre-heating* hingga temperatur 750°C. *Leaching* dilakukan untuk menghilangkan NaCl yang terkandung di dalam aluminium *foam* menggunakan air dengan temperatur 90°C. Perlakuan panas solution treatment dilakukan pada 530 °C dengan *holding time* 100 menit dan didinginkan cepat menggunakan media udara. Langkah selanjutnya dilakukan *artificial aging* pada temperatur 165 °C dengan variasi *holding time* selama 5 jam, 6 jam, dan 7 jam. Spesimen dilakukan pengujian densitas, pengamatan mikroskop stereo, SEM-EDX, uji XRD, uji kekerasan, uji impak, dan uji kompresi untuk melihat pengaruh dari *heat treatment* yang dilakukan terhadap karakter fisik dan mekanik dari aluminium *foam*. Hasil dari pengujian XRD, terdeteksi adanya Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk setelah dilakukannya *heat treatment*. Berdasarkan pengamatan melalui SEM-EDX, unsur Mg dan Si terbentuk untuk masing-masing spesimen yang dilakukan *heat treatment*. Perbedaan *holding time* pada *aging* menunjukkan adanya perbedaan Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk. Dengan hasil pengujian yang diperoleh, spesimen dengan *holding time* 7 jam pada *aging* menghasilkan nilai tertinggi dari sifat mekanik yang terbentuk dengan nilai kekerasan sebesar 84,950 VHN, *plateau stress* sebesar 84.467 Mpa, *densification stress* sebesar 64.975 Mpa, kemampuan menyerap energi sebesar 17.993 MJ/m<sup>3</sup>, serta energi dan kekuatan impak sebesar 1,650 J, dan 20,626 kJ/m<sup>2</sup>.

**Kata Kunci:** *Aluminium Foam, Paduan Al-Mg-Si, Precipitation Hardening, Intermetallic Mg<sub>2</sub>Si, Artificial Aging*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# THE EFFECT OF HOLDING TIME VARIATIONS ON ARTIFICIAL AGING ON PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si FOAM USING SPACE HOLDER NaCl

**Student Name / NRP** : Muhamad Zaki Ramadhan  
**Departement** : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
**Advisor 1** : Dian Mughli Fellicia, S.T., M.Sc.  
**Advisor 2** : Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.

## Abstract

Metal foams has been developed and increasingly being used as new engineering materials. One of the metals that is often used as metal foam is aluminum. Aluminum foam has lightweight properties, good for vibration, impact and sound absorption. The mechanical properties of Aluminum foam can be improved by suitable heat treatment such as precipitation hardening. One application that can be used on aluminum foam is as a filler in crash boxes because of its properties which is considered as kinetic energy. This study aims to analyze the effect of holding time used in artificial aging of Al-Mg-Si foam alloy as an application of filler to crash box. Al-Mg-Si alloy was used as the main material with the space holder NaCl used measuring 2.83 - 4.86 mm as much as 60% of the volume used as foam forming. The Al-Mg-Si alloy is melted to a temperature of 750 °C and poured into concrete containing NaCl which has been preheated to a temperature of 750 °C. Leaching was carried out to remove NaCl trapped in aluminum foam using water with a temperature of 90oC. Heat treatment of the treatment solution was carried out at 530 °C with a holding time of 100 minutes and quenched using air media. The next step is artificial aging at a temperature of 165 °C with variations in holding time for 5 hours, 6 hours, and 7 hours. Specimens were tested for density, observed with stereo microscope, SEM-EDX, XRD test, hardness test, impact test, and compression test to see the effect of heat treatment on the physical and mechanical characteristics of aluminum foam. The results of the XRD test, detected Mg<sub>2</sub>Si formed after heat treatment. Based on observations through SEM-EDX, Mg and Si were formed for each heat-treated specimen. The difference in holding time on aging shows that there are differences in the Mg<sub>2</sub>Si formed. With the test results obtained, specimens with a holding time of 7 hours on aging produced the highest value of mechanical properties formed with a hardness value of 84,950 VHN, plateau stress of 84,467 Mpa, densification stress of 64,975 Mpa, ability to absorb energy of 17,993 MJ/m<sup>3</sup>, and the energy and impact strength of 1,650 J, and 20,626 kJ/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** *Aluminium foam, Al-Mg-Si Alloy, Artificial Aging, Mg<sub>2</sub>Si Precipitate, Precipitation hardening*

*(This page is intentionally blank)*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul “PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* PADA *ARTIFICIAL AGING* TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* MENGGUNAKAN *SPACE HOLDER* NaCl” untuk memenuhi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Selama proses penelitian, penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis, diantaranya adalah:

1. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing pertama yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
2. Bapak Sutarsis S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis dalam mengerjakan Laporan Tugas Akhir.
3. Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS ITS, Bapak Sigit Tri Wicaksono S.Si., M.Si., Ph.D., yang telah membantu proses Tugas Akhir sampai selesai.
4. Bapak Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D., selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
5. Orang tua, Keluarga, Bapak/Ibu Dosen, dan teman dekat penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca.

Surabaya, 14 Juli 2022

Penulis

Muhamad Zaki Ramadhan

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>Abstrak</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xxi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Masalah .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Aluminium dan Paduannya .....	3
2.2 Aluminium <i>Foam</i> .....	5
2.2.1 Karakteristik Aluminium <i>Foam</i> .....	5
2.2.2 Aplikasi Aluminium <i>Foam</i> .....	7
2.3 Metode Pembuatan Aluminium <i>Foam</i> .....	8
2.3.1 Metode Gas Injeksi .....	9
2.3.2 Metode <i>Blowing Agent</i> .....	9
2.3.3 Metode <i>Infiltration Process</i> .....	10
2.3.4 Metode <i>Invesment Casting</i> .....	10
2.3.5 Space Holder .....	10
2.4 Pengecoran Logam .....	11
2.5 Heat Treatment .....	13
2.5.1 <i>Precipitation Hardening</i> .....	13
2.6 Penelitian Sebelumnya.....	15
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>19</b>
3.1 Diagram Alir .....	19
3.2 Bahan Penelitian.....	20
3.3 Alat Penelitian .....	21
3.4 Instrumen karakterisasi Material .....	21
3.5 Metode Penelitian .....	22
3.5.1 Studi Literatur.....	22
3.5.2 Pengecoran Aluminium <i>Foam</i> .....	22
3.5.3 <i>Heat Treatment</i> .....	23
3.6 Pengujian.....	24
3.6.1 Pengujian Densitas dan Porositas .....	24
3.6.2 Pengujian <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	24
3.6.3 Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray</i> ( <i>SEM-EDX</i> ).....	25
3.6.4 Pengujian Mikroskop Stereo .....	25
3.6.5 Pengujian Kekerasan.....	25
3.6.6 Pengujian Kompresi.....	25
3.6.7 Pengujian Impak .....	25
3.7 Rancangan Penelitian.....	26
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>29</b>
4.1 Hasil Pengujian Komposisi .....	29

4.2	Hasil Pengujian Densitas dan Porositas .....	29
4.3	Hasil Pengujian Mirooskop Stereo .....	31
4.4	Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-Ray</i> .....	33
4.5	Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> .....	35
4.6	Hasil Pengujian Kekerasan .....	38
4.7	Hasil Pengujian Kompresi .....	39
4.8	Hasil Pengujian Impak .....	42
4.9	Karakteristik Fisik dan Mekanik Paduan Al-Mg-Si <i>Foam</i> .....	43
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>47</b>
5.1	Kesimpulan .....	47
5.2	Saran .....	47
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>49</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>53</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>		<b>67</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>		<b>69</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	(a) sel <i>foam</i> terbuka, dan (b) sel <i>foam</i> tertutup.....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Energi yang diserap per volume dalam selang regangan tertentu .....	7
<b>Gambar 2.3</b>	Gambar Prototipe tabung berisi <i>foam</i> dikembangkan sebagai peredam benturan.....	7
<b>Gambar 2.4</b>	Lokasi <i>crash box</i> pada kendaraan.....	8
<b>Gambar 2.5</b>	<i>Non-filled vs foam-filled square extrusion, quasi-static loading</i> .....	8
<b>Gambar 2.6</b>	Diagram skematis pembuatan <i>foam</i> aluminium dengan metode injeksi gas leleh.....	9
<b>Gambar 2.7</b>	Pembuatan logam <i>foam</i> dengan metode <i>blowing agent</i> .....	9
<b>Gambar 2.8</b>	Skema alat metode <i>infiltration process</i> .....	10
<b>Gambar 2.9</b>	Morfologi dari butir NaCl. ....	11
<b>Gambar 2.10</b>	Wadah yang digunakan dalam produksi aluminium <i>foam</i> menggunakan NaCl sebagai <i>space holder</i> . ....	11
<b>Gambar 2.11</b>	Tipikal penampang dari cetakan pasir dua bagian.....	12
<b>Gambar 2.12</b>	(a) cetakan terbuka, (b) cetakan tertutup.....	13
<b>Gambar 2.13</b>	Kesetimbangan kelarutan sebagai fungsi temperatur untuk (a) Mg <sub>2</sub> Si dalam aluminium dengan rasio Mg-Si 1,73:1 dan (b) magnesium dan silikon dalam aluminium padat ketika Mg <sub>2</sub> Si dan silikon hadir .....	14
<b>Gambar 2.14</b>	Tahapan dalam melakukan <i>precipitation hardening</i> . ....	15
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian.....	20
<b>Gambar 3.2</b>	Paduan Al-Mg-Si.....	21
<b>Gambar 3.3</b>	NaCl Kristal.....	21
<b>Gambar 3.4</b>	Perlakuan panas aluminium <i>foam</i> (variasi <i>holding time artificial aging</i> 5 jam) .....	23
<b>Gambar 3.5</b>	Perlakuan panas aluminium <i>foam</i> (variasi <i>holding time artificial aging</i> 6 jam) .....	23
<b>Gambar 3.6</b>	Perlakuan panas aluminium <i>foam</i> (variasi <i>holding time artificial aging</i> 6 jam) .....	24
<b>Gambar 4.1</b>	Spesimen hasil coran paduan Al-Mg-Si <i>foam</i> .....	30
<b>Gambar 4.2</b>	Hasil uji (a) densitas dan (b) porositas.....	30
<b>Gambar 4.3</b>	Hasil pengamatan mikroskop stereo yang dilakukan untuk 4 sampel yang dipilih <i>random</i> .....	32
<b>Gambar 4.4</b>	Hasil pengujian SEM, (a) Non-HT perbesaran 2.5k, (b) AA5 perbesaran 2.5k, (c) AA6 perbesaran 2.5k, dan (d) AA7 perbesaran 2.5k.....	33
<b>Gambar 4.5</b>	Hasil pengujian EDX, (a) Non-HT, (b) AA5, (c) AA6, dan (d) AA7 .....	34
<b>Gambar 4.8</b>	Hasil uji XRD .....	36
<b>Gambar 4.9</b>	Hasil pengujian kekerasan vickers.....	38
<b>Gambar 4.10</b>	Spesimen uji kompresi paduan Al-Mg-Si <i>foam</i> .....	39
<b>Gambar 4.11</b>	(a) rata-rata nilai <i>plateau stress</i> dan <i>densification stress</i> , dan (b) nilai energi absorb spesimen hasil pengujian kompresi.....	40
<b>Gambar 4.12</b>	Spesimen uji impak paduan Al-Mg-Si <i>foam</i> .....	42
<b>Gambar 4.13</b>	Hasil uji rata-rata energi impak (J) .....	42
<b>Gambar 4.14</b>	Hasil uji rata-rata kekuatan impak (kJ/m <sup>2</sup> ).....	43

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Karakteristik dan Sifat Mekanik Aluminium(Dwight, 1998)(AY et al., 2000) .....	3
<b>Tabel 2.2</b>	Komposisi Aluminium Mg-Si (6061)(N. Rafael, Adams. J.H., 1990) .....	5
<b>Tabel 2.3</b>	Penelitian Sebelumnya .....	16
<b>Tabel 3.1</b>	Rancangan Penelitian .....	26
<b>Tabel 3.2</b>	Jadwal Penelitian .....	27
<b>Tabel 4.1</b>	Hasil uji komposisi paduan Al-Mg-Si (6061) .....	29
<b>Tabel 4.2</b>	Parameter $\alpha$ -Al berdasarkan hasil grafik XRD yang terbentuk .....	37

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Metal foam* (logam berpori dengan porositas tinggi berkisar antara 40 hingga 98 % vol) telah dikembangkan dan semakin banyak digunakan sebagai bahan rekayasa baru. Bahan yang sangat ringan ini memiliki kombinasi sifat yang unik, seperti kapasitas penyerapan energi benturan, permeabilitas udara dan air, sifat akustik, konduktivitas termal yang rendah, dan sifat isolasi listrik yang baik. Aplikasinya meliputi peredam kejut dan benturan, filter debu dan cairan, knalpot knalpot engine, elektroda berpori, pemanas dan penukar panas, arester api, pendukung katalis, dll. Bidang aplikasi busa logam sedang berkembang stabil (Davies & Zhen, 1983).

Salah satu material yang banyak digunakan untuk dijadikan *metal foam* yaitu aluminium. *Al foam* telah menunjukkan hasil yang meningkat dalam berbagai produk struktural dan fungsional, karena sifat mekanik, termal, akustik, listrik dan kimianya yang baik. Struktur *Al foam* memiliki densitas hanya sebagian kecil dari struktur padat dan karenanya memiliki *stiffness* dan kekakuan spesifik yang tinggi. Mereka juga memiliki sifat yang sangat baik untuk energi benturan, getaran dan penyerapan suara. Contoh aplikasinya termasuk panel ringan untuk bangunan dan transportasi terhadap tekuk dan benturan, panel langit-langit dan dinding yang tidak mudah terbakar untuk insulasi termal dan suara (Zhao & Sun, 2001).

Salah satu aplikasi Aluminium *foam* dalam dunia otomotif adalah sebagai *filler* dalam *crash box* pada mobil. Dalam bidang otomotif, untuk mengurangi resiko kematian dan kerusakan mobil akibat kecelakaan, dapat dengan melengkapi mobil dengan beberapa alat keselamatan, salah satunya adalah pemasangan *crash box* pada struktur mobil. *Crash box* merupakan sistem keamanan pasif (*passive safety system*) dan merupakan salah satu bagian dari *crashworthy system* yang digunakan untuk mengurangi tingkat keparahan kecelakaan yang dialami penumpang atau bagian kendaraan yang vital akibat tabrakan frontal (Darmadi et al., 2015). *Crash box* berfungsi sebagai peredam kinetik pada saat terjadi tumbukan, maka pada saat terjadi kecelakaan maka bagian depan alat ini akan mengalami deformasi. Bentuk *crash box* biasanya *tube* atau *beam* yang terletak di antara bumper dan sasis (Kusyairi et al., 2018).

Peningkatan *crashworthiness* dapat dicapai dengan menyesuaikan sifat mekanik *foam*, yang dapat dioptimalkan dengan perlakuan panas yang tepat dari paduan dasar. Selain itu, kekuatan kompresi terhubung dengan kepadatan *foam*, morfologi dan struktur mikro (Campana & Pilone, 2009). Kebanyakan perlakuan panas bertujuan untuk mengontrol kekuatan dan keuletan. Untuk Al-Mg-Si dan paduan terkait, kekuatan maksimum dicapai melalui pengerasan presipitasi dengan mengorbankan keuletan. Keuletan dapat ditingkatkan melalui *annealing* – dengan mengorbankan kekuatan (Dirk Lehmus & Banhart, 2003).

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Yang et al., 2020), Paduan Al-Mg-Si *foam* dengan *space holder* carbamide sebanyak 60% dilakukan *heat treatment* dengan serangkaian *solution heat treatment* pada 495 hingga 585 °C dan ditahan selama 90 menit. Setelah *quenching* air, *aging* ditetapkan pada 190 °C selama 2 jam. Hasil terbaik dari energi absorb didapat saat temperatur *solution heat treatment* 555 °C.

Dari kondisi tersebut masih banyak yang dapat dilakukan untuk penelitian lebih lanjut terkait kontrol pada *heat treatment* yang cocok untuk diaplikasikan pada aluminium *foam* Mg-Si, yaitu pada proses pembentukan *foam*, temperatur *heat treatment*, maupun *holding time* yang berbeda. Maka pada penelitian ini, dilakukan pembentukan aluminium *foam* ini menggunakan NaCl kristal sebagai *space holder* sebanyak 60 wt% yang kemudian dilakukan perlakuan panas *precipitation hardening* dengan variasi *holding time* pada *artificial aging*

untuk mengetahui pengaruh dari *holding time* yang telah diaplikasikan. Sampel yang dihasilkan selanjutnya diuji densitas, mikroskop stereo, mikroskop optik, uji kekerasan, uji impak, uji kompresi, XRD, untuk menganalisis karakteristik dan sifat mekaniknya, sehingga diharapkan dapat memenuhi kriteria aluminium *foam* komersial agar dapat digunakan sebagai *filler* pada *crash box* dengan nilai yang dibutuhkan yaitu kekuatan kompresi sebesar 14 Mpa dan energi absorpsi mencapai 12 MJ/m<sup>3</sup>.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah yang dianalisis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pengaruh *holding time* pada *artificial aging* terhadap sifat fisik aluminium *foam*.
2. Pengaruh *holding time* pada *artificial aging* terhadap sifat mekanik aluminium *foam*.

## 1.3 Tujuan Masalah

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis pengaruh *holding time* pada *artificial aging* terhadap sifat fisik aluminium *foam*.
2. Menganalisis pengaruh *holding time* pada *artificial aging* terhadap sifat mekanik aluminium *foam*.

## 1.4 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pengaruh lingkungan sekitar diabaikan.
2. Laju kenaikan temperatur ketika pemanasan *crucible* diabaikan.
3. Kecepatan penguapan aluminium cair dianggap konstan.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan aluminium *foam* menggunakan *space holder* NaCl yang dilakukan *heat treatment* dengan cara *solution heat treatment* kemudian dilanjutkan dengan *artificial aging* (*precipitation hardening*) untuk diamati perubahan sifat mekaniknya, sehingga pada penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai rujukan terhadap penelitian-penelitian selanjutnya dalam pengembangan material aluminium *foam* untuk aplikasi *filler* pada *crash box* pada mobil.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Aluminium dan Paduannya

Aluminium adalah unsur logam yang memiliki simbol kimia Al, dengan nomor atom 13 dan berat atom 27. Aluminium adalah elemen paling umum ketiga di kerak bumi, setelah oksigen dan silikon. Itu membuat 8% dari total massa kerak dan merupakan logam yang paling melimpah. Aluminium murni memiliki masa jenis sebesar  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , dan *melting point* sebesar  $660^\circ\text{C}$  serta *boiling point* sebesar  $1800^\circ\text{C}$  (Dwight, 1998). Karakteristik dan sifat mekanik aluminium dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Karakteristik dan Sifat Mekanik Aluminium (Dwight, 1998) (AY et al., 2000)

Properties	Unit	Value
Density	$\text{g/cm}^3$	2.7
Resistance	$(\Omega\text{mm}^2/\text{m}) \times 10^2$	2.66
Melting temperature	$^\circ\text{C}$	660.00
Tensile strength	$\text{N/mm}^2$	91.50
Modulus elasticity	$\text{kN/mm}^2$	69
Elongation	%	30.10
Hardness	HV	57.98

Paduan aluminium dapat dikategorikan menjadi dua bagian utama yaitu: *wrought composition*, dan *casting composition*. Banyak paduan yang dapat dilakukan perlakuan panas berdasarkan dari kelarutan fasanya. Perlakuan panas ini meliputi perlakuan panas larutan (*solution heat treatment*), pendinginan cepat (*quenching*), dan presipitasi atau *age hardening*. Untuk paduan *casting* atau paduan tempa, paduan tersebut digambarkan sebagai dapat dilakukan perlakuan panas (*heat treatable*). Sejumlah besar komposisi tempa (*wrought alloy*) lainnya bergantung pada pengerasan kerja (*work hardening*) melalui reduksi mekanis, biasanya dalam kombinasi dengan berbagai prosedur *annealing* untuk peningkatan propertisnya. Paduan ini disebut sebagai *work hardening*. Beberapa paduan tuang (*casting alloy*) pada dasarnya tidak dapat diolah dengan perlakuan panas dan hanya digunakan dalam cetakan atau dalam kondisi yang dimodifikasi secara termal yang tidak terkait dengan efek larutan atau presipitasi (N. Rafael, Adams. J.H., 1990).

Untuk *wrought alloy*, digunakan sistem penomoran 4 digit yang digunakan untuk identifikasi komposisi *wrought alloy* dengan penomoran pertama dari 4 digit mengindikasikan grup sebagai berikut (N. Rafael, Adams. J.H., 1990).

- 1xxx Komposisi murni terkontrol
- 2xxx Paduan di mana tembaga adalah elemen paduan utama, meskipun elemen lain, terutama magnesium, dapat ditentukan
- 3xxx Paduan di mana mangan adalah elemen paduan utama
- 4xxx Paduan di mana silikon adalah elemen paduan utama
- 5xxx Paduan di mana magnesium adalah elemen paduan utama
- 6xxx Paduan di mana magnesium dan silikon adalah elemen paduan utama
- 7xxx Paduan di mana seng adalah unsur paduan utama, tetapi unsur-unsur lain seperti tembaga, magnesium, kromium, dan zirkonium dapat ditentukan
- 8xxx Paduan termasuk timah dan beberapa komposisi litium yang mencirikan komposisi lainnya
- 9xxx Dicadangkan untuk penggunaan di masa mendatang

Pada grup 1xxx, seri 10xx digunakan untuk menunjukkan komposisi murni yang memiliki batas pengotor yang murni. Digit kedua ini dapat memiliki besaran lainnya (1 sampai 9). Sisa digit terakhir ditunjukkan untuk mengidentifikasi persentase minimum dari aluminium. Digit ini sama dengan dua digit ke kanan dari nilai desimalnya. Contoh aluminium 1010 yang menunjukkan persentase dari aluminiumnya yaitu 99.10%. Untuk grup 2xxx sampai 8xxx, digit kedua penomorannya mengindikasikan modifikasi paduannya. Jika nilainya nol, mengindikasikan paduan yang orisinal; bilangan 1 sampai 9 mengindikasikan modifikasi dari paduan orisinal tersebut. Untuk dua penomoran akhirnya menunjukkan signifikansi perbedaan paduan dalam kelompok paduannya (N. Rafael, Adams. J.H., 1990).

Untuk *casting alloy*, Sebuah sistem penunjukan numerik empat digit menggabungkan titik desimal digunakan untuk mengidentifikasi aluminium dan paduan aluminium dalam bentuk coran dan ingot pengecoran. Digit pertama menunjukkan grup paduan sebagai berikut (N. Rafael, Adams. J.H., 1990).

- 1xx.x Komposisi murni terkontrol
- 2xx.x Paduan di mana tembaga adalah elemen paduan utama, tetapi elemen paduan lainnya dapat ditentukan
- 3xx.x Paduan di mana silikon adalah elemen paduan utama, tetapi elemen paduan lainnya seperti tembaga dan magnesium ditentukan
- 4xx.x Paduan di mana silikon adalah elemen paduan utama
- 5xx.x Paduan di mana magnesium adalah elemen paduan utama
- 6xx.x Tidak digunakan
- 7xx.x Paduan di mana seng adalah elemen paduan utama, tetapi elemen paduan lainnya seperti tembaga dan magnesium dapat ditentukan
- 8xx.x Paduan di mana timah merupakan elemen paduan utama
- 9xx.x Tidak Digunakan

Pada dua digit pada penomoran kedua, untuk aluminium seri 1xx.x kedua digit menunjukkan tingkat kemurniannya (persentase minimum aluminium). Sama seperti seri *wrought alloy*, digit ini menunjukkan dua digit ke kanan dari nilai desimalnya pada nilai persentase minimum dari aluminium. Sedangkan pada seri 2xx.x sampai 8xx.x, dua digit pada penomoran kedua menandakan paduan yang berbeda dalam kelompok. Untuk digit terakhir 1xx.x maupun 2xx.x sampai 8xx.x, yaitu digit terakhir setelah poin desimal menunjukkan bentuk dari produk: xxx.0 mengindikasikan produk pengecoran, dan xxx.1 mengindikasikan *ingot* (N. Rafael, Adams. J.H., 1990).

Beberapa *wrought alloy* memiliki kemampuan untuk dapat diperlakukan panas, yaitu untuk seri 2xxx, 6xxx, dan 7xxx. Untuk seri 2xxx, Dalam kondisi T4 *natural aged*, paduan ini memiliki sifat mekanik yang mirip dengan baja ringan, dengan tegangan *yield* 250 N/mm<sup>2</sup>, kekuatan tarik ultimit mendekati 400 N/mm<sup>2</sup> dan daktilitas yang baik. Pada kondisi T6, tegangan *yield* dan *ultimate strenght* masing-masing dapat mencapai 375 dan 450 N/mm<sup>2</sup>, tetapi dengan daktilitas yang berkurang. Sifat mekanik yang baik dari paduan seri 2xxx diimbangi oleh berbagai faktor yang merugikan, seperti ketahanan korosi yang rendah, kemampuan ekstrusi yang buruk, ketidakcocokan untuk pengelasan busur, dan biaya yang lebih tinggi. Untuk seri 6xxx, Bahan-bahan ini mengandung Mg dan Si, dan memiliki penggunaan terbesar dari paduan yang dapat diolah dengan perlakuan panas. Mereka menggabungkan kekuatan dengan ketahanan korosi yang baik dan kemampuan ekstrusi yang sangat baik. Jenis material 6xxx dalam kondisi T6 kadang-kadang digambarkan sebagai 'baja ringan' dari aluminium, karena merupakan pilihan alami untuk elemen struktur dengan tegangan luluh yang serupa (250 N/mm<sup>2</sup>), tetapi kekuatan tariknya jauh lebih rendah (300 N/mm<sup>2</sup>) dan juga kurang ulet. Untuk seri 7xxx paduan ini mengandung seng dan magnesium.

Seri ini lebih kuat yang mencakup terkuat dari semua paduan aluminium, dengan kekuatan tarik dalam kondisi T6 hingga 550 N/mm<sup>2</sup>.

Aluminium *alloy* 6061 adalah aluminium yang paling umum digunakan. Ini adalah bahan yang dapat dilakukan *aging*, perlakuan panas ini dilakukan untuk meningkatkan kekuatan luluh. Unsur paduan utama adalah magnesium dan silikon. Ini memiliki sifat mekanik yang baik, kemampuan las, dan kemampuan mesin yang baik. Hal ini umumnya diekstrusi. Aluminium Mg-Si memiliki aplikasi di sayap pesawat, badan pesawat dan pesawat buatan sendiri. Aluminium Mg-Si mudah dikerjakan dengan ketahanan tinggi terhadap korosi meskipun permukaannya terkorosi. 6061 juga memiliki aplikasi di sasis mobil, konstruksi Yacht dan penggunaan pada tangki. Produk perlakuan panas 6061 memiliki aplikasi pada rangka sepeda, produk struktural, dan lainnya. Komposisi dari paduan Al-Mg-Si ini (6061) disajikan pada tabel 2.2(Sangeetha et al., 2020).

**Tabel 2.2** Komposisi Aluminium Mg-Si (6061)(N. Rafael, Adams. J.H., 1990)

Elemen Paduan	Komposisi (%)
Al	Balanced
Si	0,4 – 0,8
Mg	0,8 – 1,2
Fe	0,7
Cu	0,15 – 0,4
Mn	0,15
Cr	0,04 – 0,35
Zn	0,25

## 2.2 Aluminium Foam

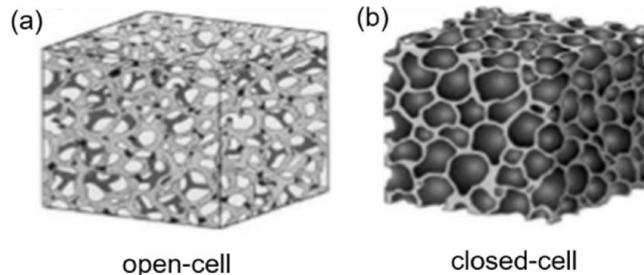
*Metal foam* dapat menghasilkan beberapa variabilitas dalam menawarkan peningkatan kinerja yang signifikan dalam struktur yang ringan dan kaku, untuk penyerapan energi yang efisien, untuk manajemen termal dan untuk kontrol akustik, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi yang dapat digunakan dalam industri otomotif dan dirgantara dan aplikasi khusus lainnya(Ashby et al., 2016)(Mahadev et al., 2018).

Aluminium *foam* memiliki kombinasi properti khas yaitu densitas rendah, sifat mekanik serta berat spesifik yang kompetitif dan penyerapan energi tinggi yang baik digunakan untuk proteksi tumbukan, dan suatu kemasan, dan juga memiliki sifat perpindahan panas yang baik sehingga memungkinkan penggunaannya untuk mendinginkan peralatan elektronik dan sebagai penukar panas mesin(Dirk Lehmus, 2008)(Barletta et al., 2007). Aluminium *foam* diproduksi dengan berbagai metode seperti teknik metalurgi serbuk, teknik sintering, penambahan gas dalam injeksi lelehan, penggunaan agen dalam lelehan logam, pengecoran investasi, dan lainnya(Antenucci et al., 2014).

### 2.2.1 Karakteristik Aluminium Foam

Sifat-sifat *foam* logam sangat tergantung pada karakteristik pori-pori yang tersebar di seluruh mereka. Karakteristik ini meliputi jenis, bentuk, ukuran, jumlah (persentase volume), keseragaman dan luas permukaan porositas. Dengan proses yang berbeda, akan menghasilkan sifat bahan yang berbeda. Struktur porositas logam *foam* berkisar dari 40% hingga 90%. Misalnya, porositas pada dasarnya bulat dan tertutup dalam *metal foam* yang dihasilkan oleh *foaming* dalam lelehan, yang mengarah ke tingkat penyerapan energi yang lebih tinggi, sementara porositas yang saling berhubungan (*interconnected*) membentuk labirin pori yang sangat berguna untuk bahan yang membutuhkan karakteristik permeabilitas yang terkontrol(Bauer et al., 2013)(Davies & Zhen, 1983).

*Foam* logam diklasifikasikan sebagai struktur sel terbuka dan sel tertutup (Gambar 2.1) tergantung pada karakteristik sel. Dalam *foam* sel tertutup, setiap sel sepenuhnya terlindung oleh kerak logam padat tipis yang tidak permeabel, sementara dalam *foam* sel terbuka sel-sel individu saling berhubungan dan menyediakan jalan bagi udara atau cairan apa pun untuk melewatinya. Selain densitas yang rendah dari bahan-bahan ini, kedua kelompok logam seluler ini memiliki sifat fisik dan mekanik yang meliputi, penyerapan getaran, ketahanan tinggi terhadap kompresi, penyerapan energi, penyerapan akustik yang baik dan permeabilitas aliran fluida yang baik (Fernández-morales et al., 2017)(Soni & Biswas, 2016).

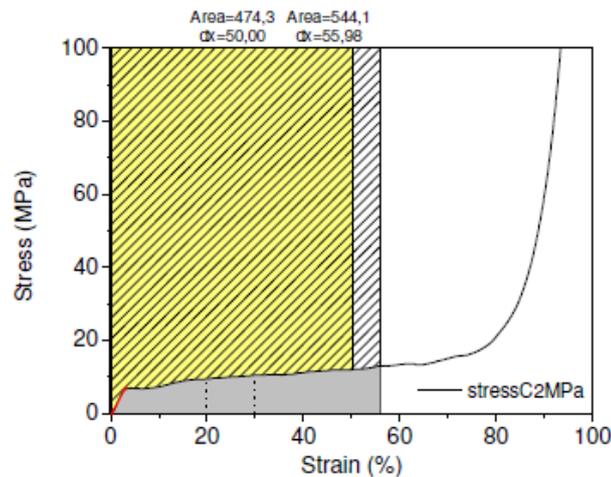


**Gambar 2.1** (a) sel *foam* terbuka, dan (b) sel *foam* tertutup (Yu Chen et al., 2021)

Karakteristik *foam* paling baik dapat dilihat dengan menggambarkan dari apa bahan *foam* itu dibuat, kerapatan relatifnya,  $\rho/\rho_s$  (kerapatan *foam*,  $\rho$ , dibagi dengan bahan padat dinding sel,  $\rho_s$ ), dan apakah memiliki sel terbuka atau tertutup. Selain itu, sifat *foam* dipengaruhi oleh struktur, terutama oleh anisotropi dan cacat berupa dinding sel yang rapuh, tertekuk atau rusak, dan sel dengan ukuran atau bentuk yang tidak biasa (Ashby et al., 2016).

*Foam* logam menggabungkan sifat bahan seluler dengan logam. Untuk alasan ini, foam logam menguntungkan untuk konstruksi ringan karena rasio kekuatan-terhadap beratnya yang tinggi, dikombinasikan dengan sifat struktural dan fungsional seperti penyerapan energi benturan, manajemen suara dan panas (Duarte & Oliveira, 2003).

*Foam* paduan sering digunakan sebagai bahan pengisi dalam struktur ringan yang mengalami benturan dan/atau benturan kecepatan tinggi atau sebagai perangkat insulasi termal/akustik. Kemampuan penyerapan energi dari *foam* ini dapat diperkirakan dengan baik dari perilaku kompresi tegangan-regangan material yang diperkirakan dari area di bawah kurva tegangan-regangan. Karena bahan *foam* menunjukkan "dataran tinggi" *plateau* tegangan konstan, mereka dapat menyerap tingkat energi yang lebih tinggi daripada paduan aluminium padat. Sebagian besar energi yang diserap diubah secara ireversibel menjadi energi deformasi plastis yang merupakan keuntungan lebih lanjut dari aluminium *foam*. Untuk tingkat tegangan yang sama, material padat mengalami deformasi dalam tegangan linier-elastis yang dapat kembali, melepaskan sebagian besar energi yang tersimpan ketika beban dihilangkan. *Foam* paduan Al menunjukkan kemampuan penyerapan energi yang lebih tinggi. Peningkatan penyerapan energi dengan meningkatnya kepadatan pada *foam* jelas terlihat (Duarte & Oliveira, 2003). Contoh kurva tegangan-regangan dari aluminium foam yang menunjukkan luasan energi yang diserap dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Energi yang diserap per volume dalam selang regangan tertentu(Duarte & Oliveira, 2003)

### 2.2.2 Aplikasi Aluminium Foam

Aluminium *foam* adalah bahan yang dapat dipertimbangkan dari salah satu target terpenting dalam desain kendaraan yaitu keselamatan pasif, dengan peningkatan yang menjanjikan dalam kelayakan kecelakaan kendaraan, menggabungkan sifat-sifat yang berasal dari struktur seluler, khususnya ringan, dengan perilaku khas logam(Fuganti & Lorenzi, 1999).

Sebuah desain populer dari faktor keselamatan kendaraan adalah sistem penyerapan energi tabrakan kecepatan rendah. Pada dasarnya, sistem terdiri dari balok silang dengan masing-masing ujungnya terhubung ke tabung yang biasa disebut sebagai *crash box* (Gambar 2.3 dan 2.4). Aluminium *foam* sejauh ini merupakan bahan yang paling populer diterapkan dalam desain ini. Ketika dibebani, sistem akan merespon gaya luar dengan mengalami deformasi(Taylor, 2010).

Peningkatan *crashworthiness* dapat dicapai dengan menyesuaikan sifat mekanik *foam*, yang dapat dioptimalkan dengan perlakuan panas yang tepat dari paduan dasar. Selain itu, kekuatan kompresi terhubung dengan kepadatan *foam*, morfologi dan struktur mikro(Darmadi et al., 2015).

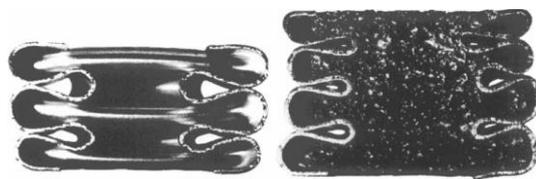


**Gambar 2.3** Gambar Prototipe tabung berisi *foam* dikembangkan sebagai peredam benturan(Kusyairi et al., 2018)



**Gambar 2.4** Lokasi *crash box* pada kendaraan(Mahadev et al., 2018)

Karena perusahaan asuransi menegakkan pedoman keselamatan yang melindungi penumpang saat terjadi tabrakan dan juga meminimalkan kerusakan kendaraan, pembuat mobil menggunakan ide "*crash box*" untuk memenuhi standar ini. *Crash box* semacam itu ditempatkan di antara balok benturan dan rel depan mobil (gambar 2.3). Rel depan membentang di sisi mobil tegak lurus dengan balok bumper. Untuk benturan kecepatan rendah, solusi tradisional untuk bagian depan kendaraan mampu menyerap energi benturan hingga 3-5 km/jam, sedangkan untuk kecepatan yang melebihi batas ini, sasis berubah bentuk secara plastis. Dengan diperkenalkannya struktur peredam benturan antara sasis dan bumper, dimungkinkan untuk meningkatkan batas kecepatan hingga 15 km/jam. *Crash box* berubah bentuk untuk menyerap semua energi dari tabrakan 15 km/jam (9,3 mph), melindungi komponen bagian depan yang mahal dan rangka mobil serta penumpang di dalamnya. Salah satu pilihan untuk *crash box* adalah tabung kosong yang secara plastis runtuh dan dengan demikian menyerap energi. Modus kegagalan tabung adalah membuat lipatan plastik sepanjang tabung secara berkala (Gambar 2.5). Dengan memasukkan inti *foam* aluminium di tengah tabung, ada peningkatan penyerapan energi. Tabung luar masih terlipat sepanjang panjangnya, tetapi jumlah lipatan bertambah; akibatnya energi yang diserap oleh tabung yang diisi lebih besar dari pada tabung yang kosong. Energi juga diserap oleh inti *foam*, dan energi total yang diserap oleh tabung berisi *foam* lebih besar daripada jumlah energi individu tabung dan *foam*. Aluminium *foam* secara komersial memiliki nilai kekuatan kompresi sebesar 1-10 Mpa dengan energi absorpsi sebesar 2-11 MJ/m<sup>3</sup>(Ashby et al., 2016)(Banhart, 2003)(Fuganti & Lorenzi, 1999).



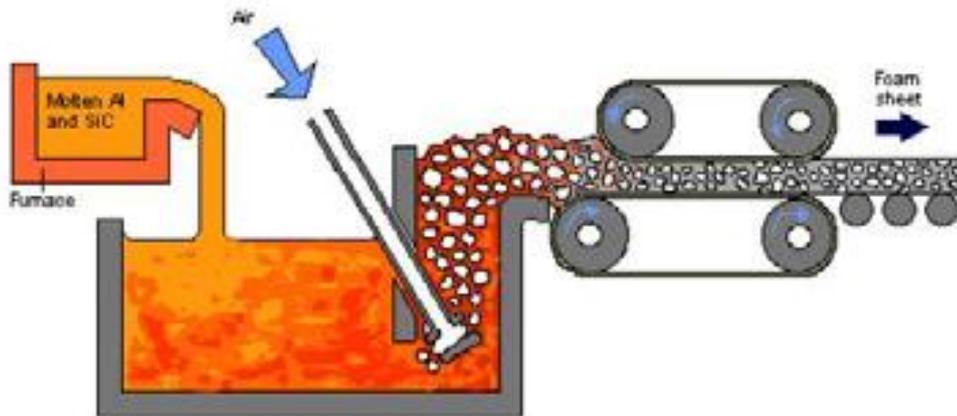
**Gambar 2.5** *Non-filled vs foam-filled square extrusion, quasi-static loading*(Taylor, 2010)

### 2.3 Metode Pembuatan Aluminium Foam

Saat ini, aluminium *foam* banyak digunakan dalam aplikasi otomotif dan dirgantara karena sifat-sifatnya seperti kepadatan yang lebih rendah dan rasio kekakuan terhadap berat yang lebih tinggi. Ada banyak metode yang digunakan untuk menghasilkan *Foam* aluminium seperti metalurgi serbuk, rute leleh, logam cair, deposisi elektrokimia, dan pengecoran aduk. Metalurgi serbuk dan metode pengecoran aduk adalah teknik yang penting karena memungkinkan produksi *foam* logam. Teknik penahan ruang *Foam* logam aluminium telah banyak digunakan. Banyak peneliti dan praktisi bekerja dalam pembuatan *foam* logam untuk aplikasi teknik(Karuppasamy et al., 2020).

### 2.3.1 Metode Gas Injeksi

Dalam proses ini injeksi gas (Gambar 2.6) digunakan untuk melelehkan aluminium *foam* dan paduan aluminium. Dengan penambahan SiC, partikel aluminium oksida atau magnesium oksida digunakan untuk mengubah sifat *foaming*. Fraksi volume partikel yang diperoleh dari injeksi gas bervariasi dari 20% hingga 100% dan ukuran rata-rata partikel akan bervariasi dari 5 µm dan 20 µm. Produksi *closed-cell foam* memiliki lebar sekitar 1 m dan tebal 0,2m dengan diameter berkisar antara 5 mm dan 20mm dan kepadatan relatif *foam* adalah 0,03-0,1 kg/m<sup>3</sup>(Mahadev et al., 2018).



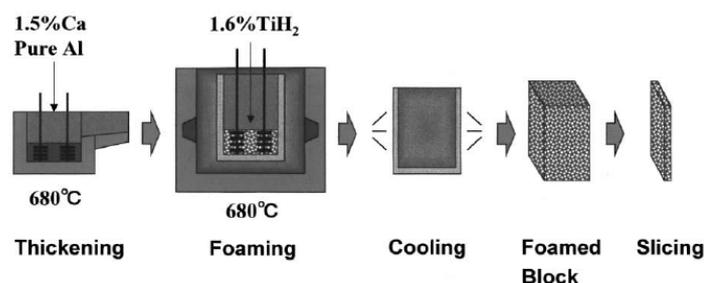
**Gambar 2.6** Diagram skematis pembuatan *foam* aluminium dengan metode injeksi gas leleh(Mahadev et al., 2018)

### 2.3.2 Metode *Blowing Agent*

Penambahan *Blowing Agent* ke dalam lelehan adalah cara lain dari metode pembuatan *metal foam* (Gambar 2.7). Bahan peniup terurai di bawah pengaruh panas dan melepaskan gas. Tahap pertama produksi *foam* sekitar 1,5 wt. % logam kalsium ditambahkan ke lelehan aluminium pada 680 °C. Kemudian lelehan diaduk selama beberapa menit selama viskositas lelehan terus menerus membentuk oksida seperti CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, yang mengentalkan logam cair. Titanium hidrida ditambahkan dalam jumlah yang biasanya 1,6 berat. %, yang bertindak sebagai zat peniup menurut Reaksi 2.1:



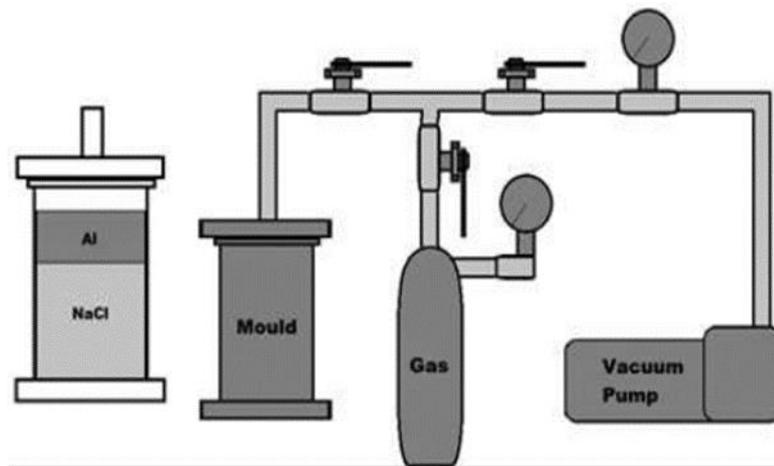
Lelehan mulai mengembang perlahan dan secara bertahap mengisi bejana *foaming*. Seluruh proses *foaming* dapat memakan waktu 15 menit untuk batch tipikal sekitar 0,6 m<sup>3</sup>. Setelah mendinginkan bejana di bawah titik leleh paduan, *foam* cair berubah menjadi *foam* aluminium padat dan dapat dikeluarkan dari cetakan untuk diproses lebih lanjut(Mahajan & Jadhav, 2015).



**Gambar 2.7** Pembuatan logam *foam* dengan metode *blowing agent*(Banhart, 2001)

### 2.3.3 Metode *Infiltration Process*

Pengecoran vakum atau metode infiltrasi (Gambar 2.8) dapat diklasifikasikan sebagai proses *foaming* yang dilakukan saat logam dalam keadaan cair. Pengecoran logam dan paduan menggunakan bahan *space holder* adalah cara yang sangat ekonomis untuk mendapatkan *foam* logam atau bagian seluler. Ukuran pori dan porositas dapat dikontrol dengan memodifikasi parameter proses seperti partikel *space holder* (bentuk, ukuran, bahan, dll.), tekanan proses dan metode infiltrasi. Proses infiltrasi pada dasarnya dapat dinyatakan sebagai pengecoran di sekitar material *space holder*. Struktur seluler dapat diperoleh dengan menghilangkan bahan *space holder*. Proses ini juga dikenal sebagai replikasi. Sistem ini terdiri dari cetakan, tabung gas, pengukur tekanan, pompa vakum, pengukur vakum dan katup pipa. Evakuasi vakum dan tekanan serta proses infiltrasi di dalam cetakan diatur dengan tombol pengukur (Medik et al., 2017).



Gambar 2.8 Skema alat metode *infiltration process* (Medik et al., 2017).

### 2.3.4 Metode *Investment Casting*

*Metal foam* juga dapat dibuat tanpa membuat *metal foam* secara langsung. Dalam proses ini, *foam* polimer digunakan sebagai titik awal. *Foam* polimer diubah menjadi struktur dengan pori-pori terbuka dengan memanipulasi proses *foaming* atau dengan perlakuan retikulasi. *Foam* kemudian diisi dengan bahan tahan panas, mis. campuran mullite, resin fenolik dan kalsium karbonat yang kemudian dikeraskan. Bahan tahan api kemudian dihilangkan dan rongga yang memiliki bentuk spons yang sama seperti plastik spons asli diperoleh. Logam cair dituangkan ke dalam cetakan ini dan dibiarkan dingin dan mengeras. Logam-logam yang telah digunakan dalam proses ini adalah yang memiliki titik leleh yang relatif rendah, seperti tembaga, aluminium, timbal, seng, timah dan paduannya. Setelah mengeras, *metal foam* diperoleh dengan bentuk yang tepat dari *foam* polimer asli. Kepadatan dan morfologi *foam* tentu saja ditentukan oleh *foam* polimer (Davies & Zhen, 1983) (Banhart, 2014).

### 2.3.5 Space Holder

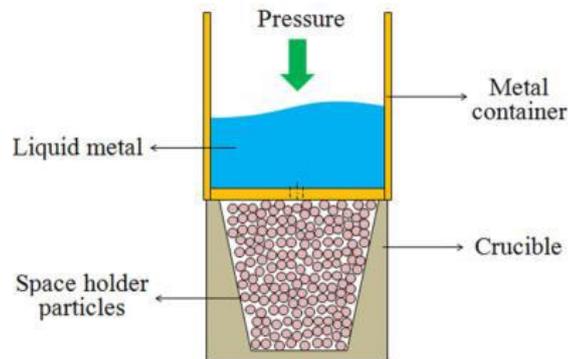
Natrium klorida (NaCl) banyak digunakan sebagai material *space holder* karena murah, toksisitas rendah, kelarutan dalam air tinggi, dan banyak tersedia di pasaran. NaCl dapat dengan mudah dihilangkan melalui proses pelarutan. Dilaporkan bahwa kandungan *space holder* (NaCl) dapat mengontrol morfologi pori dan kepadatan *foam* aluminium yang dapat mengoptimalkan sifat tekan dan kemampuan penyerapan energi *foam* (Rushdi et al., 2016) (Yusuf et al., 2021).

Untuk pembuatan *foam* aluminium, bentuk awal berdasarkan natrium klorida (NaCl) pada Gambar 2.9 telah banyak digunakan karena ketahanan termal yang tinggi (titik leleh ~800 °C), stabilitas kimia, ketersediaan, dan kelarutan dalam air. Semua karakteristik ini menjadikan bahan ini sebagai alternatif yang baik untuk membuat preform yang dapat dilepas dengan biaya yang relatif rendah, tergantung pada kemurnian garamnya (Gopinatha & Nagarajanb, 2021).



**Gambar 2.9** Morfologi dari butir NaCl (Luna et al., 2014).

Logam digunakan untuk menghasilkan kerangka utama dari aluminium *foam*, dan partikel NaCl dengan bentuk yang sama digunakan untuk menghasilkan sel internal. Gambar 2.10 menunjukkan kerangka kompartemen/bentuk, di mana dudukan logam dengan aluminium diletakkan di atas dudukan logam yang mengandung partikel NaCl. Partikel NaCl dimasukkan ke dalam cetakan logam sampai terisi penuh dan elemen aluminium ditempatkan di dalam wadah logam yang dilengkapi dengan lubang di bagian tengah bawah (Pimiento et al., 2015) (Mahadev et al., 2018).



**Gambar 2.10** Wadah yang digunakan dalam produksi aluminium *foam* menggunakan NaCl sebagai space holder (Mahadev et al., 2018).

## 2.4 Pengecoran Logam

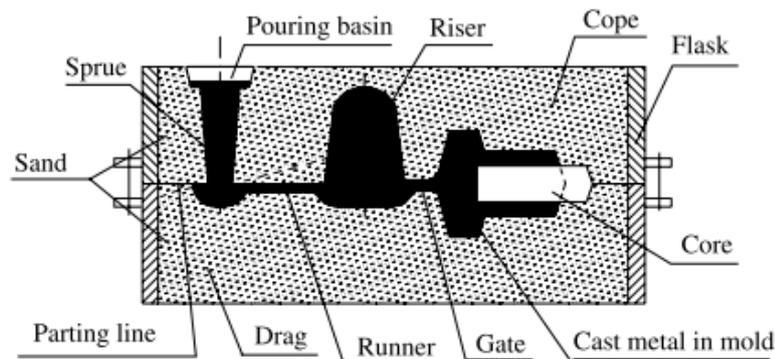
Pengecoran memiliki keunggulan yang signifikan dibandingkan dengan metode pembuatan komponen lainnya. Pengecoran umumnya lebih murah daripada komponen yang dibuat dengan cara lain. Pada proses pengecoran dalam hal perancangan bentuknya memberi perancang pilihan bentuk yang tidak terbatas yang dapat dibuat dalam satu tahap. Pengecoran biasanya dapat dibuat lebih dekat dengan desain yang dipilih, yang memberikan penghematan baik dalam proses material dan finishing dibandingkan dengan metode pembuatan lainnya (Boljanovic & Ph, 2009).

Terdapat empat elemen utama yang dibutuhkan dalam proses pengecoran: *pattern*, *mold*, *cores*, dan *workpiece*. *The pattern*, adalah template orisinal yang digunakan saat preparasi cetakan, membentuk rongga sesuai bentuk material yang akan dicor. *Cores*

digunakan untuk membentuk *tunnel* atau lubang pada cetakan yang sudah jadi, dan *workpiece* adalah produk final yang dihasilkan. Produk coran didiamkan di dalam ceakan sampai memadat, kemudian dikeluarkan untuk menunjukkan bagian yang telah dibentuk atau dicor (Boljanovic & Ph, 2009).

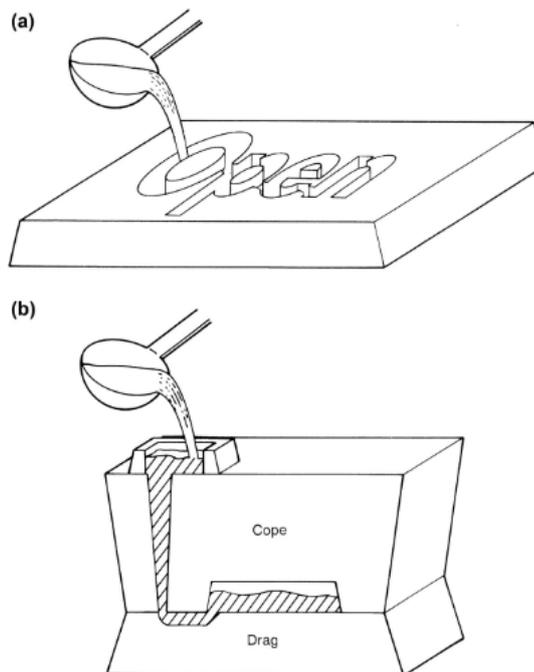
Proses pengecoran secara luas dibagi menjadi dua tipe yaitu proses pengecoran *expendable-mold*, proses pengecoran *nonexpendable-mold*. Pengecoran *expendable-mold* adalah klasifikasi umum yang meliputi pasir, plastik, tempurung, dan cetakan *investment* (teknik *lost wax*). Penggunaan cetakan tersebut hanya sementara dan tidak dapat digunakan kembali, dan dibutuhkan gravitasi untuk memberikan gaya dari lelehan logam agar dapat masuk ke rongga cetakan. Pada proses ini, cetakan yang telah digunakan harus dihancurkan untuk mengeluarkan produk pengecorannya, sehingga hanya digunakan sekali pakai. Sedangkan pada *nonexpendable-mold* berbeda dengan *expendable-mold* karena cetakan yang digunakan adalah cetakan permanen yang tidak perlu dihancurkan setiap siklus produksi (Boljanovic & Ph, 2009).

Setelah logam dipanaskan sampai suhu penuangannya ( $T_p$ ) logam siap untuk dituang. Gambar 2.11 menjelaskan prinsip aliran fluida dalam pengecoran pada sistem dasar pengecoran gravitasi.



**Gambar 2.11** Tipikal penampang dari cetakan pasir dua bagian (Boljanovic & Ph, 2009)

Teknologi saat ini, sebagian besar produksi melibatkan metode penuangan gravitasi. Jenis cetakan pada penuangan gravitasi dapat dibagi menjadi dua tipe yaitu *open moulds* (cetakan terbuka), dan *closed molds* (cetakan tertutup). Contoh tipe ini dapat dilihat pada Gambar 2.12.



**Gambar 2.12** (a) cetakan terbuka, (b) cetakan tertutup(Campbell, 2015)

Kebanyakan coran memerlukan cetakan yang dibentuk dalam dua bagian: bagian bawah (*drag*) membentuk dasar coran dan bagian atas (*cope*) membentuk bagian atas coran. Beberapa coran tidak memerlukan pembentukan pada permukaan atas (*open molds*). Dalam hal ini, hanya *drag* yang diperlukan. Tidak adanya penutup berarti rongga cetakan terbuka, sehingga logam dapat langsung dituang dan aliran pengecoran dapat diamati secara langsung sehingga aliran logam dapat dikontrol untuk mengisi semua bagian pada cetakan(Campbell, 2015). Pada cetakan tertutup, desain dari sistem pengisian (*filling system/running system*) sangat krusial karena akan mempengaruhi hasil dari produk yang akan dicor. Sistem pengisian ini secara umum dapat dikategorikan sebagai rangkaian corong, saluran unruk memandu lelehan logam dari *ladle* ke dalam cetakan, *top gated*, *gated* pada sambungan cetakan, atau *bottom gated*(Campbell, 2015).

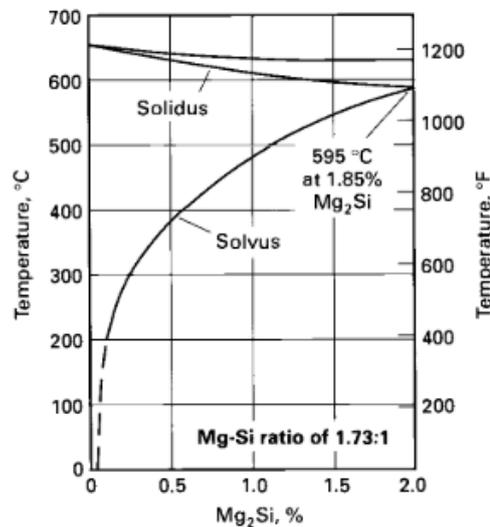
## 2.5 Heat Treatment

Perlakuan panas dalam arti luas, mengacu pada operasi pemanasan dan pendinginan yang dilakukan untuk tujuan mengubah sifat mekanik, struktur metalurgi, atau keadaan tegangan sisa dari produk logam. Namun, ketika istilah ini diterapkan pada paduan aluminium, penggunaannya sering dibatasi pada operasi khusus yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan tempa dan cor yang dapat dipadatkan. Biasanya disebut sebagai paduan "yang dapat diolah dengan panas (*heat treatable*)" untuk membedakannya dari paduan yang tidak ada penguatan signifikan yang dapat dicapai dengan pemanasan dan pendinginan(ASM International®, 1991).

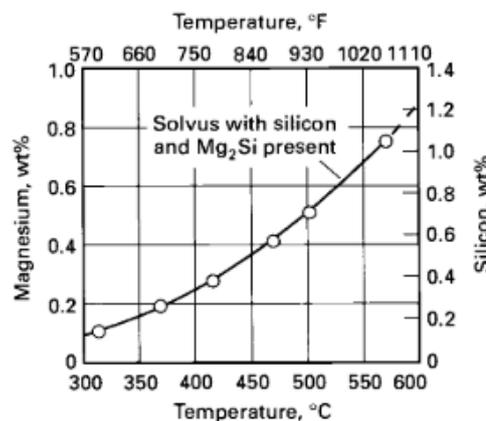
### 2.5.1 *Precipitation Hardening*

Salah satu atribut penting dari sistem paduan pengerasan presipitasi (*precipitation hardening*) adalah kesetimbangan kelarutan padat yang bergantung pada temperatur yang ditandai dengan meningkatnya kelarutan dan meningkatnya temperature (Gambar 2.13). Meskipun kondisi ini dipenuhi oleh sebagian besar sistem paduan aluminium biner, banyak yang menunjukkan sedikit pengerasan presipitasi, dan paduan ini biasanya tidak dianggap dapat diolah dengan perlakuan panas. Paduan sistem aluminium-silikon dan aluminium-

mangan biner, misalnya, menunjukkan perubahan yang relatif signifikan dalam sifat mekanik sebagai hasil dari perlakuan panas yang menghasilkan presipitasi yang cukup besar (ASM International®, 1991).



(a)



(b)

**Gambar 2.13** Kestimbangan kelarutan sebagai fungsi temperatur untuk (a) Mg<sub>2</sub>Si dalam aluminium dengan rasio Mg-Si 1,73:1 dan (b) magnesium dan silikon dalam aluminium padat ketika Mg<sub>2</sub>Si dan silikon hadir (ASM International®, 1991)

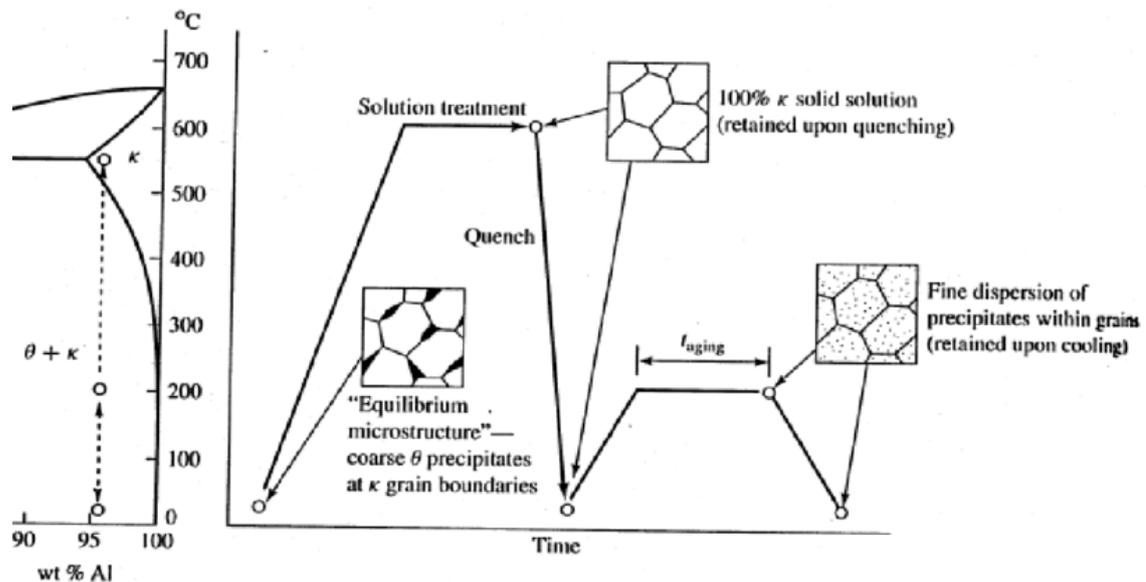
Sistem paduan aluminium utama yang dapat dilakukan dengan pengerasan presipitasi meliputi:

- Aluminium-tembaga dengan penguatan dari CuAl<sub>2</sub>
- Aluminium-tembaga-magnesium
- Aluminium-magnesium-silikon dengan penguatan dari Mg<sub>2</sub>Si
- Aluminium-seng-magnesium dengan penguatan dari MgZn<sub>2</sub>
- Aluminium-seng-magnesium-tembaga

Untuk memanfaatkan reaksi pengerasan presipitasi, pertama-tama perlu untuk menghasilkan *solid solution*. Proses dimana hal ini dicapai disebut *solution heat treatment*, dan tujuannya adalah untuk memasukkan larutan padat dalam jumlah praktis maksimum dari elemen pengerasan yang dapat larut dalam paduan. Prosesnya terdiri dari memanaskan paduan pada suhu yang cukup tinggi dan untuk waktu yang cukup lama untuk mencapai larutan padat yang hampir homogen. Temperatur *solution heat treatment* ditentukan oleh batas komposisi paduan (ASM International®, 1991). Kemudian dilanjutkan dengan *quenching*

yang bertujuan untuk mempertahankan larutan padat yang terbentuk pada temperatur *solution heat treatment*, dengan pendinginan cepat ke suhu yang lebih rendah, biasanya mendekati suhu kamar. Dalam kebanyakan kasus, untuk menghindari jenis presipitasi yang merusak sifat mekanik atau ketahanan korosi, larutan padat yang terbentuk selama perlakuan panas larutan harus didinginkan cukup cepat (dan tanpa gangguan) untuk menghasilkan larutan *supersaturated* pada suhu kamar (kondisi optimal untuk pengerasan presipitasi)(ASM International®, 1991).

Setelah *solution treatment* dan dilanjut *quenching*, pengerasan dicapai dengan *aging* pada suhu kamar (*natural aging*) atau dengan presipitasi *heat treatment (artificial aging)*. Dalam beberapa paduan, pengendapan yang cukup terjadi dalam beberapa hari pada suhu kamar untuk menghasilkan produk yang stabil dengan sifat yang memadai untuk banyak aplikasi. Paduan ini juga terkadang diberi *artificial aging* untuk memberikan peningkatan kekuatan dan kekerasan pada produk tempa atau cor. Paduan lain dengan reaksi pengendapan yang lambat pada suhu kamar selalu diberi *artificial aging* sebelum digunakan. *Artificial aging* umumnya adalah suhu rendah, proses jangka panjang. Suhu berkisar dari 115 hingga 190 °C (240 sampai 375 °F); dengan waktu yang bervariasi dari 5 hingga 48 jam. Pilihan siklus waktu-suhu untuk perlakuan panas presipitasi harus mendapat pertimbangan yang cermat. Partikel *intermetallic* yang lebih besar dihasilkan dari waktu yang lebih lama dan suhu yang lebih tinggi; namun, partikel yang lebih besar jumlahnya lebih sedikit dengan jarak yang lebih jauh. Tujuan dari pengerasan presipitasi adalah untuk memilih siklus yang menghasilkan ukuran dan pola distribusi *intermetallic* yang optimum(ASM International®, 1991). Gambar 2.14 menunjukkan tahapan dalam melakukan perlakuan pengerasan presipitasi.



**Gambar 2.14** Tahapan dalam melakukan *precipitation hardening*(Ruqayah A. Abdulkadhim, 2015).

## 2.6 Penelitian Sebelumnya

Berikut adalah penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang terkait dengan pembuatan aluminium *foam* menggunakan *space holder* NaCl.

**Tabel 2.3** Penelitian Sebelumnya

Penulis	Judul	Rincian Penelitian
(Mohd Razali et al., 2016)	<i>Characteristic of Modified Geometrical Open-Cell Aluminium Foam by Casting Replication Process</i>	Aluminium yang digunakan tipe 6101 dengan NaCl berukuran 1-3 mm sebagai <i>space holder</i> . Persentase densitas dan porositas aluminium foam berbanding terbalik. Porositas tertinggi yang diperoleh sebesar 63% dengan densitas 1 g/cm <sup>3</sup> .
(Nov et al., 2021)	<i>Characteristics of Porous Aluminium Materials Produced by Pressing Sodium Chloride into Their Melts</i>	Digunakan aluminium alloy (AlSi12) dengan variasi <i>space holder</i> NaCl. Didapati setelah perhitungan, semakin besar ukuran NaCl maka semakin kecil densitasnya. Densitas bersikar antara 975 sampai 1186 kg/m <sup>3</sup> . Dan porositas yang terbentuk bersikar 55% sampai 62%.
(Campana & Pilone, 2009)	<i>Effect of heat treatments on the mechanical behaviour of aluminium alloy foams</i>	Digunakan paduan Al 6061 dan 7075 <i>Solution treatment</i> pada temperatur 530°C selama 1,7 jam untuk 6061 dan temperatur 480°C selama 1,7 jam untuk 7075 <i>Quenching</i> di air <i>Aging</i> selama 10 jam pada temperatur 165°C untuk 6061 dan 24 jam 120°C untuk 7075 <i>Aging</i> dapat meningkatkan batas elastis dan <i>plateau</i> sehingga energi absorpsi naik.
(Dahil et al., 2020)	<i>Effect of Artificial Aging Process on Aluminum Foam Made of Etial 160</i>	<i>Solution Treatment</i> dilakukan pada temperatur 500 °C selama 30 menit. <i>Quenching</i> dengan air. <i>Artificial aging</i> pada 120 °C, 170 °C, dan 220 °C selama 10 jam. Didapatkan hasil optimal pada temperatur <i>Artificial Aging</i> 170 °C
(Dirk Lehnhus & Banhart, 2003)	<i>Properties of heat-treated aluminium foams</i>	<i>Solution heat treatment</i> (530 °C, 100 menit) <i>aging</i> (165 °C, 10 jam) Specimen yang diperlakukan panas <i>Solution heat treatment</i> dan dilanjutkan <i>aging</i> menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik (Kekuatan dan energi absorb yang tinggi) dibandingkan spesimen yang tidak mengalami perlakuan panas maupun yang hanya melakukan salah satu dari <i>heat treatment</i> tersebut.
(D. Lehnhus et al., 2002)	<i>Adaptation of aluminium foam properties by means of precipitation hardening</i>	Precipitation hardening dapat meningkatkan strength pada 6061 dan 7075. Pada 6061, water quench menghasilkan kenaikan strength paling tinggi. Water quench pada 6082 berdampak buruk pada struktur sel. Direct aging sangat direkomendasikan.
(Esmaeili, 2008)	<i>Prediction of the effect of artificial aging heat treatment on the yield strength of an open-cell aluminum foam</i>	Digunakan <i>open-cell</i> aluminium 6061 <i>Solution treatment</i> pada temperatur 560°C selama 1 jam <i>Aging</i> pada temperatur 180°C selama 1,2,4,7 jam dan 220°C selama 0,5, 1,5, 2, 4 jam Hasil optimum didapat pada <i>aging</i> 180°C selama 7 jam dan 220°C selama 4 jam.

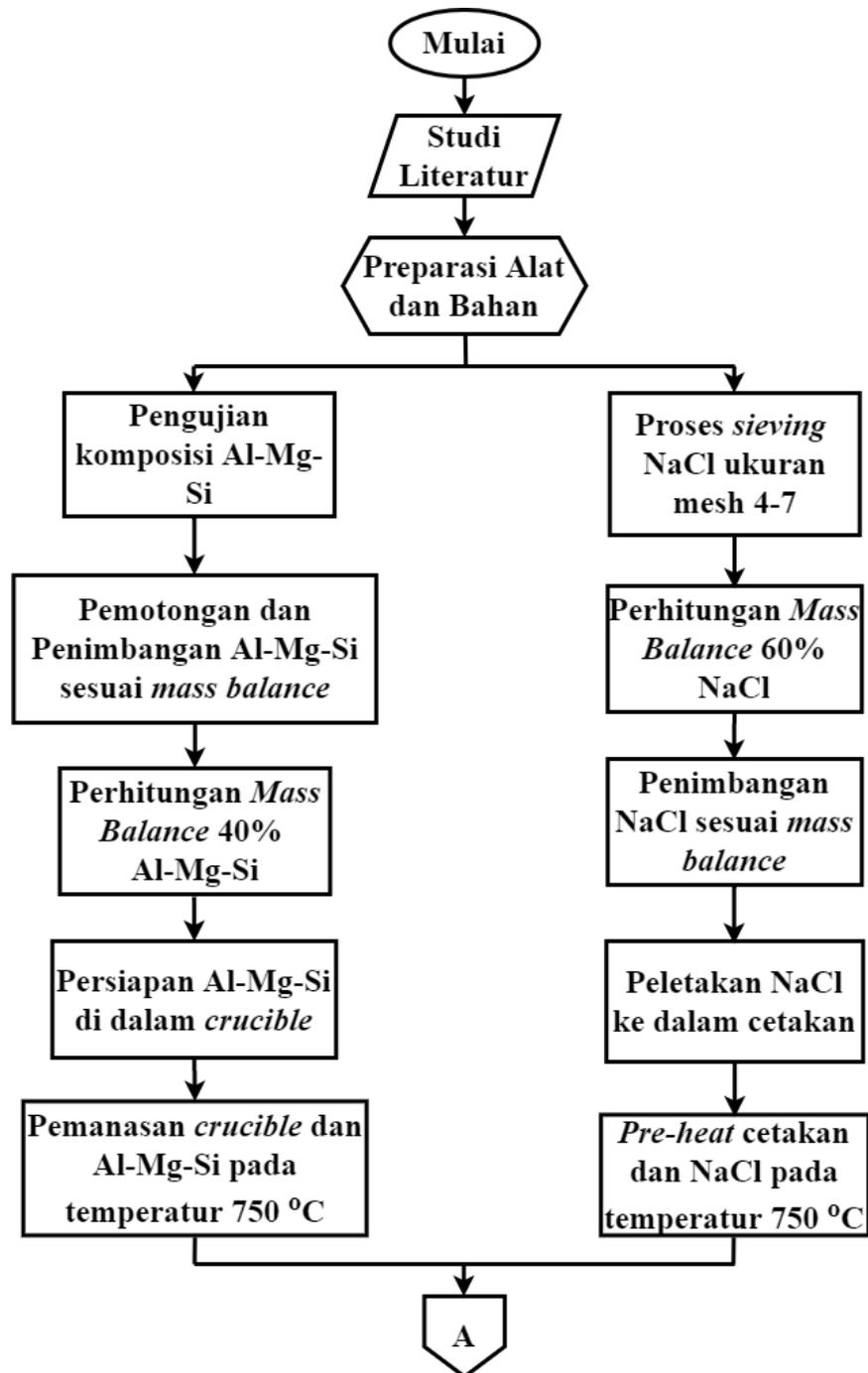
(Khan et al., 2018)	<i>Effect of Age Hardening and Quenching Media on Aluminium Foams</i>	<i>Solution Treatment</i> dilakukan pada temperatur 505 °C selama 60 menit. <i>Quenching</i> dengan air dan udara. <i>Artificial aging</i> pada 177 °C selama 5 jam, 10 jam, dan 20 jam. <i>Precipitation hardening</i> meningkatkan <i>compression strength</i> dari aluminium foam
(Yang et al., 2020)	<i>Effect of heat treatment on the microstructure, compressive property, and energy absorption response of the Al-Mg-Si alloy foams</i>	Paduan Al-Mg-Si foam dengan <i>space holder</i> carbamide sebanyak 60% dilakukan <i>heat treatment</i> dengan serangkaian <i>solution heat treatment</i> pada 495 hingga 585 °C dan ditahan selama 90 menit. Setelah <i>quenching</i> air, <i>aging</i> ditetapkan pada 190 °C selama 2 jam. Hasil terbaik dari energi absorb didapat saat temperatur <i>solution heat treatment</i> 555 °C.

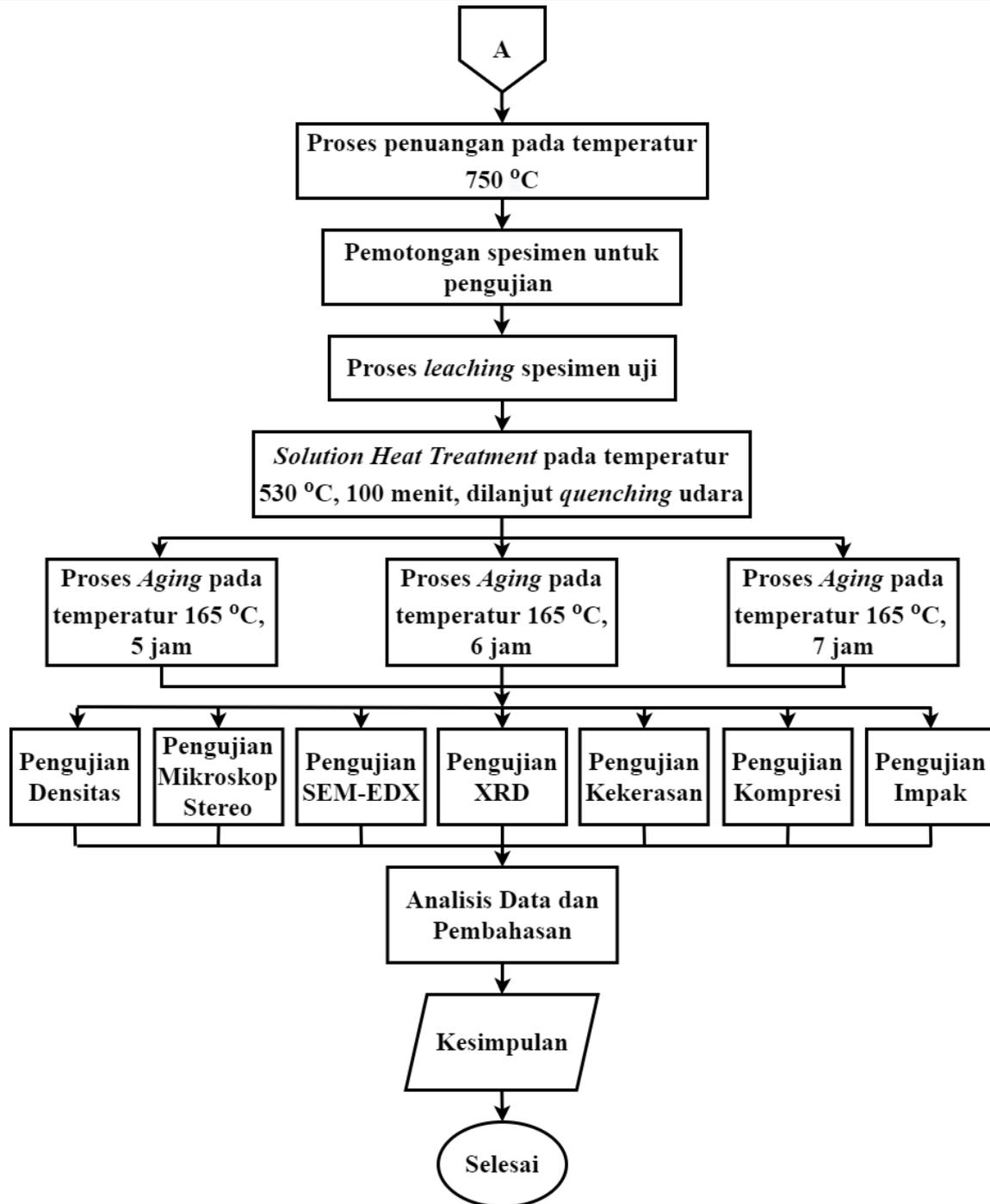
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

#### 1. Paduan Alumunium Mg-Si

Bahan baku yang digunakan adalah paduan alumunium Mg-Si yang didapat dari perusahaan penghasil dan memiliki sertifikat mengenai komposisi paduannya.



**Gambar 3.2** Paduan Al-Mg-Si

## 2. NaCl Kristal

NaCl yang digunakan dalam penelitian adalah NaCl yang berbentuk kristal dan berukuran 3 mm.



**Gambar 3.3** NaCl Kristal

## 3.3 Alat Penelitian

Alat yang digunakan untuk persiapan alat dan bahan adalah gergaji mesin untuk memotong bahan baku paduan Al-Mg-Si agar diperoleh ukuran yang dibutuhkan. Ayakan digunakan untuk menyaring ukuran *coarsed* NaCl dengan ukuran *mesh* 4 sampai 7. Timbangan digital digunakan untuk menimbang kebutuhan paduan Al-Mg-Si dan NaCl.

Alat yang digunakan untuk proses pengecoran adalah *burner* digunakan untuk meleburkan paduan Al-Mg-Si. *Crucible* dengan kapasitas 0,9L sebanyak 2 buah digunakan sebagai wadah untuk peleburan paduan Al-Mg-Si dan wadah *preheat* NaCl. *Thermocouple* digunakan untuk memastikan temperatur di dalam *burner*. *Thermogun* digunakan untuk memastikan temperatur penuangan paduan Al-Mg-Si ke *crucible* NaCl. Tang pencapit digunakan untuk mengangkat *crucible* dan menuangkan paduan Al-Mg-Si cair ke *crucible* NaCl. Pengaduk digunakan untuk meratakan NaCl dalam paduan Al-Mg-Si sebelum mengalami solidifikasi.

Alat yang digunakan untuk proses lanjutan yaitu gergaji tangan digunakan untuk memotong produk menjadi spesimen sesuai dengan standar pengujian. *Beaker glass* dan *magnetic stirrer* digunakan untuk proses *leaching*. *Heat treatment furnace* digunakan untuk memberikan perlakuan panas *solution treatment*. Oven universal digunakan untuk memberikan perlakuan panas *aging*. Kikir digunakan untuk membuat takik pada spesimen pengujian impak dan mengikir spesimen pengujian XRD menjadi serbuk

## 3.4 Instrumen karakterisasi Material

- a. *Spark – Optical Emission Spectrometry (Spark-OES)*

- Digunakan untuk menguji komposisi paduan dari bahan baku Al-Mg-Si.
- b. Mesin Uji Scanning *Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray* (SEM-EDX)  
Digunakan untuk menganalisis spesimen dengan melakukan scanning terhadap permukaannya serta untuk mengidentifikasi unsur aluminium, magnesium, dan silikon dan proporsi relatifnya. Mikroskop Stereo  
Mikroskop stereo yang digunakan dalam penelitian ini merupakan alat untuk pengamatan porositas pada paduan Al-Mg-Si. Alat ini merupakan milik Laboratorium Metalurgi Teknik Material dan Metalurgi ITS.
  - c. *X-Ray Diffraction* (XRD)  
Digunakan untuk mengetahui senyawa yang terkandung dalam sampel serta struktur dan ukuran kristalnya.
  - d. Alat Uji Kompresi  
Digunakan untuk mendapatkan data sifat mekanik dan ketahanan suatu bahan terhadap tekanan yang diberikan dan energi yang diserap.
  - e. Alat Uji Impak  
Digunakan untuk mengetahui ketahanan impak dan kekuatan impak yang mampu diserap oleh sampel.
  - f. Alat Uji Kekerasan  
Digunakan untuk mengetahui kekerasan pada sampel.

### 3.5 Metode Penelitian

Variable yang digunakan dalam penelitian *aluminium foam* ini yaitu *holding time* pada proses *Artificial Aging*. Terdapat beberapa proses yang dilakukan pada penelitian ini di antaranya yaitu studi literatur, proses pengecoran aluminium, dan proses perlakuan panas pada aluminium *foam*.

#### 3.5.1 Studi Literatur

Metode ini dilakukan untuk mempelajari mengenai karakteristik aluminium *foam* dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, dan penelitian sebelumnya mengenai aluminium *foam*.

#### 3.5.2 Pengecoran Aluminium Foam

Berikut ini adalah prosedur yang dilakukan untuk proses pengecoran aluminium *foam*.

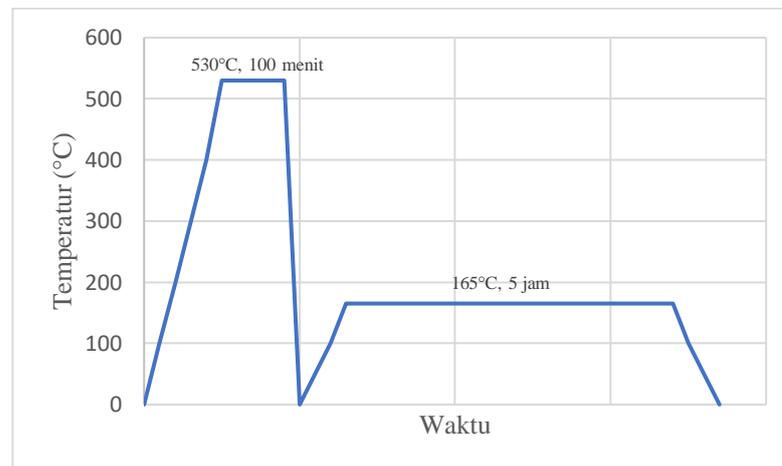
1. Preparasi alat dan bahan.
2. Bahan baku Al-Mg-Si diuji komposisi paduannya menggunakan *Spark-OES*.
3. Kristal NaCl diayak dan disaring untuk didapatkan ukuran seragam 3 mm.
4. Bahan baku aluminium Mg-Si dan NaCl ditimbang sesuai perhitungan *mass balance* 60% NaCl.
5. Aluminium Mg-Si dimasukkan ke dalam *crucible* dan NaCl kristal ditaburkan di dalam cetakan.
6. *Crucible* yang berisi bahan baku aluminium Mg-Si dimasukkan ke dalam *resistance furnace*.
7. *Burner* diatur untuk memanaskan *crucible* hingga temperatur 750° C.
8. Cetakan yang berisi kristal NaCl dipanaskan menggunakan kompor pemanas hingga temperatur 750° C.
9. Paduan Al-Mg-Si cair dituang ke dalam cetakan yang berisi kristal NaCl dengan temperatur tuang 750° C.
10. Paduan Al-Mg-Si cair didinginkan di dalam *permanent mold*.

11. Hasil coran yang telah solidifikasi dipotong untuk dilakukan proses *leaching* di dalam air pada temperatur  $90^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam untuk menghilangkan kristal  $\text{NaCl}$  yang ada di produk hasil cor.

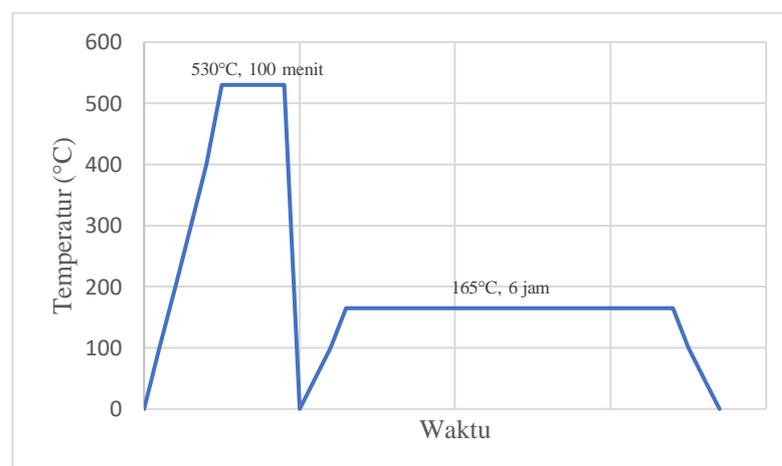
### 3.5.3 Heat Treatment

*Heat treatment* dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik aluminium *foam* khususnya *compression strength*. Berikut ini adalah prosedur untuk proses *heat treatment*.

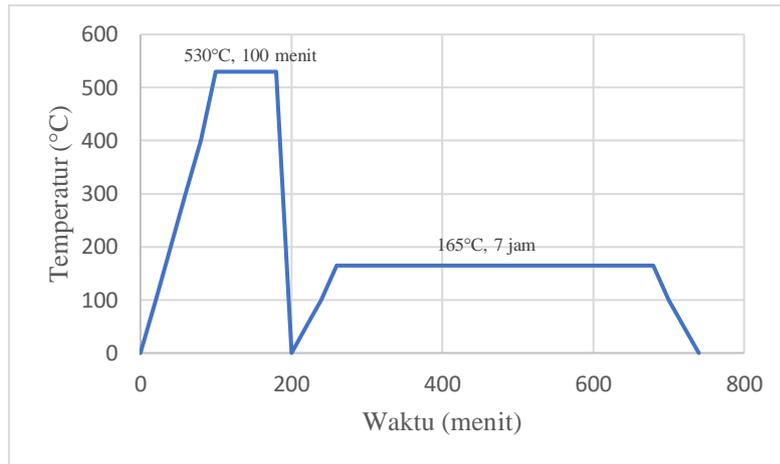
1. Sampel hasil *leaching* yang sudah berupa aluminium *foam* dikeringkan dan dimasukkan ke dalam *heat treatment furnace* untuk dilakukan *solution heat treatment* pada temperatur  $530^{\circ}\text{C}$  dengan *holding time* 100 menit.
2. Sampel dikeluarkan dari *furnace* dan dilakukan *air quenching* dengan cara mengalirkan udara dari kompresor.
3. Sampel diuji kompresi untuk didapatkan nilai *compression strength* terbaik.
4. Sampel dimasukkan kembali ke dalam *heat treatment furnace* untuk dilakukan proses *aging* pada temperature  $165^{\circ}\text{C}$  dengan variasi *holding time* 5 jam, 6 jam, dan 7 jam.
5. Sampel dikeluarkan dari *furnace* dan didinginkan di temperatur ruang.



**Gambar 3.4** Perlakuan panas aluminium *foam* (variasi *holding time artificial aging* 5 jam)



**Gambar 3.5** Perlakuan panas aluminium *foam* (variasi *holding time artificial aging* 6 jam)



Di mana:

$d_{\text{spacing}}$  = Jarak antar layer (Å)

$a$  = Parameter kisi (Å)

$\lambda$  = Panjang gelombang sinar X (0,154 nm)

$\beta$  = FWHM (rad)

$\theta$  = Sudut *Bragg* (°)

### 3.6.3 Pengujian *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)*

Pengujian SEM-EDX bertujuan untuk mengkarakterisasi struktur aluminium *foam* secara mikroskopis. EDX dilakukan untuk menganalisis proporsi Mg dan Si. Ada tahapan yang harus dilakukan untuk pengujian metalografi. Tahap pertama adalah menghaluskan permukaan spesimen dengan cara mengamplasnya dari *grade* 80 hingga *grade* 2000. Tahap kedua yaitu pemolesan permukaan spesimen menggunakan autosol hingga semua *scratch* hilang. Selanjutnya dilakukan pengetsaan aluminium *foam* dengan menggunakan etsa keller's. Pengetsaan dilakukan selama 15 detik. Setelah pengetsaan spesimen dapat diamati menggunakan mesin SEM-EDX. Pengujian SEM-EDX dilakukan di Laboratorium Instrumen UPN Veteran Surabaya.

### 3.6.4 Pengujian Mikroskop Stereo

Pengujian struktur makro dari aluminium *foam* yang terbentuk menggunakan Mikroskop Stereo. Pengujian ini menggunakan spesimen hasil pengujian impak. Pengujian ini menggunakan mikroskop stereo Zeiss Stemi DV4 dengan perbesaran 10x

### 3.6.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan bertujuan untuk menganalisis peningkatan nilai kekerasan yang dimiliki aluminium *foam* yang telah diberi perlakuan panas dan dibandingkan dengan nilai kekerasan aluminium *foam* yang tidak diberi perlakuan panas. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan mesin uji *Vickers* yang terdapat di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pengujian kekerasan dilakukan dengan cara mengindentasi sebanyak 4 titik pada masing-masing spesimen.

### 3.6.6 Pengujian Kompresi

Pengujian kompresi dilakukan dengan memberi beban tekan yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan tekan dari aluminium *foam* yang telah diberi perlakuan panas. Sampel berbentuk kubus dengan ukuran 2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm (Rivera et al., 2019). Dimensi ini sesuai standar ISO13314 dengan syarat minimum ukuran dimensi pengujian kompresi untuk *cellular materials* yaitu minimum 10x ukuran rata-rata porositas atau lebih dari 10 mm. Untuk mencari nilai tegangan dan regangan digunakan Persamaan 3.5 dan 3.6 sebagai berikut.

$$\sigma = F/A_0 \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \quad (3.6)$$

### 3.6.7 Pengujian Impak

Uji impak dilakukan untuk mengamati kemampuan *foam* aluminium yang diberi perlakuan panas dalam menyerap energi. Kemampuan ini harus dimiliki oleh *crash box*. Dimensi sampel yang digunakan adalah 10mm x 10mm x 55mm sesuai dengan standar ASTM E23. Alat yang khusus digunakan untuk material non-ferrous yang memenuhi standar ISO179-1992, dengan bandul energi 12J dan kecepatan tumbukan 1,9m/s. Data yang diperoleh adalah sudut akhir bandul setelah mengenai sampel. Setelah itu dilakukan perhitungan besarnya energi yang diserap oleh sampel uji dan kekuatan impak.

$$IE = mgL (\cos(\beta) - \cos(\alpha)) \quad (3.7)$$

$$IS = \frac{IE}{A} \quad (3.8)$$

Dengan,

IE = energi impak (J)

IS = kekuatan impak (kJ/m<sup>2</sup>)

m = massa bandul (kg)

g = gaya gravitasi (9,8 m/s<sup>2</sup>)

L = panjang bandul (m)

A = luasan daerah di bawah tatik (m<sup>2</sup>)

### 3.7 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan dan jadwal penelitian pada penelitian kali ini yaitu sebagai berikut.

**Tabel 3.1** Rancangan Penelitian

Perlakuan		Sampel				
		Al Bulk	TP	AA5	AA6	AA7
Heat Treatment	Temperatur SHT (°C)	-	-	530	530	530
	Holding Time SHT (menit)	-	-	100	100	100
	Pendinginan	-	-	Quench udara	Quench udara	Quench udara
	Temperatur Aging (°C)	-	-	165	165	165
	Holding Time Aging (jam)	-	-	5	6	7
	Pendinginan	-	-	udara	udara	udara
Pengujian	Spark-OES	✓	-	-	-	-
	Densitas dan Porositas	-	✓	✓	✓	✓
	Mikroskop Stereo		✓	✓	✓	✓
	SEM-EDX		✓	✓	✓	✓
	XRD	-	✓	✓	✓	✓
	Kekerasan		✓	✓	✓	✓
	Kompresi	-	✓	✓	✓	✓
	Impak	-	✓	✓	✓	✓

**Tabel 3.2** Jadwal Penelitian

Kegiatan	Bulan																			
	Maret				April				Mei				Juni				Juli			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur																				
Asistensi																				
Persiapan Alat dan Bahan																				
Pengujian Komposisi																				
Pengecoran Aluminium Foam																				
Heat Treatment																				
Pengujian Densitas dan Porositas																				
Pengujian Metalografi																				
Pengujian SEM-EDX																				
Pengujian XRD																				
Pengujian Kompresi																				
Pengujian Impak																				
Analisis Data dan Pembahasan																				
Penyusunan Laporan Akhir																				

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengujian Komposisi

Berikut adalah hasil dari uji komposisi bahan paduan Al-Mg-Si (6061) menggunakan *Spark - Optical Emission Spectroscopy (Spark-OES)* yang disajikan pada Tabel 4.1.

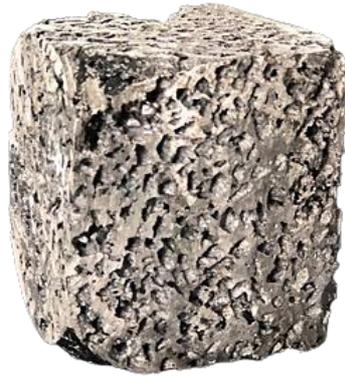
**Tabel 4.1** Hasil uji komposisi paduan Al-Mg-Si (6061)

Elemen Paduan	Hasil Uji Komposisi (%)	ASTM Handbook Vol 2
Al	<i>Balanced</i>	<i>Balanced</i>
Si	0,612	0,4 – 0,8
Mg	0,753	0,8 – 1,2
Fe	0,227	0,7 <i>max</i>
Cu	0,289	0,15 – 0,4
Mn	0,0132	0,15 <i>max</i>
Cr	0,0936	0,04 – 0,35
Zn	0,0181	0,25 <i>max</i>

Dari hasil pengujian komposisi bahan yang digunakan tersebut jika dibandingkan dengan standar paduan Al-Mg-Si (6061) sesuai dengan *ASTM HANDBOOK VOLUME 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, terdapat perbedaan pada komposisi Mg yaitu sebesar 0,047% dari batas minimumnya 0,8% Mg. Diketahui bahwa penambahan unsur Mg pada aluminium dapat menaikkan sifat mekaniknya yaitu kekuatan tanpa menurunkan keuletan yang signifikan (N. Rafael, Adams. J.H., 1990). Paduan Al-Mg-Si (6061) merupakan paduan *heat treatable* yang akan dilakukan proses *heat treatment precipitation hardening*. Pada perlakuan panas *precipitation hardening*, Mg merupakan unsur penting yang harus diperhatikan, karena tujuan akhir dari proses tersebut adalah untuk didaparkannya senyawa *intermetallic* yaitu  $Mg_2Si$ , sehingga persentase komposisinya perlu diperhatikan. Maka dari itu, dengan adanya perbedaan komposisi Mg yang signifikan dari bahan yang digunakan dapat mempengaruhi kadar Mg yang akan terpresipitasi saat dilakukannya *precipitation hardening*, dan juga sedikit menurunkan kekuatannya dibandingkan dengan paduan Al-Mg-Si (6061) yang sesuai dengan standar *ASTM*.

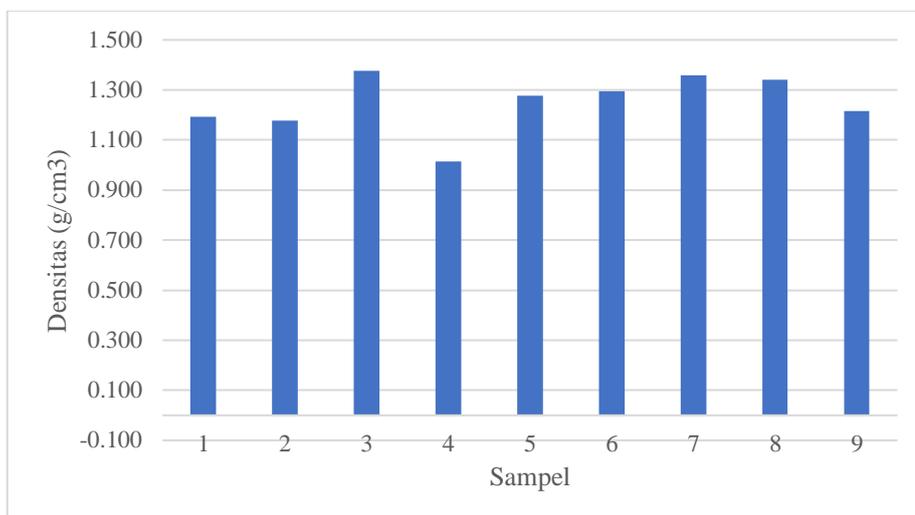
### 4.2 Hasil Pengujian Densitas dan Porositas

Pengujiann densitas dilakukan dengan mencari massa (m) dan volume (V) dari spesimen yang akan dicari densitasnya. Spesimen yang digunakan berbentuk kubus dengan ukuran yaitu sebesar 2 cm x 2 cm x 2 cm sebanyak 9 sampel yang didapatkan dari hasil pemotongan hasil coran yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 sebagai berikut.

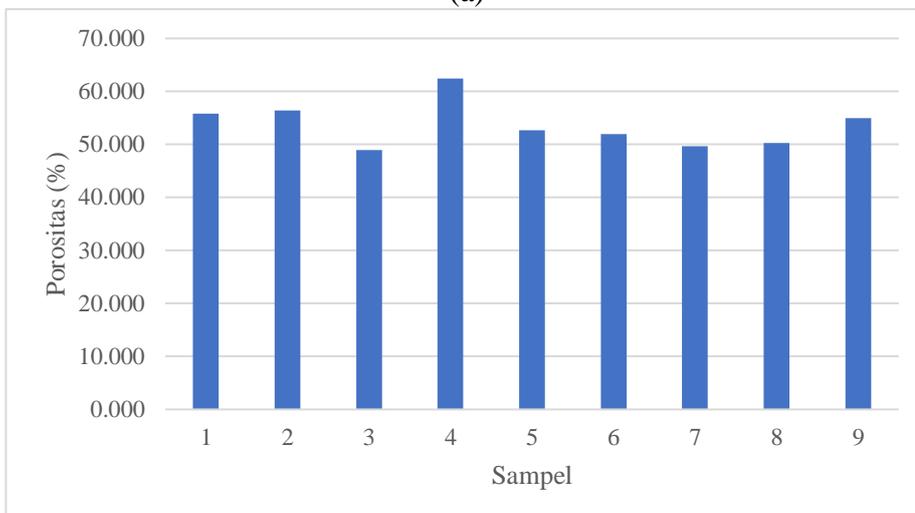


**Gambar 4.1** Spesimen hasil coran paduan Al-Mg-Si *foam*

Perhitungan untuk mendapatkan densitas dilakukan sesuai dengan persamaan 3.1 dengan membagi massa terhadap volumenya. Untuk porositas, perlu dicari densitas relatifnya terlebih dahulu sesuai dengan persamaan 3.2, yang kemudian akan dimasukkan ke dalam persamaan 3.2 untuk mencari nilai porositasnya. Hasil dari uji densitas dan porositas disajikan dalam gambar 4.3 sebagai berikut.



(a)



(b)

**Gambar 4.2** Hasil uji (a) densitas dan (b) porositas

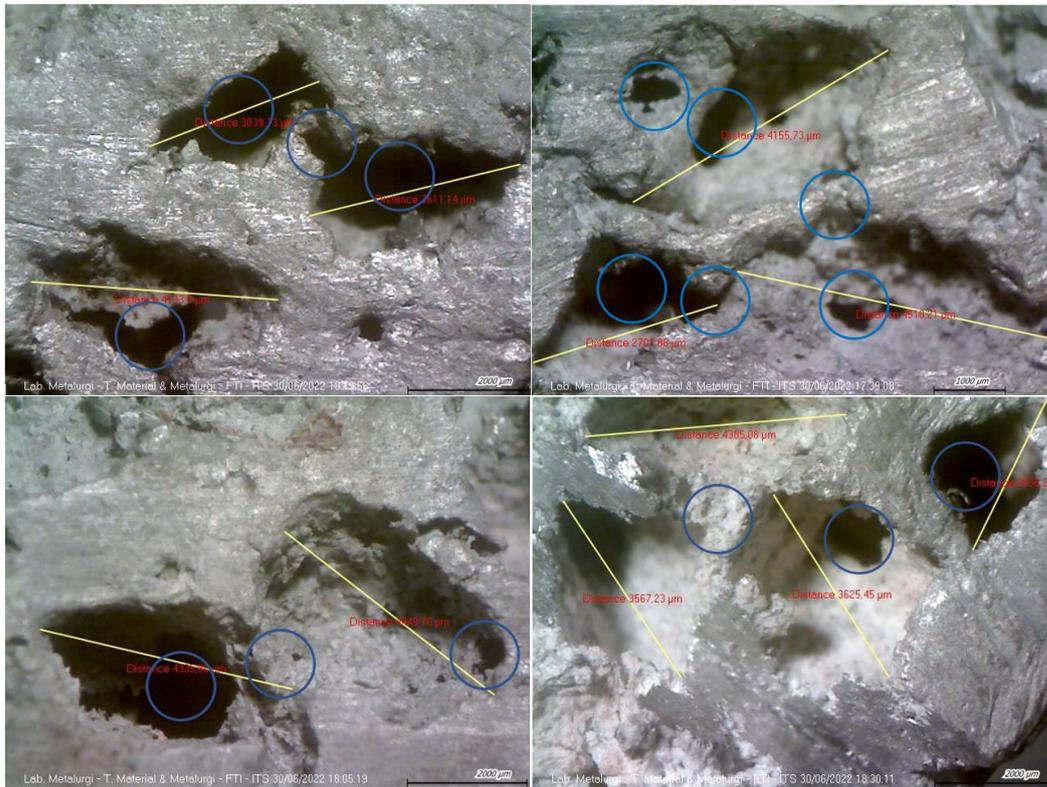
Dapat dilihat dari Gambar 4.2 di atas, nilai persentase porositas dan densitas didapatkan dari hasil uji yang dilakukan pada 9 sampel, sehingga untuk porositas memiliki nilai berkisar antara 48,981 – 62.43% dengan nilai paling rendah sebesar 48,981% dan paling tinggi sebesar 62.43%. Dari kisaran persentase porositas tersebut didapat nilai rata-rata total dari porositas sampel uji sebesar 53.687%. Terbentuknya porositas akan menurunkan nilai densitas dari aluminium jika dibandingkan dengan densitas pada aluminium *bulk* yang tidak memiliki poros. Untuk densitas didapat nilai berkisar antara 1.014 – 1.377 g/cm<sup>3</sup>. Maka, nilai rata-rata total dari densitas didapat sebesar 1.2504 g/cm<sup>3</sup>.

Dari 9 sampel dapat dilihat memiliki nilai persentase porositas maupun densitas yang berbeda. Persentase porositas dan densitas yang berbeda dari masing-masing spesimen dapat terjadi akibat adanya perbedaan densitas antara aluminium dan NaCl dengan perbandingan nilai densitas untuk aluminium sebesar 2.7 g/cm<sup>3</sup>, sedangkan untuk NaCl sebesar 2.165 g/cm<sup>3</sup>, sehingga NaCl memiliki nilai densitas lebih rendah dibandingkan aluminium. NaCl merupakan *space holder* yang memiliki peran sebagai pembentuk *foam* pada matriks aluminium akan berperan penting terhadap karakteristik *foam* yang akan terbentuk. Dengan digunakannya metode pengecoran *open mold* menggunakan *space holder* (NaCl) sebagai pembentuk poros, lebih rendahnya densitas NaCl tersebut akan berdampak pada saat dilakukannya penuangan lelehan aluminium ke dalam cetakan yang berisikan NaCl, maka NaCl akan tersebar secara tidak merata. Persebaran NaCl yang tidak merata juga dapat terjadi karena nilai viskositas dari lelehan aluminium yang rendah akibat tingginya temperatur penuangan yaitu 750°C. Dengan kondisi tersebut, ketika berjalannya proses pendinginan aluminium hingga menjadi padat, butiran NaCl akan mudah tersebar secara tidak merata di dalam matriks akibat dari lebih rendahnya densitas NaCl dibandingkan aluminium serta rendahnya viskositas lelehan aluminium. Maka, NaCl yang tersebar tidak merata tersebut akan menyebabkan terbentuknya poros yang tidak merata juga, sehingga menyebabkan masing-masing 9 sampel uji dari hasil coran yang sama akan memiliki nilai porositas dan densitas yang berbeda karena persebaran porositas yang tidak merata pada tiap sampel tersebut

Berdasarkan kondisi tersebut juga yang menyebabkan rata-rata total dari densitas didapat sebesar 1.2504 g/cm<sup>3</sup> masih berada di atas densitas aluminium *foam* komersial yaitu sebesar 0.3-1 g/cm<sup>3</sup> (Ashby et al., 2016). Namun jika dilihat berdasarkan batas paling rendah dari nilai densitas yang didapatkan yaitu 1.014 g/cm<sup>3</sup> hanya terdapat perbedaan sebesar 0.014 g/cm<sup>3</sup>, lebih tinggi dari batas atas densitas aluminium *foam* komersial yaitu 1 g/cm<sup>3</sup>. Sedangkan untuk nilai persentase porositas rata-rata total yaitu sebesar 53.687% masih terdapat dalam kategori persentase porositas komersial aluminium foam yang diproduksi dengan metode pengecoran lelehan aluminium menggunakan *space holder* yaitu ≤65% (Banhart, 2001) dan hanya berbeda sekitar 2.57% dengan batas maksimumnya jika dilihat dari persentase porositas tertinggi yang di dapatkan yaitu 62.43%. Berdasarkan penelitian yang dilakukan (Z. Hussain, 2011), dengan komposisi NaCl sebesar 60% didapatkan nilai densitas dan porositas sebesar 1.4 g/cm<sup>3</sup> dan 48.15%. Jika dibandingkan dengan penelitian ini, nilai densitas maupun persentase porositas yang didapat masih lebih baik yaitu 1.2504 g/cm<sup>3</sup> dan 53.687%.

### 4.3 Hasil Pengujian Mikroskop Stereo

Pengujian mikroskop stereo dilakukan untuk mengetahui ukuran dan jenis porositas yang terbentuk pada aluminium *foam*. Mikroskop yang digunakan adalah Mikroskop Stereo Zeiss Stemi DV4 dengan 10x perbesaran yang sebelumnya telah dilakukan kalibrasi agar pengukuran lebih akurat. Berikut adalah Gambar 4.3 yang menunjukkan hasil dari mikroskop stereo yang telah dilakukan.



**Gambar 4.3** Hasil pengamatan mikroskop stereo yang dilakukan untuk 4 sampel yang dipilih *random*

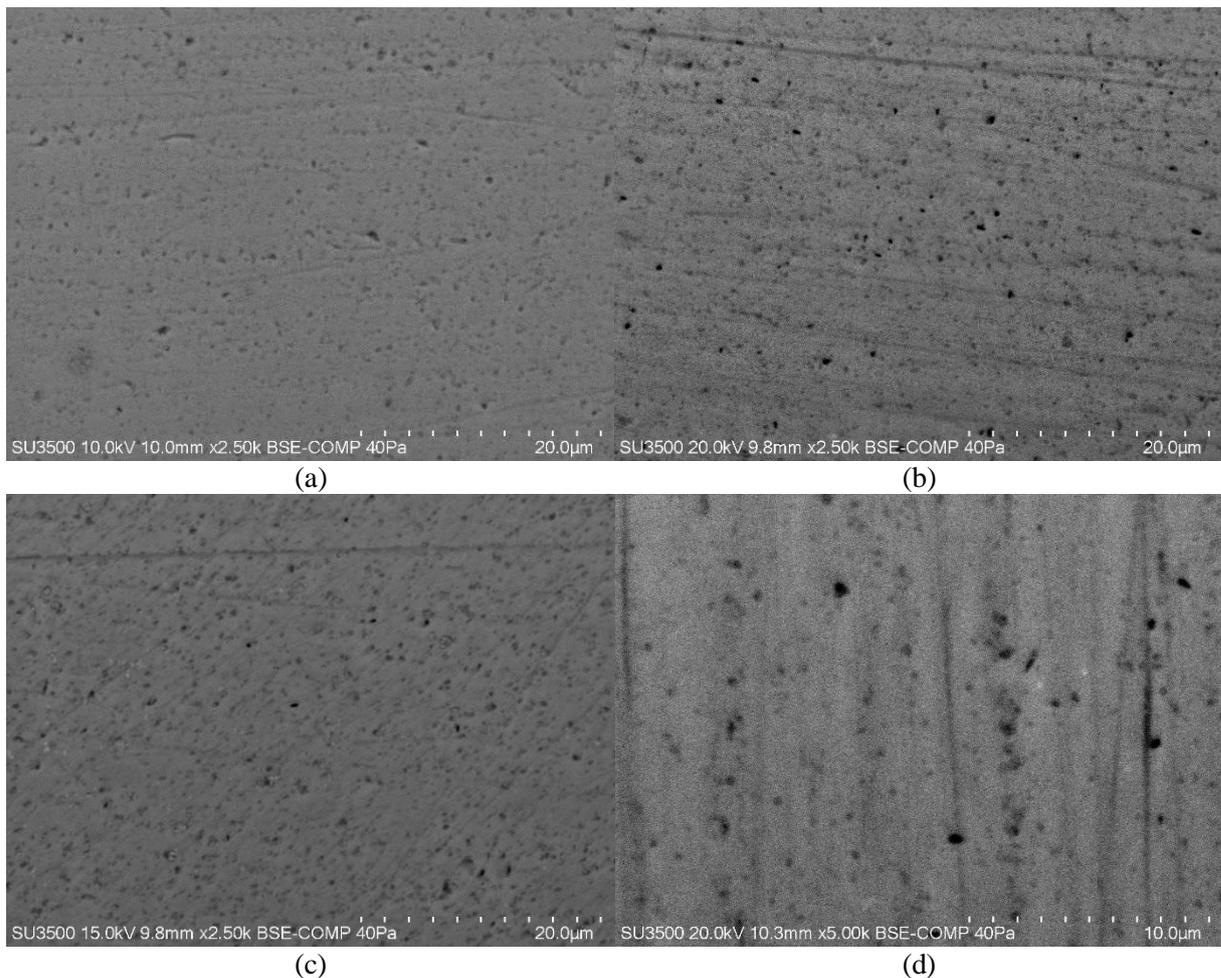
Dapat diamati dari Gambar 4.3 hasil pengujian stereo yang telah dilakukan untuk 4 sampel yang digunakan, ukuran pori yang terbentuk memiliki nilai bervariasi yang ditandai dengan garis kuning hasil pengukuran dari aplikasi untuk mikroskop stereo yang digunakan. Untuk sampel 1 memiliki rentang ukuran pori dengan nilai 3,039 mm – 4,335 mm, untuk sampel 2 memiliki rentang ukuran pori dengan nilai 3,109 mm – 4,510 mm, untuk sampel 3 memiliki rentang ukuran pori dengan nilai 4,335 mm – 4,449 mm, dan untuk sampel 4 memiliki rentang ukuran pori dengan nilai 2,701 mm – 4,385 mm. Sehingga, jika dilihat dari 4 sampel yang telah diuji, ukuran pori yang terbentuk pada aluminium *foam* memiliki rentang nilai 2,701 mm – 4,510 mm dengan ukuran pori terkecil sebesar 2,701 mm dan terbesar sebesar 4,510 mm. Berdasarkan ukuran NaCl yang digunakan dengan rentang ukuran sebesar 2,83 mm – 4,78 mm yang disaring menggunakan ayakan berukuran mesh 4 – 7, ukuran pori yang terbentuk mengindikasikan ukuran NaCl yang digunakan sebagai *space holder* pembentuk pori. Hasil dari ukuran pori yang diamati menggunakan mikroskop stereo menunjukkan ukuran pori dari aluminium *foam* berbanding dengan ukuran partikel NaCl yang digunakan (Lias et al., 2016).

Dari hasil pengamatan karakteristik pori yang terbentuk pada aluminium *foam* juga menunjukkan terbentuknya pori yang saling berhubungan (*interconnected*). Karakteristik pori yang saling berhubungan ini menandakan jenis aluminium *foam* berdasarkan sel pori yang terbentuk termasuk dalam jenis *open cell* aluminium *foam*. Struktur pori yang saling terhubung pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 yang ditandai dengan lingkaran berwarna biru. Terbentuknya struktur *interconnected* antara pori satu dengan lainnya terjadi akibat partikel NaCl yang saling bersentuhan satu sama lain sehingga pori yang terbentuk saat NaCl dihilangkan akan menghasilkan pori yang menyatu dengan pori lainnya. Penjelasan tersebut didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh (Pimiento et al., 2015)

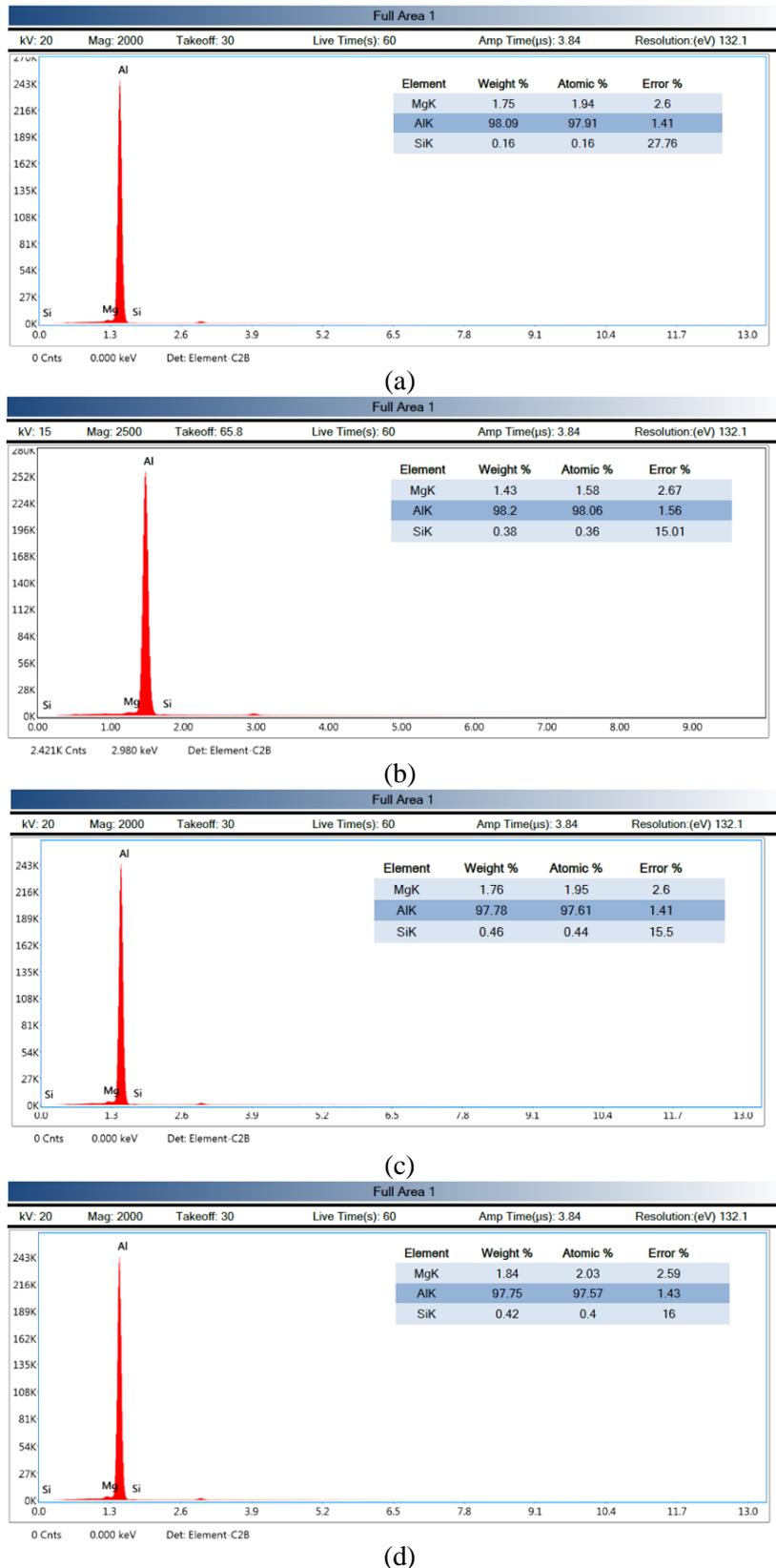
bahwa sel pori yang saling berhubungan terbentuk karena terjadinya kontak antara partikel NaCl dan imobilitasnya ketika ditempatkan pada cetakan. Semakin banyak kontak NaCl yang terjadi maka akan semakin banyak sel *interconnected* yang terbentuk ketika NaCl dilakukan proses *leaching*.

#### 4.4 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-Ray*

Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk menganalisis struktur yang terdapat pada permukaan spesimen dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) dilakukan untuk mengetahui unsur yang terdapat pada permukaan hasil pengamatan SEM yang dilakukan. Berikut adalah hasil dari pengujian SEM-EDX yang disajikan pada Gambar 4.4 dan 4.5.



**Gambar 4.4** Hasil pengujian SEM, (a) Non-HT perbesaran 2.5k, (b) AA5 perbesaran 2.5k, (c) AA6 perbesaran 2.5k, dan (d) AA7 prbesaran 2.5k



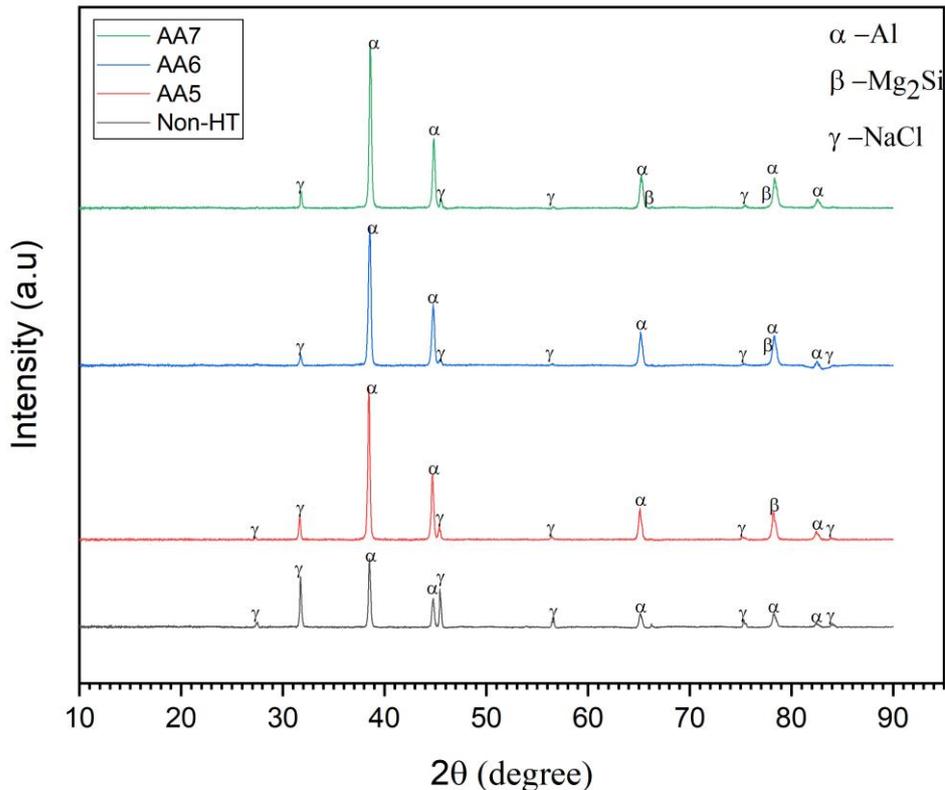
**Gambar 4.5** Hasil pengujian EDX, (a) Non-HT, (b) AA5, (c) AA6, dan (d) AA7

Dapat diamati untuk semua jenis sampel baik Non-HT, AA5, AA6, maupun AA7 tidak memiliki perbedaan yang jauh dari hasil pengamatan SEM (Gambar 4.4) yang dilakukan yaitu

terdapat bintik hitam yang berukuran sangat kecil berukuran  $\leq 1 \mu\text{m}$  yang terbentuk dan tersebar di dalam matriks aluminium. Daerah gelap yang terdapat pada matriks aluminium terdiri atas senyawa tidak terlarut paduan kompleks dan beberapa partikel *intermetallic* (Gavali et al., 2003). Jika dilihat berdasarkan hasil EDX pada Gambar 4.5 yang telah dilakukan, unsur yang terdeteksi pada *peak* adalah Al, Mg, dan Si. Maka jika dilihat kembali dari hasil pengujian SEM yang dilakukan, daerah terang merupakan matriks aluminium ditunjukkan dengan unsur Al dan daerah gelap yang terbentuk merupakan Mg dan Si. Dapat dilihat juga kadar Mg dan Si yang terbentuk pada spesimen yang dilakukan perlakuan panas memiliki nilai yang relatif lebih tinggi dibandingkan spesimen yang tidak dilakukan perlakuan panas. Dengan kadar Si yang semakin meningkat, yaitu dengan nilai untuk spesimen Non-HT, AA5, AA6, dan AA7 berturut-turut sebesar 0,16 wt%, 0,38 wt%, 0,46 wt%, dan 0,42 wt%, spesimen Non-HT akan memiliki senyawa *intermetallic* yang lebih rendah jika diasumsikan semua Si yang terdeteksi bereaksi penuh membentuk senyawa *intermetallic* dibandingkan dengan spesimen yang dilakukan *heat treatment*. Berdasarkan (ASM International®, 1991), rasio Mg dan Si pada senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si adalah 1,73:1. Sehingga jika dihitung berdasarkan rasio tersebut dengan asumsi unsur Si sepenuhnya berikatan dengan Mg maka, Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk untuk masing-masing spesimen baik NonHT, AA5, AA6, dan AA7 memiliki nilai berturut-turut sebesar 0,437 wt%, 1,037 wt%, 1,256 wt%, dan 1,147 wt%. Dengan semakin tingginya Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk untuk spesimen yang dilakukan perlakuan panas akan berdampak pada meningkatnya kekuatan maupun kekerasannya. Sejalan dengan tujuan dilakukannya *precipitation hardening* yaitu untuk mendapatkan *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si pada akhir prosesnya, dapat dicurigai bahwa Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk merupakan hasil dari perlakuan panas yang dilakukan. Sedangkan pada spesimen Non-HT, Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk merupakan hasil dari pendinginan lambat saat setelah dilakukannya pengecoran. mikrostruktur dari paduan aluminium hasil coran terdiri dari sebagian paduan utama yang terlarut dalam matriks *solid solution* aluminium dan sebagian membentuk fasa *intermetallic* bersama aluminium atau unsur logam lainnya hasil dari pendinginan lambat yang terjadi (Grażyna et al., 2021).

#### 4.5 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan menggunakan alat uji yang terdapat di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material FTIRS-ITS yaitu PANalytical Xpert Pro untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada sampel yang digunakan. Sampel pengujian XRD berupa serbuk dan hasilnya berupa data yang selanjutnya dianalisis menggunakan aplikasi *Highscore Plus – PANalytical* untuk menentukan *peak* dan mengidentifikasi unsur yang terbentuk dengan menggunakan *database* sesuai standar ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). Spesimen yang diuji adalah specimen tanpa perlakuan, AA5, AA6, dan AA7. Berikut adalah Gambar 4.8 hasil dari unsur yang terdapat pada masing-masing *peak* untuk masing-masing jenis spesimen.



**Gambar 4.6** Hasil uji XRD

Grafik hasil pengujian XRD pada Gambar 4.8 menunjukkan unsur dan senyawa yang sesuai dengan *peak* yang terbentuk pada aluminium *foam* adalah  $\alpha$ -Al,  $Mg_2Si$ , dan NaCl. Keberadaan *peak*  $\alpha$ -Al dengan *reference pattern*: 00-004-0787 memiliki indeks Miller dari *peak* yang terbentuk yaitu (111), (200), (220), (311), dan (222) yang terletak untuk spesimen Non-HT terletak pada  $2\theta$  dengan nilai  $38.476^\circ$ ,  $44.755^\circ$ ,  $65.180^\circ$ ,  $78.204^\circ$ , dan  $82.420^\circ$ . Untuk spesimen AA5 terletak pada  $2\theta$  dengan nilai  $38.447^\circ$ ,  $44.709^\circ$ ,  $65.036^\circ$ ,  $78.201^\circ$ , dan  $82.418^\circ$  untuk spesimen AA6 terletak pada  $2\theta$  dengan nilai  $38.467^\circ$ ,  $44.781^\circ$ ,  $65.165^\circ$ ,  $78.302^\circ$  dan  $82.390^\circ$ . Untuk spesimen AA7 terletak pada  $2\theta$  dengan nilai  $38.420^\circ$ ,  $44.747^\circ$ ,  $65.109^\circ$ , dan  $78.276^\circ$ . Sedangkan untuk senyawa NaCl dengan *reference pattern*: 00-005-0628, pada spesimen Non-HT, NaCl terdeteksi pada posisi  $2\theta$  dengan nilai  $27.365^\circ$ ,  $31.682^\circ$ ,  $45.389^\circ$ ,  $53.890^\circ$ ,  $56.58^\circ$ ,  $66.180^\circ$ ,  $75.273^\circ$ , dan  $83.962^\circ$ . Untuk spesimen AA5 terdeteksi pada posisi  $2\theta$  dengan nilai  $27.321^\circ$ ,  $31.682^\circ$ ,  $45.396^\circ$ ,  $56.393^\circ$ ,  $66.147^\circ$ ,  $75.201^\circ$ , dan  $83.901^\circ$ . Untuk spesimen AA6 terdeteksi pada posisi  $2\theta$  dengan nilai  $27.435^\circ$ ,  $31.760^\circ$ ,  $45.511^\circ$ ,  $56.567^\circ$ ,  $75.302^\circ$ , dan  $84.040^\circ$ . Dan untuk spesimen AA7 terdeteksi pada posisi  $2\theta$  dengan nilai  $31.768^\circ$ ,  $45.473^\circ$ ,  $56.492^\circ$ ,  $66.201^\circ$ ,  $75.377^\circ$ , dan  $83.967^\circ$ . Sedangkan untuk senyawa  $Mg_2Si$  dengan *reference pattern*: 00-035-0773 terbentuk pada semua jenis spesimen yang dilakukan *heat treatment* namun tidak untuk spesimen Non-HT. Dapat diketahui  $Mg_2Si$  yang terbentuk memiliki posisi yang bervariasi untuk masing-masing spesimen yaitu untuk spesimen AA5 dan AA6 terdapat pada posisi  $2\theta$  dengan nilai  $78.204^\circ$ , dan  $78.306^\circ$  sedangkan untuk spesimen AA7 terdapat pada posisi  $2\theta$  dengan nilai  $65.68^\circ$ , dan  $78.276^\circ$ .

Berikut adalah Tabel 4.2 berupa parameter hasil perhitungan data XRD dari  $\alpha$ -Al yang diambil dari intensitas tertinggi berdasarkan data yang didapatkan.

**Tabel 4.2** Parameter  $\alpha$ -Al berdasarkan hasil grafik XRD yang terbentuk

Spesimen	$2\theta$	$d$ -spacing (Å)	Lattice constant(Å)	FWHM
Non-HT	38,476°	2,3378	4,049	0,2040
AA5	38,447°	2,3395	4,052	0,1171
AA6	38,467°	2,3384	4,050	0,2007
AA7	38,420°	2,3411	4,054	0,2342

Berdasarkan Tabel 4.2 dapat dilihat specimen yang dilakukan perlakuan panas memiliki nilai FWHM yang relatif meningkat. Peningkatan nilai FWHM dapat diindikasikan dengan meningkatnya kekerasan dan banyaknya cacat sehingga dapat meningkatkan tegangan tarik dari material tersebut (Widyastuti et al., 2019). Meningkatnya nilai kekerasan tersebut merupakan efek terbentuknya *intermetallic* hasil dari perlakuan panas yang dilakukan, pada penelitian ini yaitu Mg<sub>2</sub>Si. Akibatnya, kehadiran partikel *intermetallic* menyebabkan terbentuknya tegangan *internal* dalam matriks yang mengelilingi partikel koheren sehingga memberikan kekuatan yang lebih tinggi dengan menghalangi dan memperlambat pergerakan dislokasi (ASM International®, 1991). Dapat dilihat juga terdeteksinya  $\alpha$ -Al yang berbeda untuk tiap specimen mengindikasikan terdapatnya senyawa *intermetallic* yang terbentuk di dalam matriks aluminium. Terjadinya pergeseran sudut difraksi ( $2\theta$ ) untuk sampel yang dilakukan *aging* menunjukkan adanya fase presipitasi yang terbentuk (Y. Chen et al., 2020).

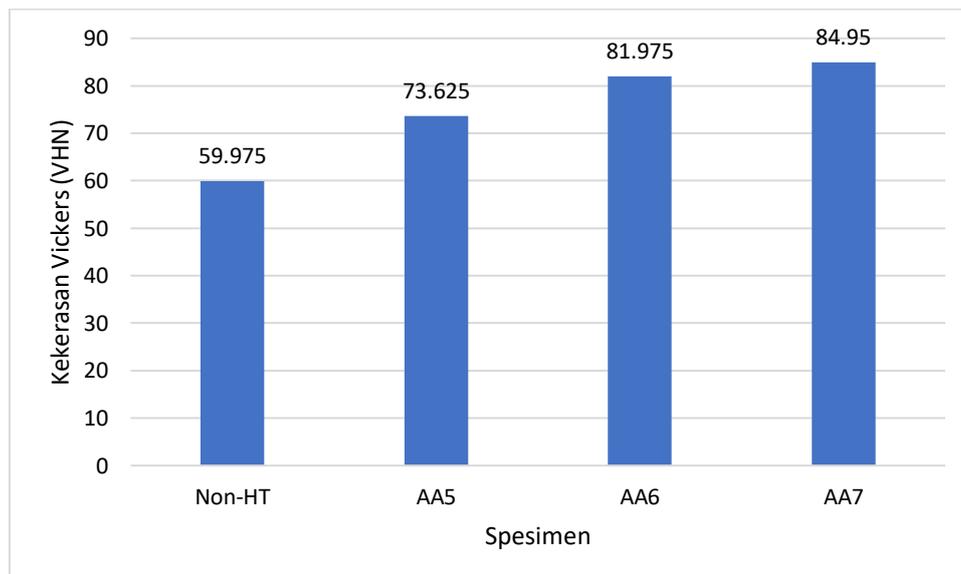
Adapun perbedaan-perbedaan penting yang dapat dilihat dari hasil uji XRD yang telah dilakukan yaitu terdapatnya senyawa Mg<sub>2</sub>Si untuk specimen yang telah melalui proses *heat treatment*. Proses *heat treatment* yang dilakukan untuk specimen AA5, AA6, maupun AA7 yaitu *precipitation hardening* dengan tujuan utamanya adalah untuk membentuk senyawa *intermetallic* yang dapat meningkatkan kekuatannya, senyawa Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk pada specimen ini adalah *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si, sehingga dengan terbentuknya Mg<sub>2</sub>Si yang disajikan pada hasil pengujian XRD pada penelitian ini menunjukkan berhasilnya proses *heat treatment* yang dilakukan baik pada specimen AA5, AA6, maupun AA7 untuk mendapatkan *intermetallic* tersebut. Namun, terdapat perbedaan yaitu pada specimen AA5 dan AA6 yang menunjukkan keberadaan Mg<sub>2</sub>Si hanya terdeteksi pada satu posisi pada *peak* yang terbentuk jika dibandingkan dengan specimen AA7 yang terdapat pada 2 *peak* yang terbentuk. (Grażyna et al., 2021) menunjukkan *intermetallic* dominan dalam jumlah yang terbentuk dapat dilihat pada jumlah *peak* yang terbentuk pada grafik XRD. Hal tersebut dapat menandakan senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang terdeteksi hanya pada 1 posisi *peak* pada grafik XRD untuk specimen AA5 dan AA6 dengan waktu *aging* selama 5 jam dan 6 jam masih belum terbentuk sebanyak pada specimen AA7 dengan waktu *aging* selama 7 jam yang ditandai dengan terbentuknya 2 *peak*. Sehingga dengan adanya perbedaan tersebut dapat mempengaruhi peningkatan kekuatan antara specimen AA5, AA6, dan AA7 yang dibuktikan dengan lebih kecilnya peningkatan kekerasan, kekuatan kompresi maupun dampak yang telah dilakukan.

Dari data grafik XRD pada Gambar 4.8 juga dapat diketahui terdapat senyawa NaCl pada masing-masing specimen namun dengan keberadaan yang berbeda pada masing-masing *peak* yang terbentuk. NaCl merupakan pengotor yang tersisa selama hasil dari proses *leaching* untuk menghilangkan senyawa tersebut. Keberadaannya menandakan terdapat NaCl yang tidak sepenuhnya larut dalam proses *leaching* terjadi karena senyawa tersebut terperangkap di dalam matriks aluminium sehingga saat proses *leaching*, air tidak bisa menembus untuk melarutkannya. Terperangkapnya NaCl tersebut terjadi selama proses pendinginan pembuatan aluminium *foam*. NaCl yang diketahui memiliki nilai densitas yang lebih rendah dibandingkan aluminium serta viskositas lelehan aluminium yang rendah menyebabkan terangkat dan tersebarnya NaCl dari NaCl yang lainnya. Hal tersebut tidak dapat dikontrol sehingga menyebabkan terperangkapnya NaCl di dalam matriks aluminium setelah selesainya

proses pendinginan aluminium *foam* yang juga menyebabkan NaCl tidak sepenuhnya dapat terlarut saat proses *leaching*. Maka, saat hasil coran tersebut diambil bagiannya untuk dijadikan spesimen pengujian, terdapat NaCl yang terperangkap di dalam matriks aluminium yang menyebabkan terdeteksinya senyawa tersebut dalam hasil pengujian XRD yang dilakukan. Dampak negatif dari NaCl yang tidak sepenuhnya terlarut dapat menyebabkan korosi apabila terpapar pada lingkungan yang lembab karena dapat merusak lapisan pasif yang terbentuk (Lela et al., 2021).

#### 4.6 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan tujuan untuk mencari nilai kekerasan untuk masing-masing spesimen Non-HT, AA5, AA6, dan AA7 sebagai perbandingan pengaruh dari *heat treatment* yang telah dilakukan yaitu *precipitation hardening* variasi waktu *aging*. Mesin pengujian kekerasan yang digunakan berada di Laboratorium Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-RS ITS. Pengujian kekerasan untuk masing-masing spesimen aluminium *foam* dilakukan 3 kali pengulangan dengan pembebanan 30kgf pada struktur sel yang pejal. Berikut adalah Gambar 4.9 yang menunjukkan nilai dari hasil pengujian kekerasan yang telah dilakukan.



**Gambar 4.7** Hasil pengujian kekerasan vickers

Dari data yang disajikan pada Gambar 4.7 dapat dilihat jika kekerasan dari pengujian yang telah dilakukan menunjukkan kenaikan nilai yang terus meningkat untuk spesimen yang telah dilakukan *heat treatment*. Spesimen Non-HT memiliki nilai kekerasan sebesar 59,975 VHN. Spesimen AA5 memiliki nilai kekerasan sebesar 73,625 VHN dengan kenaikan 22,76% jika dibandingkan dengan spesimen Non-HT. Spesimen AA6 memiliki nilai kekerasan sebesar 81,975 VHN dengan kenaikan 36,68%. Sedangkan spesimen AA7 memiliki nilai kekerasan sebesar 84,950 VHN dengan kenaikan 41,64%.

Dapat dilihat bahwa nilai kekerasan dari spesimen yang dilakukan perlakuan panas memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang tidak dilakukan Non-HT. Selanjutnya untuk spesimen yang dilakukan perlakuan panas memiliki nilai yang semakin naik dengan semakin lamanya waktu *aging*. Hal tersebut membuktikan bahwa perlakuan panas yang dilakukan yaitu *precipitation hardening* dapat menaikkan kekerasan dari suatu material akibat terbentuknya *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang tersebar di dalam matriks aluminium sehingga dapat menahan gaya yang diberikan dengan menahan dislokasi

yang terjadi. Kenaikan nilai kekerasan Vickers yang terjadi dapat dihubungkan dengan terbentuknya *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si pada paduan aluminium 6061 dengan menahan deformasi terhadap gaya yang diberikan (Ahmad et al., 2021). Peningkatan yang terjadi antara waktu *aging* yang digunakan yaitu 5 jam, 6 jam, dan 7 jam menunjukkan *intermetallic* yang terbentuk semakin banyak seiring bertambahnya waktu *holding*. Dengan bertambahnya ukuran dan jumlah *intermetallic*, kekuatan dan kekerasan karena ketahanannya yang lebih tinggi terhadap dislokasi yang bergerak (Esmaeili, 2008).

#### 4.7 Hasil Pengujian Kompresi

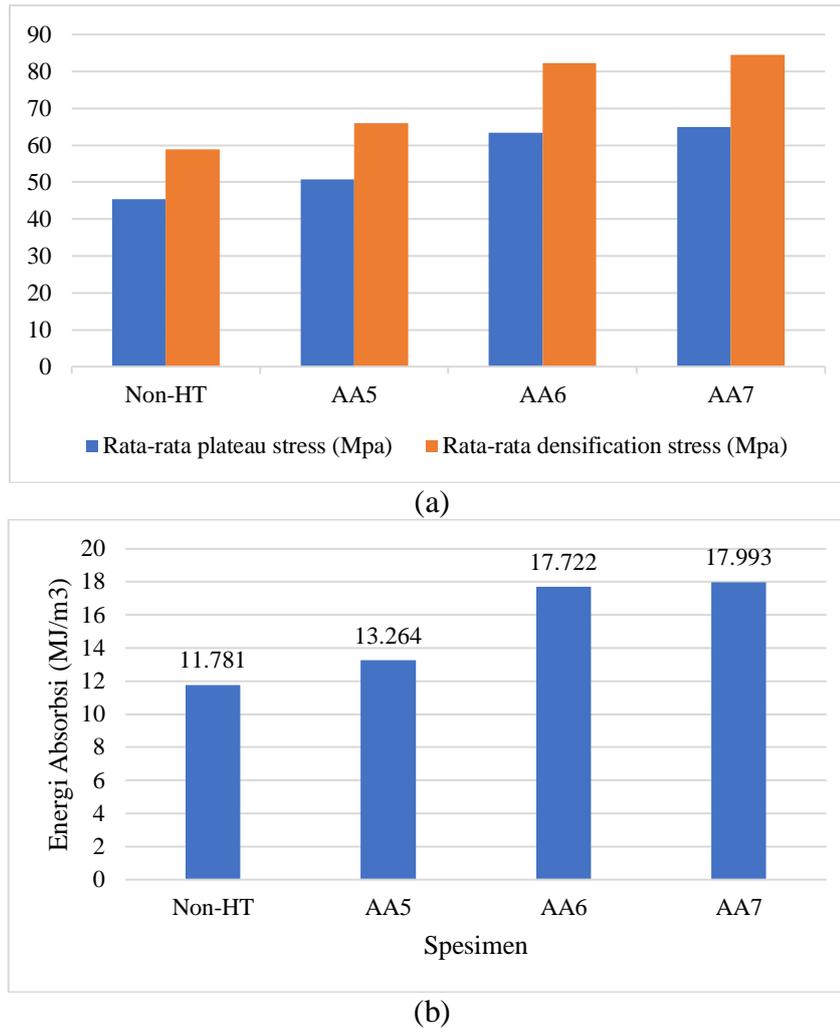
Pengujian kompresi dilakukan dengan menggunakan spesimen berukuran 2 cm x 2 cm x 2 cm yang sesuai dengan standar ISO13314, yaitu untuk pengujian sifat kompresif logam berporos dan seluler dengan porositas 50% atau lebih yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 sebagai berikut.



**Gambar 4.8** Spesimen uji kompresi paduan Al-Mg-Si foam

Mesin pengujian kompresi yang digunakan adalah HT-9501 *Series Universal Testing Machine*. Spesimen yang digunakan pada pengujian ini adalah spesimen Non-HT, AA5, AA6, dan AA7 yang masing-masing dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan. Data yang didapatkan dari pengujian kompresi berupa kurva gaya - pertambahan panjang yang kemudian diolah menjadi kurva tegangan - regangan dengan persamaan 3.1 untuk mencari tegangan, dan 3.2 untuk mencari regangan

Dari kurva tegangan-regangan yang telah terbentuk untuk masing-masing jenis spesimen, kemudian ditentukan nilai *plateau stress* serta *plateau end stress* untuk mendapatkan nilai energi absorpsi yang diinginkan. Berdasarkan (ISO, 2011) standar ISO13314, *plateau stress* dari kurva tegangan-regangan untuk material berporos dapat ditentukan dari nilai rata-rata tegangan pada regangan 20% sampai 30% atau 40%, sehingga nilai *plateau stress* yang didapatkan, dapat ditentukan *densification stress* yaitu sebesar 130% dari nilai *plateau stress* yang didapat. *Densification stress* adalah nilai tegangan yang menunjukkan batas akhir dari *plateau stress* dan tepat terjadinya densifikasi yang nilainya digunakan untuk mendapatkan nilai energi absorpsi dari kurva yang terbentuk. Nilai energi absorpsi didapat berdasarkan luasan area yang berada dibawah kurva dari mulai diberikannya tegangan hingga *densification stress*. Luasan area pada kurva tegangan-regangan hasil uji kompresi mulai dari diberikannya tegangan hingga *densification stress* dihitung menggunakan *software* Origin Pro, sehingga didapatkan nilai energi absorpsinya. Nilai energi absorpsi untuk masing-masing material disajikan pada Gambar 4.11 berikut.



**Gambar 4.9** (a) rata-rata nilai *plateau stress* dan *densification stress*, dan (b) nilai energi absorb spesimen hasil pengujian kompresi

Dari data hasil pengujian kompresi, parameter kompresi yang didapatkan dari Al-Mg-Si foam yaitu *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi memiliki perbedaan antara spesimen *non-heat treatment* dengan yang dilakukan *heat treatment*. Untuk spesimen Non-HT, didapatkan nilai *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi berturut-turut yaitu sebesar 58.898 Mpa, 45.306 Mpa, dan 11.781 MJ/m<sup>3</sup>. Untuk spesimen AA5 didapatkan nilai *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi berturut-turut yaitu sebesar 65.918 Mpa, 50.706 Mpa, dan 13.264 MJ/m<sup>3</sup>. Untuk spesimen AA6 didapatkan nilai *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi berturut-turut yaitu sebesar 82.323 Mpa, 63.325 Mpa, dan 17.722 MJ/m<sup>3</sup>. Dan untuk spesimen AA7 didapatkan nilai *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi berturut-turut yaitu sebesar 84.467 Mpa, 64.975 Mpa, dan 17.993 MJ/m<sup>3</sup>. Jika dilihat dari kenaikan parameter kompresi spesimen yang dilakukan *heat treatment* dibandingkan dengan spesimen Non-HT, spesimen AA5 memiliki kenaikan nilai *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi jika berturut-turut sebesar 11,92%, 11,92%, dan 12,58%, spesimen AA6 memiliki kenaikan nilai *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi jika berturut-turut sebesar 39,77%, 39,77%, dan 50,42%, dan spesimen AA7 memiliki kenaikan nilai *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi jika berturut-turut sebesar 43,41%, 43,41%, dan 52,72%.

Nilai kekuatan yaitu *densification stress*, dan *plateau stress* yang terus meningkat untuk spesimen AA5, AA6, dan AA7 dibandingkan spesimen Non-HT menunjukkan efek dari *heat treatment* yang dilakukan untuk masing-masing spesimen tersebut. *Heat treatment* yang dilakukan pada spesimen AA5, AA6, dan AA7 adalah *precipitation hardening* yang diawali dengan *solution treatment* pada temperatur 530°C selama 100 menit, kemudian dilakukan *quenching* media udara, yang selanjutnya langsung dilakukan *artificial aging* pada temperatur 165°C dengan variasi *holding time* selama 5 jam, 6 jam, dan 7 jam. Tujuan akhir dari perlakuan panas yang dilakukan pada paduan Al-Mg-Si *foam* ini adalah untuk mendapatkan senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang dapat meningkatkan kekuatannya. Sehingga, hal tersebut membuktikan keberadaan *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si untuk masing-masing spesimen AA5, AA6, dan AA7 dapat menaikkan parameter kompresi tersebut dibandingkan spesimen yang tidak dilakukan *heat treatment*.

Jika dilihat pada Gambar 4.9, nilai dari parameter kompresi yang terbentuk antara spesimen Al-Mg-Si *foam* yang diberlakukan *heat treatment* menunjukkan bahwa efek dari *holding time* pada *artificial aging* yang dilakukan dapat menaikkan parameter kompresi seiring dengan bertambahnya waktu aging yang dilakukan yaitu 5 jam, 6 jam, dan 7 jam. Spesimen AA5 dengan *holding time* selama 5 jam menunjukkan kenaikan terkecil dengan persentase kenaikan pada *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi berturut-turut sebesar 11,92%, 11,92%, dan 12,58% dibandingkan dengan spesimen AA7 dengan *holding time* selama 7 jam dengan persentase kenaikannya sebesar 43,41%, 43,41%, dan 52,72%. Dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu *aging* yang dilakukan maka akan semakin banyak senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk sehingga dapat menaikkan parameter kekuatan kompresinya, namun masih dalam batas waktu tidak terkadinya *overaging* yang dapat menurunkan kekuatannya. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Esmaeili, 2008) menunjukkan nilai kekuatan akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya waktu *aging* yang dilakukan dengan temperatur 180°C yaitu dengan waktu *holding* selama 1 jam, 2 jam, 4 jam, dan 7 jam. Sehingga dapat diketahui pada penelitian yang telah dilakukan tidak terjadi penurunan kekuatan yang menunjukkan *over aging* tidak terjadi pada temperatur dan interval waktu yang digunakan. Kadar Mg<sub>2</sub>Si yang meningkat ini ditunjukkan juga dengan data XRD yang didapatkan yaitu terdeteksinya Mg<sub>2</sub>Si pada spesimen yang dilakukan *heat treatment* sehingga dapat menaikkan kekuatan pada masing-masing spesimen tersebut. Spesimen AA5 yang memiliki kenaikan terkecil pada parameter kompresi yang terbentuk dibandingkan dengan spesimen AA6, dan AA7 ditandai dengan terdeteksinya Mg<sub>2</sub>Si hanya pada 1 *peak* untuk spesimen AA5 dan 2 *peak* untuk spesimen AA6, dan AA7.

Aluminium *foam* sebagai aplikasi dari *crashbox* harus memiliki standar penentuan parameter minimal yang diperlukan untuk memenuhi standar tersebut. Pada penelitian ini, parameter penting yang dibutuhkan untuk memenuhi standar tersebut dapat dilihat dari nilai *densification stress*, dan energi absorp pada masing-masing jenis spesimen. Menurut (Ashby et al., 2016), aluminium *foam* komersial memiliki nilai energi absorp yang mencapai 12 MJ/m<sup>3</sup>, dan kekuatan kompresi berkisar 14 MPa. Pada penelitian ini, spesimen Non-HT, AA5, AA6, dan AA7 memiliki nilai *densification stress* yang ditandai sebagai kekuatan kompresi dan energi absorp berturut-turut yaitu untuk Non-HT senilai 58.898 Mpa, 11.781 MJ/m, spesimen AA5 sebesar 65.918 Mpa, 13.264 MJ/m<sup>3</sup>, spesimen AA6 sebesar 82.323 Mpa, 17.722 MJ/m<sup>3</sup>, dan spesimen AA7 sebesar 84.467 Mpa, 17.993 MJ/m<sup>3</sup>. Sehingga jika nilai kekuatan kompresi dan energi absorp yang didapatkan pada penelitian ini dibandingkan dengan aluminium *foam* komersial, maka nilai yang didapatkan sudah dapat memenuhi standar komersial tersebut.

#### 4.8 Hasil Pengujian Impak

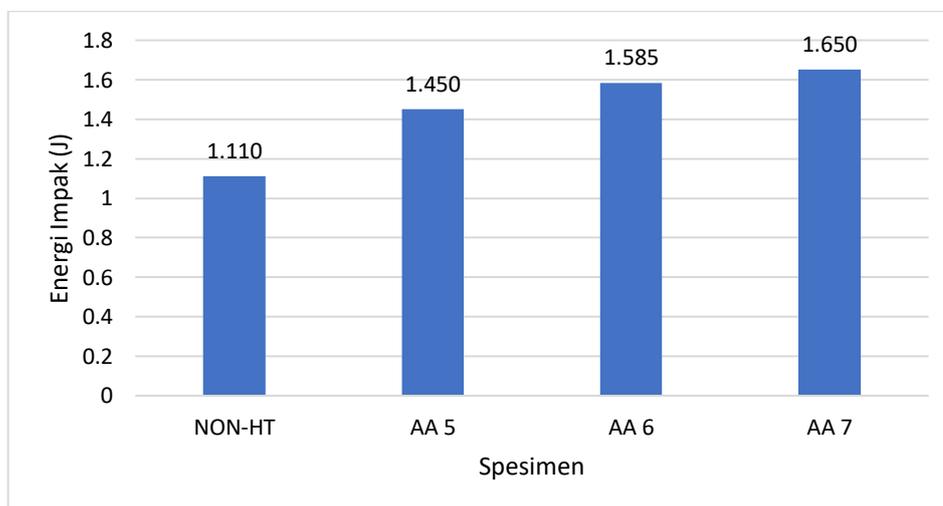
Pengujian impak dilakukan menggunakan spesimen berdimensi 1 cm x 1 cm x 5,5 cm yang telah diberi takik dengan kedalaman 2 mm sesuai dengan standar ASTM E23 yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 sebagai berikut



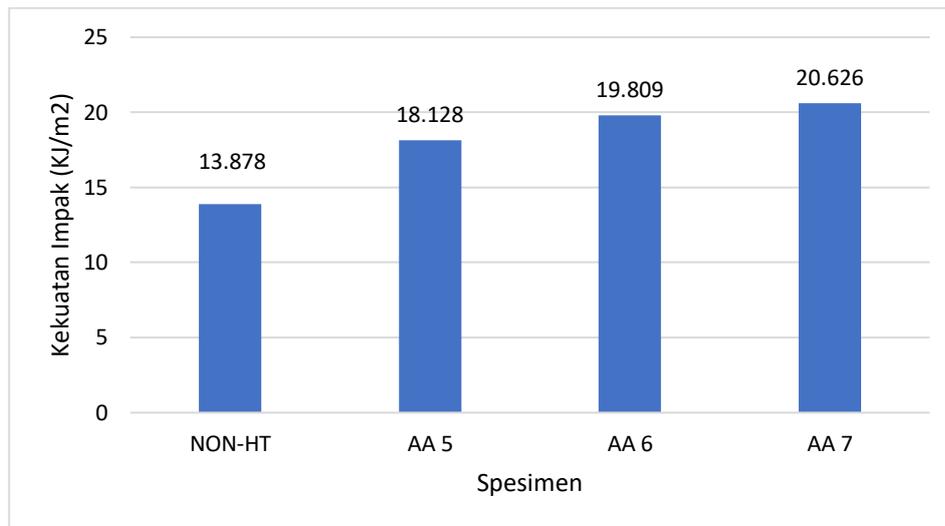
**Gambar 4.10** Spesimen uji impak paduan Al-Mg-Si foam

. Alat yang khusus digunakan untuk material non-ferrous yang memenuhi standar ISO179-1992, dengan bandul yang memiliki nilai energi 12J (1.34 kg). Pengujian impak dilakukan sebanyak 3 kali untuk masing-masing spesimen Non-HT, AA5, AA6, dan AA7. Hasil yang didapat pada pengujian ini berupa sudut awal bandul ( $\alpha$ ) dan sudut akhir bandul ( $\beta$ ) untuk mendapatkan nilai dari kekuatan impak dan energi impak yang terbentuk. Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan 3.7 dan 3.8.

Nilai kekuatan dan energi impak berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, disajikan pada Gambar 4.13 untuk energi impak dan Gambar 4.14 kekuatan impak sebagai berikut.



**Gambar 4.11** Hasil uji rata-rata energi impak (J)



**Gambar 4.12** Hasil uji rata-rata kekuatan impact (kJ/m<sup>2</sup>)

Dari data yang disajikan diketahui untuk spesimen Non-HT memiliki nilai energi impact dan kekuatan impact berturut-turut sebesar 1,110 J, dan 13,878 kJ/m<sup>2</sup>. Untuk spesimen AA5 memiliki nilai energi impact dan kekuatan impact berturut-turut sebesar 1,450 J, dan 18,128 kJ/m<sup>2</sup> dengan kenaikan nilai jika dibandingkan dengan spesimen Non-HT yaitu sebesar 30,62%. Untuk spesimen AA6 memiliki nilai energi impact dan kekuatan impact berturut-turut sebesar 1,585 J, dan 19,809 kJ/m<sup>2</sup> dengan kenaikan nilai jika dibandingkan dengan spesimen Non-HT yaitu sebesar 42,74%. Dan untuk spesimen AA7 memiliki nilai energi impact dan kekuatan impact berturut-turut sebesar 1,650 J, dan 20,626 kJ/m<sup>2</sup> dengan kenaikan nilai jika dibandingkan dengan spesimen Non-HT yaitu sebesar 48,62%.

Dari data nilai energi impact dan kekuatan impact yang diketahui, dapat dilihat terjadi kenaikan antara spesimen Non-HT, AA5, AA6, dan AA7 berturut-turut dengan nilai terkecil pada spesimen Non-HT yaitu energi impact dan kekuatan impact berturut-turut sebesar 1,585 J, dan 19,809 kJ/m<sup>2</sup>, dan nilai tertinggi pada spesimen energi impact dan kekuatan impact berturut-turut sebesar 1,650 J, dan 20,626 kJ/m<sup>2</sup>. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Pradityana et al., 2019), nilai energi impact dan kekuatan impact dapat dipengaruhi oleh banyaknya fasa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk. Maka dapat disimpulkan, kenaikan nilai energi dan kekuatan impact adalah efek dari perlakuan panas yang dilakukan yaitu *precipitation hardening* yang dapat menghasilkan senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang dapat meningkatkan kekuatan sehingga dapat menaikkan nilai energi dan kekuatan impactnya yang ditunjukkan berdasarkan hasil pengujian XRD dan SEM-EDX. Dengan semakin meningkatnya parameter impact pada spesimen yang dilakukan perlakuan panas yaitu semakin tinggi seiring dengan bertambahnya waktu *aging* yang dilakukan menunjukkan semakin banyak fasa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang terdapat pada spesimen tersebut.

#### 4.9 Karakteristik Fisik dan Mekanik Paduan Al-Mg-Si Foam

Penelitian ini memiliki tujuan yaitu untuk menganalisis pengaruh dari *heat treatment* terhadap karakter fisik dan mekanik yang terjadi pada paduan Al-Mg-Si foam yang diproduksi dengan menggunakan metode *space holder* NaCl. *Heat treatment* yang dilakukan berupa *precipitation hardening* dengan variasi *holding time* pada *aging* yang dilakukan yaitu selama 5 jam, 6 jam, dan 7 jam dengan tujuan yaitu untuk mendapatkan senyawa *intermetallic* berupa Mg<sub>2</sub>Si yang dapat menaikkan sifat mekaniknya yaitu kekuatan dan kekerasan. Dengan digunakannya NaCl sebesar 60% dari total volume, aluminium foam yang dapat terbentuk

pada penelitian ini memiliki persentase porositas berkisar antara 48,981% - 62,43% dengan rata-rata sebesar 53,687%. Nilai persentase porositas tersebut masih tergolong dalam porositas aluminium *foam* komersial yang dibuat menggunakan metode *space holder* yaitu  $\leq 65\%$ . Selain persentase porositas, didapatkan juga nilai densitasnya yaitu berkisar antara  $1.014 - 1.377 \text{ g/cm}^3$  dengan rata-rata sebesar  $1.2504 \text{ g/cm}^3$ . Dapat diketahui densitas yang didapat pada penelitian ini masih belum mencapai densitas aluminium *foam* komersial yaitu sebesar  $0.3-1 \text{ g/cm}^3$ . Dapat diketahui berdasarkan pengamatan ukuran pori menggunakan mikroskop stereo, pori pada aluminium *foam* menggunakan *space holder* NaCl sebagai substrat pembentuk *foam* akan memiliki ukuran pori yang tidak jauh berbeda dengan ukuran partikel NaCl yang digunakan serta struktur pori yang terbentuk akan saling berhubungan (*interconnected*) akibat dari partikel NaCl yang saling menyatu satu sama lain. Sehingga dengan ukuran NaCl sebesar  $2,83 \text{ mm} - 4,78 \text{ mm}$  hasil dari penyaringan menggunakan ayakan berukuran *mesh* 4 - 7, ukuran pori yang didapatkan yaitu berkisar antara  $2,701 \text{ mm} - 4,510 \text{ mm}$  dan jenis *foam* yang terbentuk berdasarkan strukturnya yaitu termasuk ke dalam *open-cell aluminium foam*.

Pada spesimen yang tidak dilakukan *heat treatment* yaitu spesimen Non-HT memiliki nilai pada parameter kekerasan, kekuatan kompresi, energi absorpsi, maupun energi dan kekuatan impact yang lebih kecil yang dapat dilihat dari data yang telah dibahas dibandingkan dengan spesimen yang dilakukan *heat treatment*. Hal tersebut dapat terjadi karena jika dilihat dari hasil pengamatan struktur mikro, spesimen Non-HT tidak memiliki visual permukaan yang sama dengan spesimen yang dilakukan *heat treatment* yaitu pada spesimen Non-HT terlihat adanya bercak hitam/gelap yang terbentuk namun dengan ukuran yang relatif besar tidak sama dengan spesimen *heat treatment* yang berupa persebaran partikel dalam ukuran yang sangat kecil yang didapat dari hasil *precipitation hardening* berupa senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si. Berdasarkan Grażyna, 2021, pada spesimen hasil pengecoran akan memiliki struktur mikro yang terdiri dari sebagian paduan utama yang terlarut dalam matriks *solid solution* aluminium dan sebagian membentuk fasa *intermetallic* bersama aluminium atau unsur logam lainnya hasil dari pendinginan lambat yang terjadi. Sehingga, daerah gelap yang terdapat pada matriks aluminium terdiri atas senyawa tidak terlarut paduan kompleks dan beberapa partikel Mg<sub>2</sub>Si. Terdapatnya beberapa partikel Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk pada spesimen Non-HT juga dapat diketahui berdasarkan hasil pengujian SEM-EDX yang dilakukan, yaitu terdapatnya senyawa Mg dan Si.

Spesimen AA5 yang dilakukan *heat treatment* berupa *precipitation hardening* dengan waktu *aging* selama 5 jam menunjukkan kenaikan nilai pada parameter kekerasan, kompresi, maupun impact jika dibandingkan dengan spesimen Non-HT. Kenaikan nilai AA5 pada parameter kekerasan yaitu nilai kekerasan sebesar 22,76% dengan nilai 73,625 VHN. Pada parameter kompresi berupa *plateau stress*, *densification stress*, dan energi absorpsi memiliki kenaikan sebesar 11,92%, 11,92%, dan 12,58% dengan nilai sebesar 65.918 Mpa, 50.706 Mpa, dan  $13.264 \text{ MJ/m}^3$ . Sedangkan untuk parameter impact yaitu nilai energi dan kekuatan impact memiliki kenaikan sebesar 30,62% dengan nilai sebesar 1,450 J, dan  $18,128 \text{ kJ/m}^2$ . Hal tersebut dapat terjadi karena pada spesimen AA5 yang dilakukan *heat treatment* berupa *precipitation hardening* dengan waktu *aging* 5 jam menghasilkan senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang dapat menghambat terjadinya dislokasi akibat beban yang diterima sehingga dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Keberadaan Mg<sub>2</sub>Si dapat diketahui berdasarkan hasil pengujian XRD yaitu dengan terdeteksinya senyawa Mg<sub>2</sub>Si pada salah satu *peak* dengan posisi  $2^\circ\text{Th}$   $78.204^\circ$ . Namun jika dibandingkan dengan spesimen *heat treatment* lainnya yaitu AA7 dengan waktu *aging* dan 7 jam, AA5 menghasilkan parameter sifat mekanik dengan nilai terkecil. Dengan data XRD yang didapatkan, terdapat perbedaan pada terdeteksinya senyawa Mg<sub>2</sub>Si, dengan terdeteksinya Mg<sub>2</sub>Si pada 1 *peak* untuk spesimen AA5

dan 2 *peak* untuk spesimen AA7 menunjukkan adanya perbedaan banyaknya keberadaan senyawa Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk. Banyaknya senyawa Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk juga ditunjukkan berdasarkan pengamatan SEM-EDX dengan banyaknya persentase fraksi berat Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk pada spesimen AA5 memiliki nilai sebesar 1,037 wt%.

Untuk spesimen AA6 dengan waktu *aging* 6 jam, menunjukkan kenaikan pada parameter kekerasan, kompresi, dan dampak lebih tinggi dibandingkan spesimen Non-HT dan AA5 namun lebih rendah dibandingkan dengan AA7. Jika dilihat dengan kenaikan nilainya dibandingkan dengan spesimen Non-HT, pada parameter kekerasan kenaikan dari spesimen AA5 yaitu sebesar 36,68% dengan nilai 81,975 VHN. Untuk parameter kompresi berupa *plateau stress*, *densification stress*, dan energi absorpsi memiliki kenaikan sebesar 39,77%, 39,77%, dan 50,42% dengan nilainya yaitu 82.323 Mpa, 63.325 Mpa, dan 17.722 MJ/m<sup>3</sup>. Sedangkan untuk parameter dampak yaitu nilai energi dan kekuatan dampak memiliki kenaikan sebesar 42,74% dengan nilai sebesar 1,585 J, dan 19,809 kJ/m<sup>2</sup>. Lebih besarnya nilai yang didapatkan pada spesimen AA6 juga ditunjukkan berdasarkan hasil uji XRD dan mikroskop optik yang dilakukan yaitu terdapatnya 1 *peak* Mg<sub>2</sub>Si. Banyaknya senyawa Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk juga ditunjukkan berdasarkan pengamatan SEM-EDX dengan banyaknya persentase fraksi berat Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk pada spesimen AA6 memiliki nilai sebesar 1,256 wt%.

Kenaikan nilai yang terus bertambah pada parameter sifat mekanik yang ditunjukkan dengan pengujian kekerasan, kompresi, dan dampak, dapat diketahui kenaikan tertinggi dimiliki oleh spesimen yang dilakukan perlakuan panas yaitu spesimen AA7 dengan waktu *aging* selama 7 jam. Untuk nilai parameter kekerasan memiliki kenaikan sebesar 41,64% dengan nilai 84,950 VHN. Untuk parameter kompresi berupa *densification stress*, *plateau stress*, dan energi absorpsi memiliki kenaikan sebesar 43,41%, 43,41%, dan 52,72% dengan nilainya yaitu 84,467 Mpa, 64,975 Mpa, dan 17,993 MJ/m<sup>3</sup>. Sedangkan untuk parameter dampak yaitu nilai energi dan kekuatan dampak memiliki kenaikan sebesar 48,62% dengan nilai sebesar 1,650 J, dan 20,626 kJ/m<sup>2</sup>. Dengan dicapainya nilai tertinggi pada spesimen AA7 dari semua parameter pengujian yang telah dilakukan untuk melihat sifat mekaniknya, dapat dilihat pula pada pengujian lainnya yang dapat mendukung kenaikan tersebut. Berdasarkan pengamatan SEM-EDX dengan banyaknya persentase fraksi berat Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk pada spesimen AA7 memiliki nilai sebesar 1,147 wt%. Sedangkan dengan ditunjukkannya kemunculan *peak* Mg<sub>2</sub>Si yang terdapat pada 2 *peak* dari hasil XRD yang didapatkan, menunjukkan senyawa Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk pada spesimen AA7 lebih banyak dibandingkan dengan spesimen Non-HT maupun AA5. Dengan didapakkannya hasil tertinggi tersebut menunjukkan semakin lamanya waktu *aging* yang digunakan maka *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk akan semakin banyak dan semakin tumbuh. Maka dapat diketahui pada penelitian yang telah dilakukan tidak terjadi penurunan kekuatan yang juga menunjukkan tidak terjadinya *over aging* pada temperatur dan interval waktu yang digunakan terutama pada spesimen AA7 dengan waktu *aging* 7 jam yang menunjukkan nilai tertinggi dari parameter pengujian yang telah dilakukan.

Dengan nilai yang telah diketahui untuk masing-masing jenis spesimen, maka dapat dilihat secara keseluruhan bahwa *heat treatment* yang dilakukan pada spesimen AA5, AA6, dan AA7 jika dibandingkan dengan spesimen Non-HT yang tidak dilakukan *heat treatment* dapat menaikkan sifat mekanik yang hasilnya ditunjukkan oleh kenaikan berdasarkan pengujian sifat mekanik yang telah dilakukan. Berdasarkan hasil yang telah didapatkan, pada penelitian ini diharapkan nilai tersebut dapat memenuhi kriteria aluminium *foam* komersial sehingga dapat diaplikasikan sebagai *filler* yang digunakan pada *crash box*. Aluminium *foam* secara komersial memiliki nilai energi absorpsi mencapai 12 MJ/m<sup>3</sup> dengan kekuatan kompresi berkisar 14 Mpa, serta persentase porositas ≤65% untuk aluminium *foam* menggunakan *space holder* dengan densitas berkisar antara 0,3 – 1 g/mm<sup>3</sup>. Maka pada

penelitian ini, hasil yang didapatkan sudah dapat mencapai kriteria aluminium *foam* tersebut namun dengan densitas yang dihasilkan masih berada di atas nilai densitas dari aluminium *foam* komersial.

---

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Dengan dilakukannya *heat treatment* berupa *precipitation hardening* dengan variasi *holding time* pada *aging* selama 5 jam, 6 jam, dan 7 jam maka akan menghasilkan *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang ditunjukkan dengan hasil pengujian XRD serta hasil pengamatan mikroskop optik. Banyaknya *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si ditandai dengan terdeteksinya *peak* Mg<sub>2</sub>Si berdasarkan grafik XRD yang didapatkan. Spesimen dengan *holding time aging* selama 5 jam dan 6 jam menunjukkan terdeteksinya 1 *peak* Mg<sub>2</sub>Si pada posisi 2<sup>o</sup>Th 78,204<sup>o</sup> dan 78,306<sup>o</sup>, sedangkan spesimen dengan *holding time* 7jam terdeteksi pada 2 *peak* dengan posisi 2<sup>o</sup>Th 65,68<sup>o</sup> dan 78,276<sup>o</sup>, sehingga spesimen dengan *holding time* 7 jam akan lebih banyak memiliki senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk. Banyaknya *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk juga dapat diamati berdasarkan hasil pengujian SEM-EDX. Dengan diketahuinya unsur Mg dan Si, persentase fraksi berat Mg<sub>2</sub>Si pada masing-masing spesimen dengan *holding time* 5 jam, 6 jam, dan 7 jam yaitu relative meningkat dengan nilai sebesar 1,037 wt%, 1,256 wt%, dan 1,147 wt%. Maka, semakin lama *holding time aging* yang dilakukan akan menghasilkan senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang semakin banyak dan tumbuh.
2. Berdasarkan sifat mekanik yang terbentuk, spesimen paduan Al-Mg-Si *foam* yang dilakukan *heat treatment* dengan variasi *holding time* pada *aging* menghasilkan peningkatan seiring bertambahnya waktu yang diterapkan pada *aging*. Spesimen dengan *holding time* selama 5 jam menghasilkan sifat mekanik berdasarkan beberapa parameter yang ditunjukkan oleh uji kekerasan, uji kompresi, dan uji impak yaitu dengan nilai kekerasan sebesar 73,625 VHN, *densification stress* sebesar 65,918 Mpa, *plateau stress* sebesar 50,706 Mpa, energi absorpsi sebesar 13,264 MJ/m<sup>3</sup>, serta energi dan kekuatan impak sebesar 1,450 J, dan 18,128 kJ/m<sup>2</sup>. Untuk spesimen dengan *holding time* 6 jam memiliki nilai kekerasan sebesar 81,975 VHN, *densification stress* sebesar 82,323 Mpa, *plateau stress* sebesar 63,325 Mpa, energi absorpsi sebesar 17,722 MJ/m<sup>3</sup>, serta energi dan kekuatan impak sebesar 1,585 J, dan 19,809 kJ/m<sup>2</sup>. Dan untuk spesimen dengan *holding time* 7 jam memiliki nilai kekerasan sebesar 84,950 VHN, *densification stress* sebesar 84,467 Mpa, *plateau stress* sebesar 64,975 Mpa, energi absorpsi sebesar 17,993 MJ/m<sup>3</sup>, serta energi dan kekuatan impak sebesar 1,650 J, dan 20,626 kJ/m<sup>2</sup>. Dari kenaikan yang terjadi, semakin lama *holding time* yang diterapkan maka akan semakin banyak senyawa *intermetallic* Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk dan tumbuh dengan diindikasikan semakin baik sifat mekanik yang didapatkan. Sehingga pada penelitian ini, dengan temperatur dan interval *holding time* yang digunakan tidak terjadi peristiwa *over aging* yang dapat menurunkan sifat mekaniknya. Spesimen dengan *holding time* selama 7 jam menghasilkan nilai terbaik pada penelitian ini.

### 5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya dengan topik yang terkait sebagai berikut.

1. Dibutuhkan *resistance furnace* agar dapat dengan mudah mengontrol temperatur yang diinginkan.
2. Dibutuhkan alat yang dapat memberikan tekanan tambahan saat proses pengecoran agar lelehan aluminium dapat mudah mengisi celah NaCl pada cetakan
3. Menggunakan NaCl yang dapat mempertahankan bentuknya pada temperatur tinggi

*(Halaman ini sengaja dikosongkan).*

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., Afzal, N., & Rafique, M. (2021). STRUCTURAL AND MECHANICAL RESPONSE OF ARTIFICIALLY AGED ALUMINUM ALLOY 6061. *Strength of Materials*, 53(3). <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00311-0>
- Antenucci, A., Guarino, S., Tagliaferri, V., & Ucciardello, N. (2014). Improvement of the mechanical and thermal characteristics of open cell aluminum foams by the electrodeposition of Cu. *Materials and Design*, 59, 124–129. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.004>
- Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2016). *Metal Foams : a Design Guide* (Vol. 3069, Issue FEBRUARY 2002).
- ASM International®. (1991). *Heat Treating of Aluminum Alloys*. 4, 841–879. <https://doi.org/10.1361/asmhba0001205>
- AY, İ., ÇELİK, S., & ÇELİK, İ. (2000). Comparison of Properties of Friction and Diffusion Welded Joints Made Between The Aluminium And Copper Bars. *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 88–102.
- Banhart, J. (2001). Manufacture , characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Material Science*, 46(December 2001), 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
- Banhart, J. (2003). *Aluminum Foams : On the Road to Real Applications*. APRIL, 290–295.
- Banhart, J. (2014). Production Methods for Metallic Foams. *Materials Research Society*, May. <https://doi.org/10.1557/PROC-521-121>
- Barletta, M., Guarino, S., & Montanari, R. (2007). *Metal foams for structural applications : design and manufacturing*. February 2014. <https://doi.org/10.1080/09511920601160197>
- Bauer, B., Kralj, S., & Bušić, M. (2013). PRODUCTION AND APPLICATION OF METAL FOAMS IN CASTING TECHNOLOGY. 3651, 1095–1102.
- Boljanovic, V., & Ph, D. (2009). *METAL SHAPING PROCESSES : Casting and Molding ; Particulate Processing ; Deformation Processes ;*
- Campana, F., & Pilone, D. (2009). Effect of heat treatments on the mechanical behaviour of aluminium alloy foams. *Scripta Materialia*, 60(8), 679–682. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.12.045>
- Campbell, J. (2015). Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design: Second Edition. In *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design: Second Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01548-1>
- Chen, Y., Lu, B. Q., & Zhang, H. A. (2020). Hardening and precipitation of a commercial 6061 Al alloy during natural and artificial ageing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 770(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/770/1/012065>
- Chen, Yu, Wang, N., Ola, O., Xia, Y., & Zhu, Y. (2021). Materials Science & Engineering R Porous ceramics: Light in weight but heavy in energy and environment technologies. *Materials Science & Engineering R*, 143(August 2020), 100589. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100589>
- Dahil, L., Katirci, R., & Sümbül, H. İ. (2020). Effect of Artificial Aging Process on Aluminum Foam Made of Etial 160. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(11), 2739–2745. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02081-w>
- Darmadi, D. B., Anwari, B. R., Mesin, J. T., Teknik, F., & Brawijaya, U. (2015). ANALISIS PENYERAPAN ENERGI DAN POLA DEFORMASI CRASH BOX DENGAN VARIASI SUDUT TIRUS DINDING CRASH BOX PADA UJI SIMULASI TABRAKAN ARAH FRONTAL. 6(1), 75–83.

- Davies, G. J., & Zhen, S. (1983). Metallic foams: their production, properties and applications. *Journal of Materials Science*, 18(7), 1899–1911. <https://doi.org/10.1007/BF00554981>
- Duarte, I., & Oliveira, M. (2003). *Aluminium Alloy Foams : Production and Properties*.
- Dwight, J. (1998). Aluminium Design and Construction. In *Aluminium Design and Construction*. <https://doi.org/10.4324/9780203028193>
- Esmaili, D. R. A. C. Æ. S. (2008). Prediction of the effect of artificial aging heat treatment on the yield strength of an open-cell aluminum foam. *Journal of Materials Science*, 43, 1121–1127. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2271-9>
- Fernández-morales, P., Cano-montoya, C. A., & Pérez-mesa, J. A. (2017). *Thermal and Permeability Properties of Metal Aluminum Foams for Functional Application*. 21(1), 115–130. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu21-1.tppm>
- Fuganti, A., & Lorenzi, L. (1999). *Aluminium foam for automotive applications*. m, 5–12.
- Gavgali, M., Totik, Y., & Sadeler, R. (2003). The effects of artificial aging on wear properties of AA 6063 alloy. *Materials Letters*, 57(24–25), 3713–3721. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00168-X](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00168-X)
- Gopinatha, S., & Nagarajanb, N. (2021). Microstructural and corrosion study of aluminum foams obtained by space holder process using low-cost removable preforms. *Journal of Applied Research and Technology*, 19, 202–216.
- Grażyna, M. N., Gancarczyk, K., Nowotnik, A., Dychtoń, K., & Boczkal, G. (2021). Microstructure and properties of as-cast and heat-treated 2017a aluminium alloy obtained from scrap recycling. *Materials*, 14(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/ma14010089>
- ISO. (2011). *Mechanical testing of metals — Ductility testing — Compression test for porous and cellular metals*. 1–3.
- Karuppasamy, R., Barik, D., Sivaram, N. M., & Dennison, M. S. (2020). Investigation on the effect of aluminium foam made of A413 aluminium alloy through stir casting and infiltration techniques. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 11(1), 34–50. <https://doi.org/10.1504/IJMATEI.2020.104790>
- Khan, K. L. A., Kumar, G., & Prasad, D. R. (2018). Effect of Age Hardening and Quenching Media on Aluminium Foams. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(6), 245–248.
- Kusyairi, I., Himawan, H. M., Choiron, M. A., Irawan, Y. S., & Malang, P. K. (2018). *Effects of Origami Pattern Crash Box and Rectangular Pattern Crash Box on The Modelling Of MPV Car Structure on Deformation*. 3(2), 61–68.
- Lehmhus, D., Banhart, J., & Rodriguez-Perez, M. A. (2002). Adaptation of aluminium foam properties by means of precipitation hardening. *Materials Science and Technology*, 18(5), 474–479. <https://doi.org/10.1179/026708302225002182>
- Lehmhus, Dirk. (2008). *Aluminum foam-polymer hybrid structures ( APM aluminum foam ) in compression testing*. October. <https://doi.org/10.1016/j.ijsostr.2008.06.007>
- Lehmhus, Dirk, & Banhart, J. (2003). Properties of heat-treated aluminium foams. *Materials Science and Engineering A349*, 110, 98–110.
- Lela, B., Jozić, S., Krolo, J., Dumanić, I., & Grgić, K. (2021). Production of Open Cell Foams Out of Aluminium Chips. *Athens Journal of Technology & Engineering 2021*, 8(4), 1–12.
- Lias, I., Nasir, M. I., Ismail, M. H., Mohd, A., & Mamat, I. (2016). *DESIGN AND FABRICATION OF ALUMINIUM FOAM TUBE FOR HEAT*. 11(14), 8721–8725.
- Luna, E. M. E., Barari, F., Woolley, R., & Goodall, R. (2014). *Casting Protocols for the Production of Open Cell Aluminum Foams by the Replication Technique and the Effect*

- on Porosity Casting Protocols for the Production of Open Cell Aluminum Foams by the Replication Technique and the Effect on Porosity. December.*  
<https://doi.org/10.3791/52268>
- Mahadev, Sreenivasa, C. G., & Shivakumar, K. M. (2018). A Review on Production of Aluminium Metal Foams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 376(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012081>
- Mahajan, S. M., & Jadhav, G. a. (2015). Aluminum Foaming For Lighter Structure. *ISSN // International Journal of Computational Engineering Research*, 05(01), 2250–3005. [www.ijceronline.com](http://www.ijceronline.com)
- Medik, F., Sunar, T., Çetin, M., Yaşar, M., & Turhan, L. (2017). *Production of Open Cell Aluminum Foam via Infiltration Method. January 2018.*
- Mohd Razali, R. N., Abdullah, B., Ismail, M. H., & Muhamad, N. (2016). Characteristic of modified geometrical open-cell aluminium foam by casting replication process. *Materials Science Forum*, 846, 37–41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.846.37>
- N. Rafael, Adams. J.H., et al. (1990). *ASM HANDBOOK VOLUME 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM INTERNATIONAL.
- Nov, I., Fra, K., Solfronk, P., & Koreč, D. (2021). *Characteristics of Porous Aluminium Materials Produced by Pressing Sodium Chloride into Their Melts.*
- Pimiento, S. B., Rojas, M. E. H., & Pardavé, M. E. P. (2015). *Processing and characterization of open – cell aluminum foams obtained through infiltration processes.* 9, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.007>
- Pradityana, A., Sanyoto, B. L., & Widiantoro, E. K. (2019). Influence of Aging Temperature During Artificial Aging Process on Aluminium Alloy to the Mechanical Properties. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 3, 5–8.
- Rivera, N. M. T., Torres, J. T., & Valdés, A. F. (2019). A-242 aluminium alloy foams manufacture from the recycling of beverage cans. *Metals*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/met9010092>
- Ruqayah A. Abdulkadhim, M. A. (2015). *Effect of Precipitation Hardening on Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welded AA2024-T3 to AA707-T73 Aluminum Alloys. January 2016.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1840.6486>
- Rushdi, N. M. F. M., Jamaludin, S. B., Mazlee, M. N., & Jamal, Z. A. Z. (2016). *Correlation between Porosity and Space Holder Content at Different Sintering Temperatures of Aluminum Foam. 030005.* <https://doi.org/10.1063/1.4958757>
- Sangeetha, M., Prakash, S., Sridharraja, K. S., & Muralimano, J. (2020). Development, testing and microstructural study of aluminum foam in automobile application. *International Journal of Ambient Energy*, 0(0), 1–17. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1723690>
- Soni, B., & Biswas, S. (2016). *Mechanical Behaviour under Quasi-static Loading of Open-cell Foams of 6061-T6 Al Alloys Processed by Pressurized Salt Infiltration Technique.* 706, 23–28. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.706.23>
- Taylor, P. (2010). *Design of aluminium foam-filled crash boxes of square and circular cross-sections of square and circular cross-sections. November 2014,* 37–41. <https://doi.org/10.1533/cras.2001.0171>
- Widyastuti, Ardhyananta, H., Hariyati, P., & Quluq, R. M. (2019a). *Karakterisasi Material. ITS Press, Surabaya.*
- Widyastuti, Ardhyananta, H., Hariyati, P., & Quluq, R. M. (2019b). *Karakterisasi Material. In ITS Press, Surabaya.*
- Yang, X., Cheng, Y., He, X., Yang, K., & Zong, R. (2020). Effect of heat treatment on the microstructure, compressive property and energy absorption response of the Al-Mg-Si

---

alloy foams. *Advanced Engineering Materials*, 23(2).  
<https://doi.org/10.1002/adem.202000620>

- Yusuf, M., Ikram, M., Bakar, A., Muhamad, N., & Hussain, M. (2021). Application of sodium chloride as space holder for powder injection molding of alloy Titanium e Hydroxyapatite composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.087>
- Z. Hussain, N. S. A. S. (2011). Microstructure and Mechanical Behaviour of Aluminium Foam Produced by Sintering Dissolution Process Using NaCl Space Holder. *Journal of Engineering Science*, 7, 37–49.
- Zhao, Y. Y., & Sun, D. X. (2001). A NOVEL SINTERING-DISSOLUTION PROCESS FOR MANUFACTURING Al FOAMS. 44, 105–110.

## LAMPIRAN

### Proses Pembentukan Aluminium Foam

Pada proses pembuatan aluminium *foam* diawali dengan proses *trial* (percobaan) yang dilakukan selama kurang lebih 1 bulan. Pada penelitian ini, aluminium *foam* dibuat menggunakan metode *space holder* yaitu NaCl dengan komposisi sebesar 60%. Proses dilakukan dengan melelehkan aluminium kemudian dituangkan ke dalam cetakan berisikan *space holder* (NaCl). Selama percobaan pembentukan aluminium *foam*, terdapat banyak kendala sehingga *foam* yang diinginkan masih belum terbentuk dengan baik. Gambar 4.1 menunjukkan spesimen gagal pada masa percobaan.



Spesimen aluminium *foam* hasil pengecoran (gagal)

Dari gambar spesimen tersebut dapat dilihat pembentukan aluminium *foam* masih banyak terdapat masalah. Untuk gambar spesimen yang kiri, terdapat masalah yaitu aluminium tidak dapat menembus NaCl sampai ke dasar cetakan, sehingga *foam* yang terbentuk hanya di bagian permukaan dari cetakan saja. Sedangkan untuk spesimen kanan, aluminium sudah bisa masuk sampai dasar cetakan namun *foam* masih belum terbentuk secara merata dikarenakan NaCl yang berada pada cetakan berubah bentuk menjadi bubuk akibat perbedaan temperature yang tinggi.

Permasalahan NaCl yang menjadi bubuk saat diberikan temperature yang tinggi diuji menggunakan *heat treatment furnace*. Saat temperature *furnace* mencapai 400°C, kristal NaCl pecah sehingga berubah menjadi bubuk. Maka dari itu, dicari jenis lain dari NaCl yang dapat mempertahankan bentuknya pada temperature tinggi. Untuk permasalahan aluminium yang belum bisa masuk sampai dasar cetakan diberikan solusi berupa penggantian cetakan yang lebih besar dan dilakukan sedikit pengadukan untuk membantu lelehan aluminium dapat masuk sampai dasar cetakan.

Seiring berjalannya percobaan yang dilakukan, penggantian jenis NaCl dan juga jenis cetakan yang digunakan yaitu untuk jenis NaCl yang digunakan sebelumnya adalah garam krosok/laut, kemudian digantikan menggunakan garam himalaya, dan penggantian cetakan menjadi *crucible* tidak terpakai. Dari penggantian alat dan bahan yang digunakan tersebut akhirnya dapat menghasilkan aluminium *foam* yang cukup baik ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Spesimen aluminium *foam* hasil pengecoran (berhasil)

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *foam* yang terbentuk sudah tersebar lebih baik. Hal tersebut diakibatkan dari NaCl yang sudah tersebar lebih merata dan tetap pada bentuk solidnya, serta lelehan aluminium yang sudah dapat masuk sampai dasar dari cetakan.



POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA  
LABORATORIUM UJI BAHAN

OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY RESULT

No. SPK : - Penandaan : -  
Pelanggan : MHS T. MATERIAL - ITS Material : ALUMINIUM 6061  
Proyek : - Dimensi : DIA. 44x30mm  
Kepala Lab. : - Heat No. : -  
Program : AL\_000 Keterangan : -

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	97.8	0.611	0.250	0.289	0.0139	0.775	0.0192	0.0937
2	97.9	0.611	0.224	0.299	0.0129	0.740	0.0144	0.0938
3	97.8	0.611	0.215	0.286	0.0124	0.740	0.0175	0.0926
4	97.8	0.613	0.221	0.283	0.0135	0.757	0.0212	0.0942
Ave	97.8	0.612	0.227	0.289	0.0132	0.753	0.0181	0.0936

	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0.0083	0.0266	< 0.0001	0.0003	0.0001	0.0035	0.0100	0.0001
2	0.0070	0.0234	< 0.0001	0.0004	< 0.0001	0.0034	< 0.0005	0.0001
3	0.0068	0.0215	< 0.0001	0.0001	0.0001	0.0075	0.0019	0.0001
4	0.0066	0.0233	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0041	0.0329	< 0.0001
Ave	0.0072	0.0237	< 0.0001	0.0002	0.0001	0.0046	0.0112	0.0001

	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0.0170	0.0022	< 0.0005	0.0023	0.0014	0.0137	0.0005	< 0.0010
2	0.0131	0.0020	< 0.0005	< 0.0003	0.0012	0.0123	< 0.0001	< 0.0010
3	0.0167	0.0019	< 0.0005	0.0032	0.0014	0.0129	0.0005	< 0.0010
4	0.0166	0.0019	< 0.0005	0.0034	0.0018	0.0121	< 0.0001	< 0.0010
Ave	0.0159	0.0020	< 0.0005	0.0022	0.0014	0.0127	0.0002	< 0.0010

	Ag	Hg	In	Sb	P	As	Ce	La
1	0.0031	< 0.0005	0.0046	0.0229	< 0.0020	0.0051	0.0046	0.0021
2	< 0.0001	< 0.0005	0.0026	< 0.0050	< 0.0020	0.0056	0.0065	0.0034
3	< 0.0001	< 0.0005	0.0057	0.0716	< 0.0020	< 0.0030	0.0044	0.0034
4	0.0008	< 0.0005	< 0.0020	< 0.0050	< 0.0020	< 0.0030	0.0045	0.0022
Ave	0.0010	< 0.0005	0.0037	0.0243	< 0.0020	0.0034	0.0050	0.0028

Surabaya, 4/22/2022

Diuji oleh: -

Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo Surabaya (Indonesia)  
Tel. : +62 31 5999444 Fax: +62 31 5999444

## PAKISTAN INSPECTION CORPORATION

ROOM NO. 609-611, MUHAMMADI HOUSE,  
I.I. CHUNDRIGAR ROAD, P.O. BOX 4749 KARACHI.

No. 10121/2019

Date 17-Jun-2019

### Certificate of Analysis "Dark Pink Fine Salt"

Client Name & Address:

Description Of Samples: Salt (As Stated)

Marking (If Any): Himalayan Dark Pink Fine Salt (Lot # HMC170)  
(As Stated,)

No. Of Samples: 01

Sample Condition Upon Receipt: Satisfactory & Unsealed Date: 12-06-2019

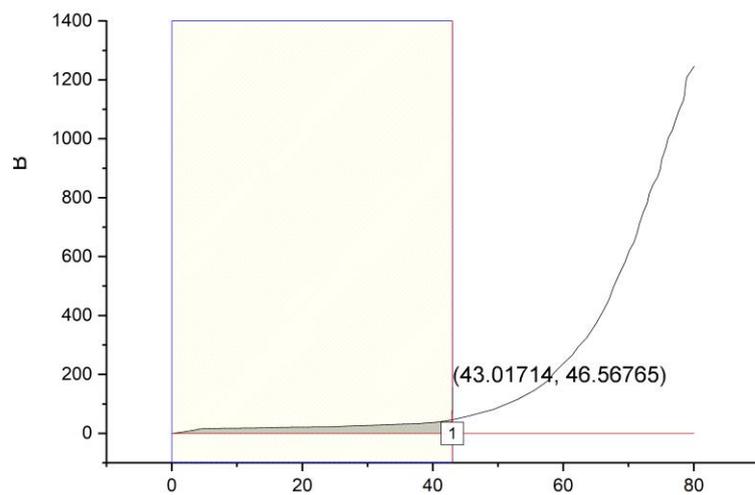
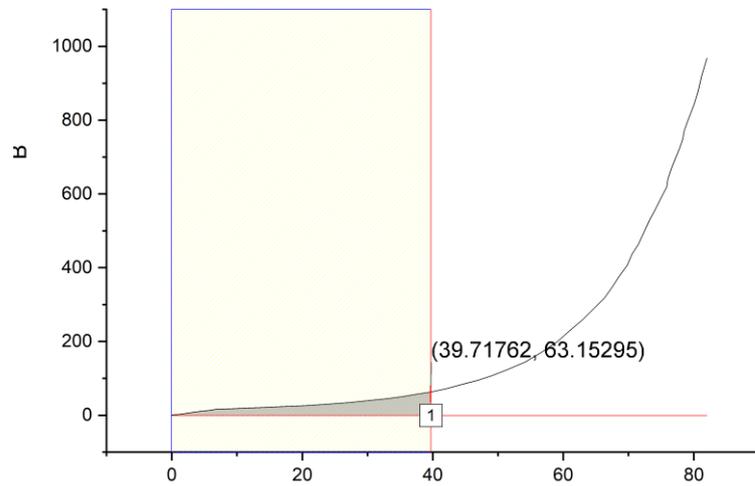
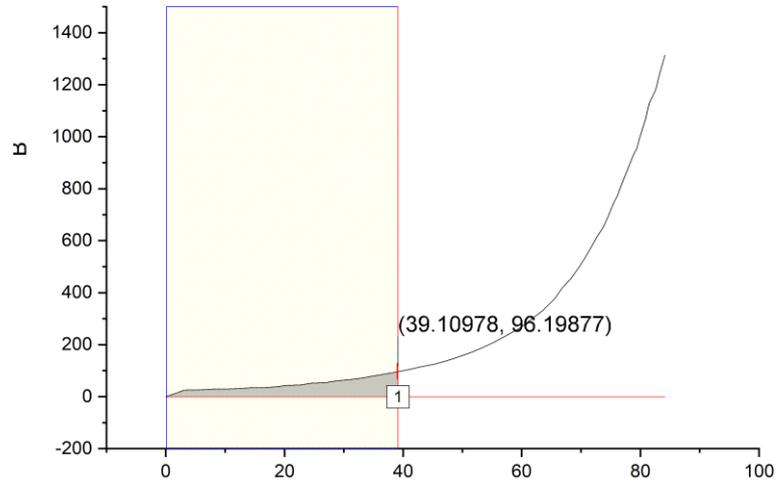
Environmental Conditions: Temperature: NA Humidity: NA

Sr. #	Parameter	Method	Unit	Test Results
02	Purity (Mol)	Had calculated on dry basis	%	97.15
03	Calcium (Ca)	By EDTA Titration	%	0.08
04	Magnesium (Mg)	By EDTA Titration	%	0.04
05	Sulphate (SO <sub>4</sub> )	By Barium Chloride & HCL (Gravimetric)	%	0.86
06	Water Insoluble	By (Gravimetric)	%	0.72
07	Moisture	Moisture by Drying at 140°C for 2 Hour	%	0.10

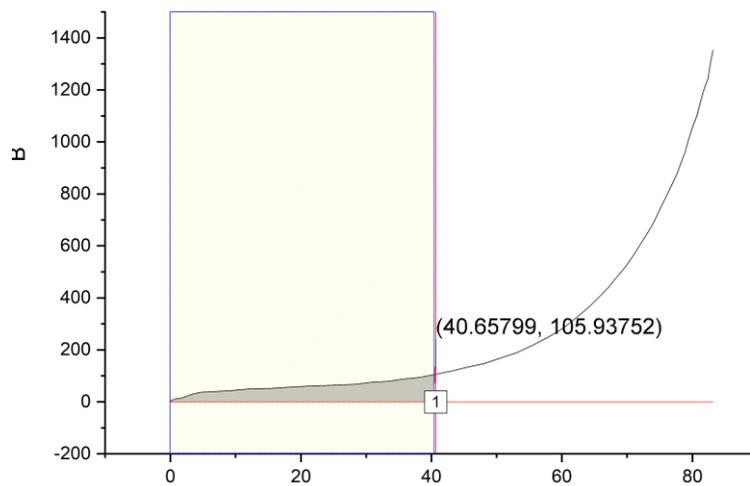
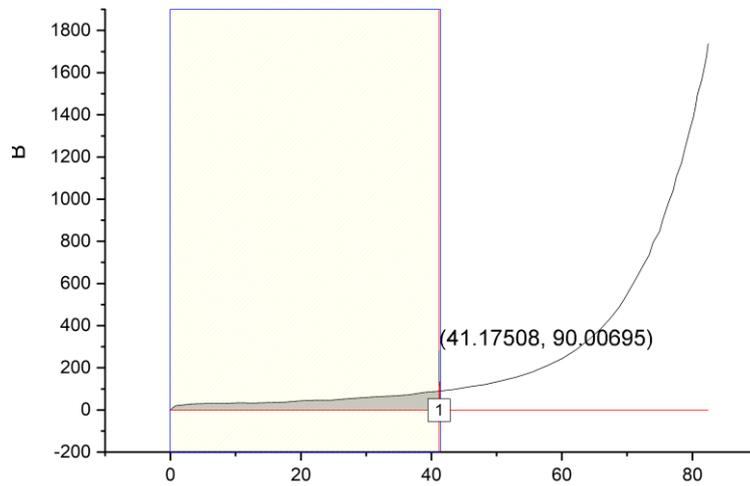
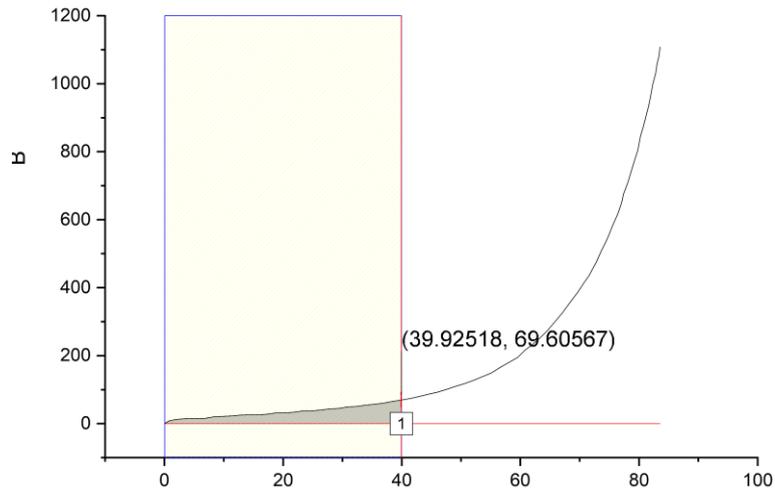


ALL INSPECTIONS ARE CARRIED OUT TO THE BEST OF OUR KNOWLEDGE  
AND ABILITY BUT WITHOUT RESPONSIBILITY ON OUR PART

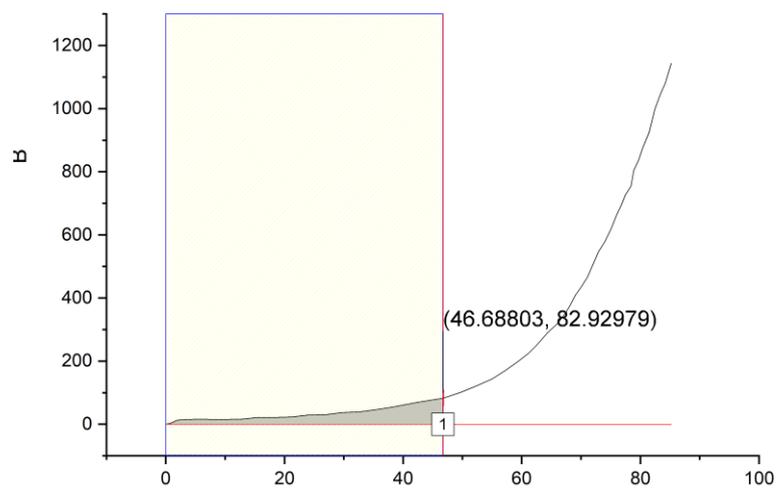
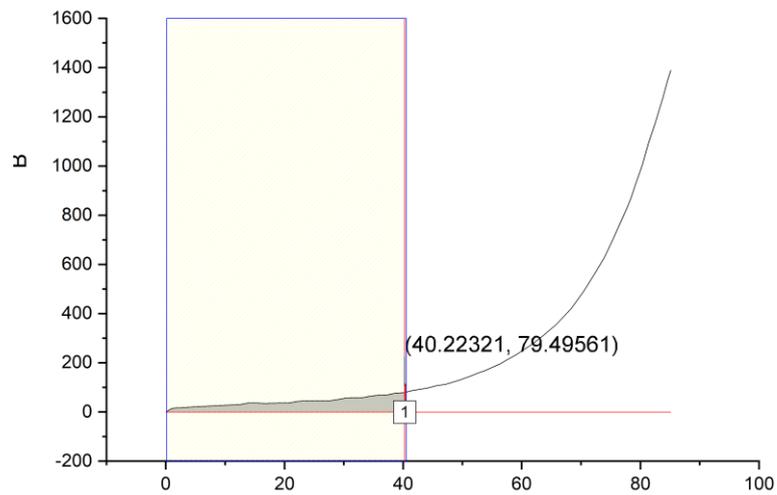
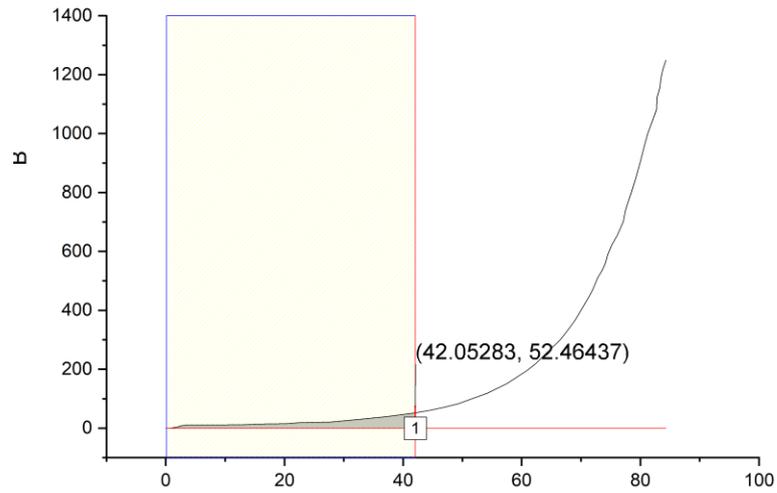
Non-HT Luas Daerah Plateau



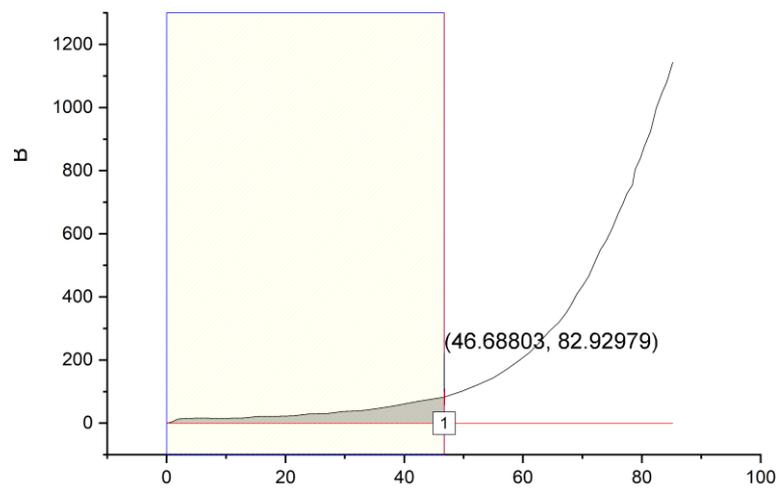
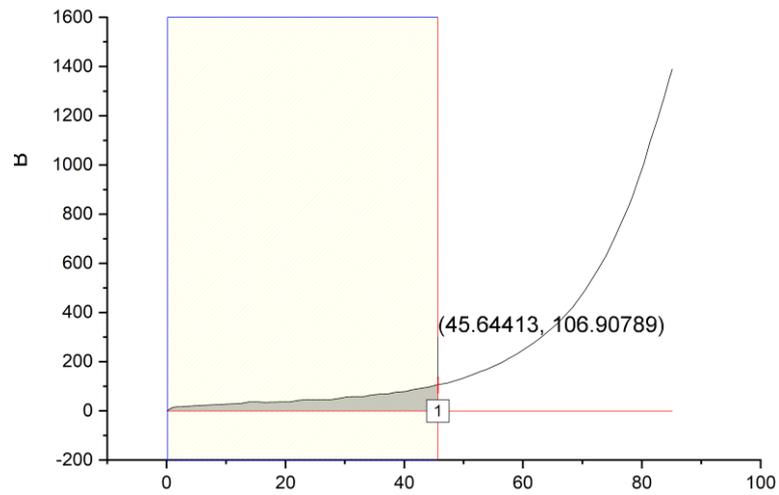
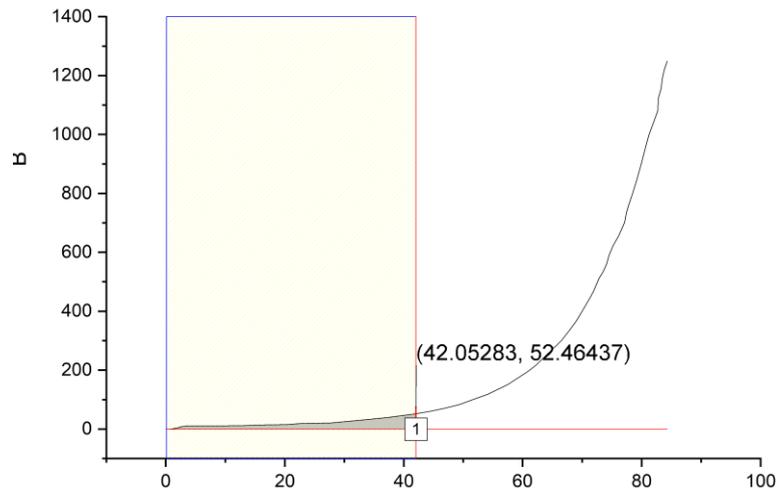
AA5 Luas Daerah Plateau



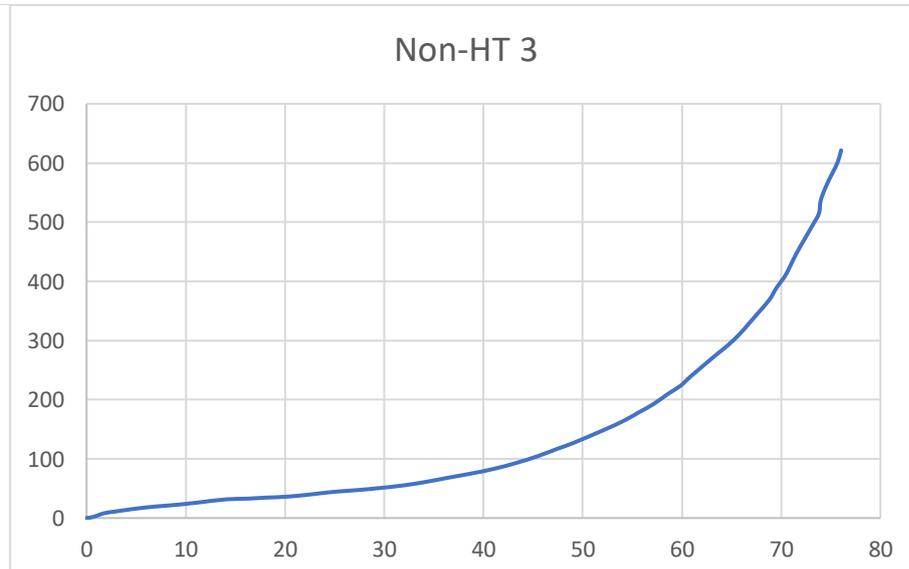
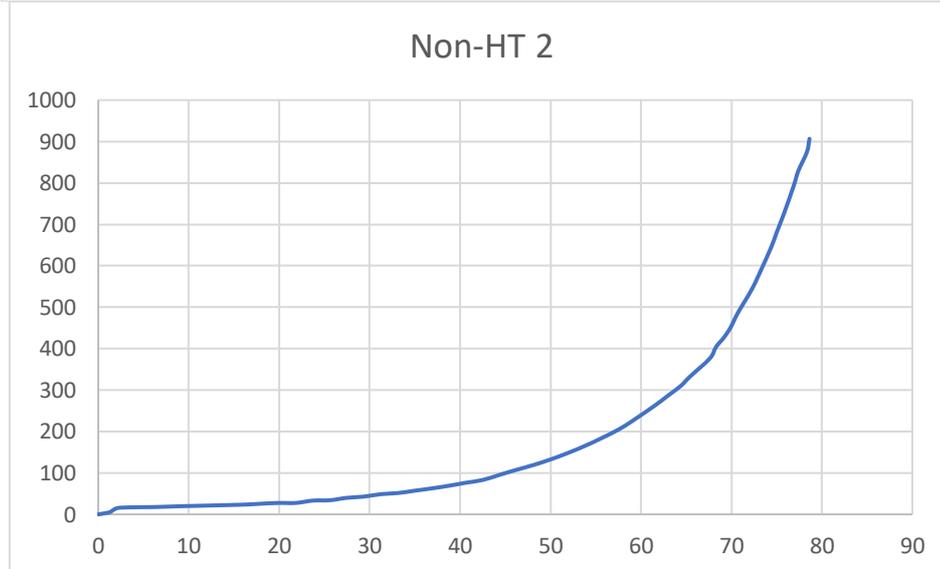
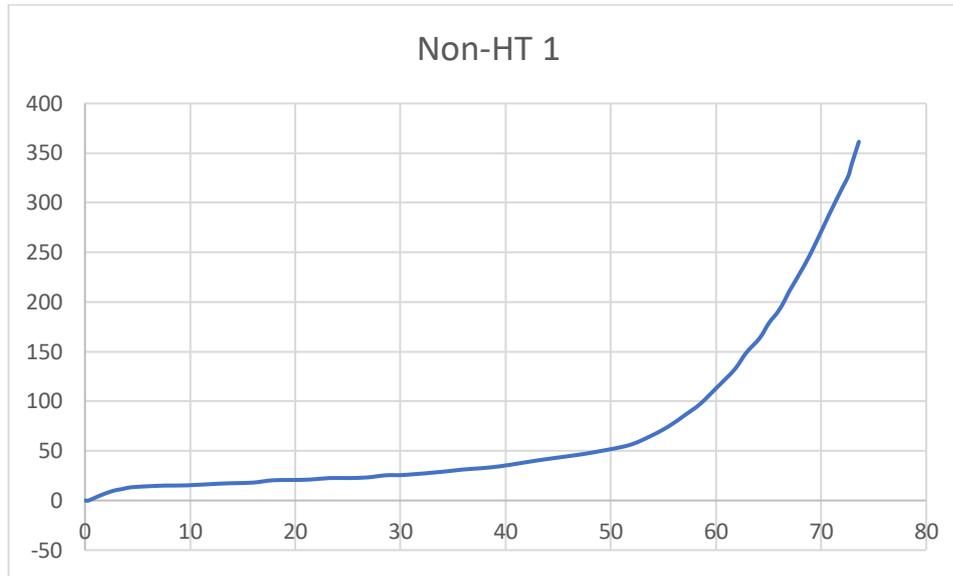
AA6 Luas Daerah Plateau



AA7 Luas Daerah Plateau

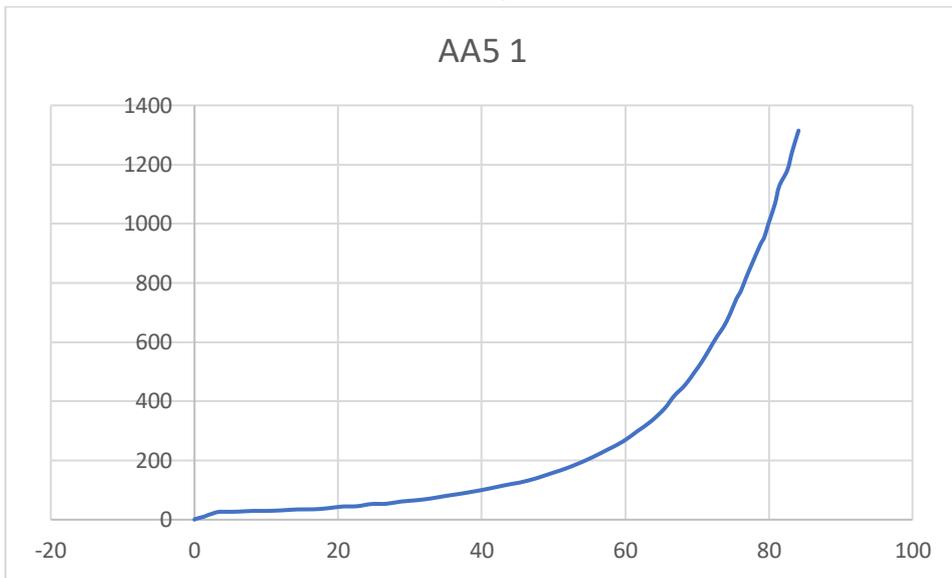


Grafik Kompresi  
Non-HT

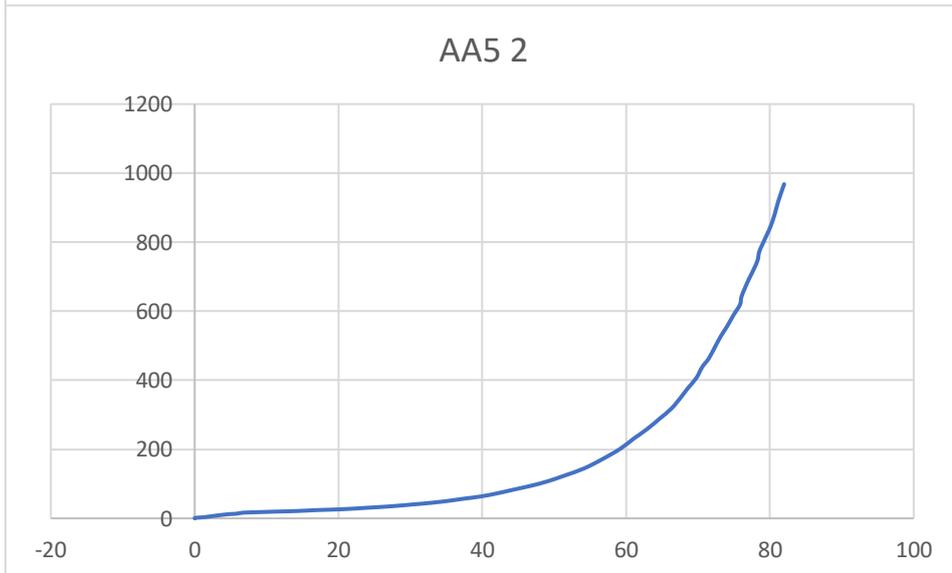


AA5

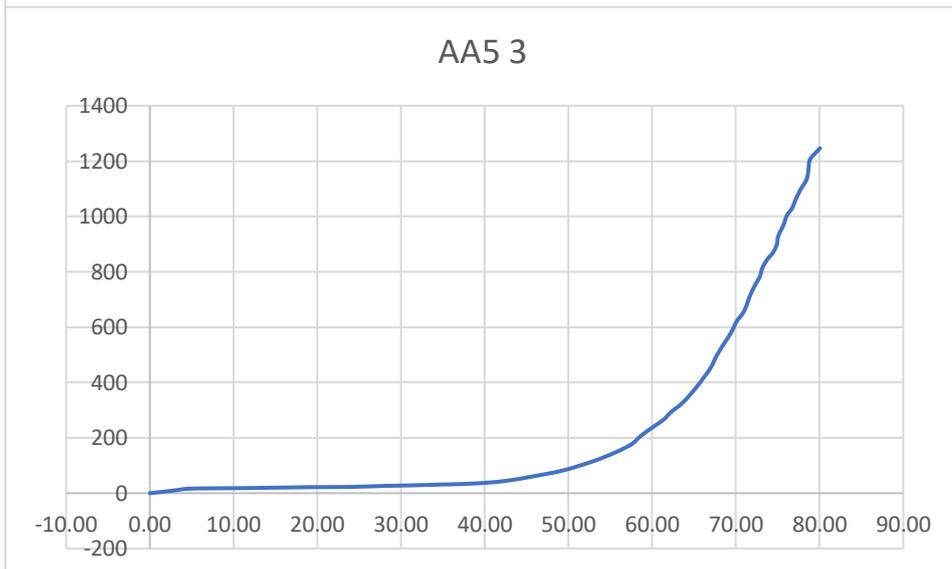
AA5 1



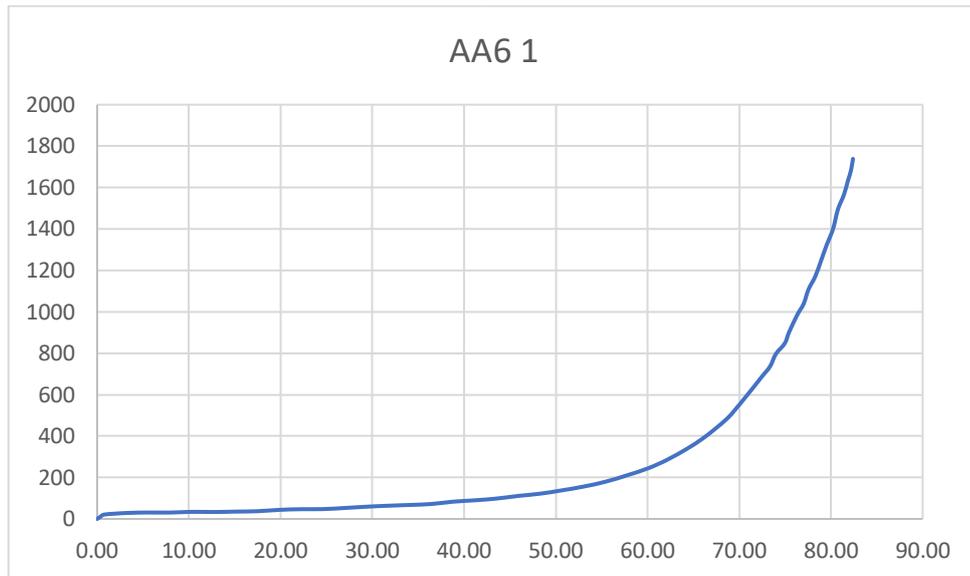
AA5 2



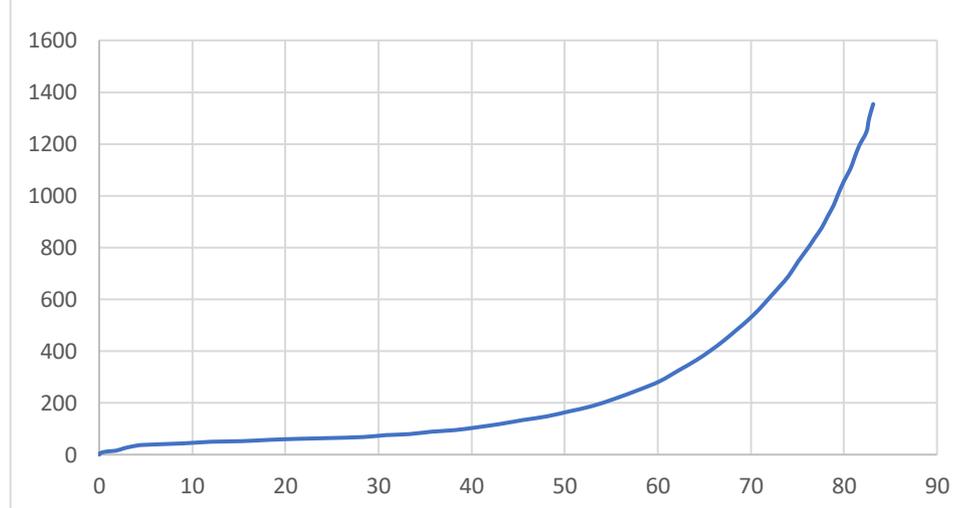
AA5 3



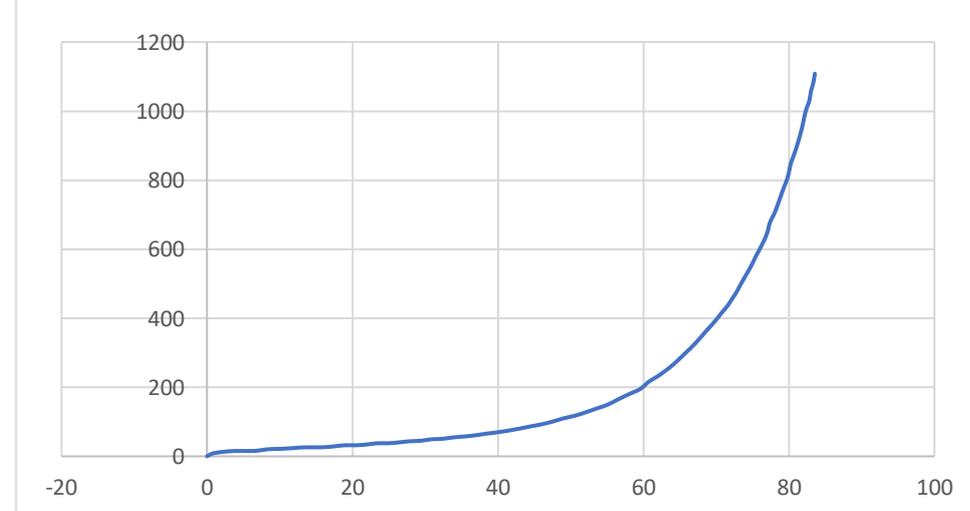
AA6



AA6 2

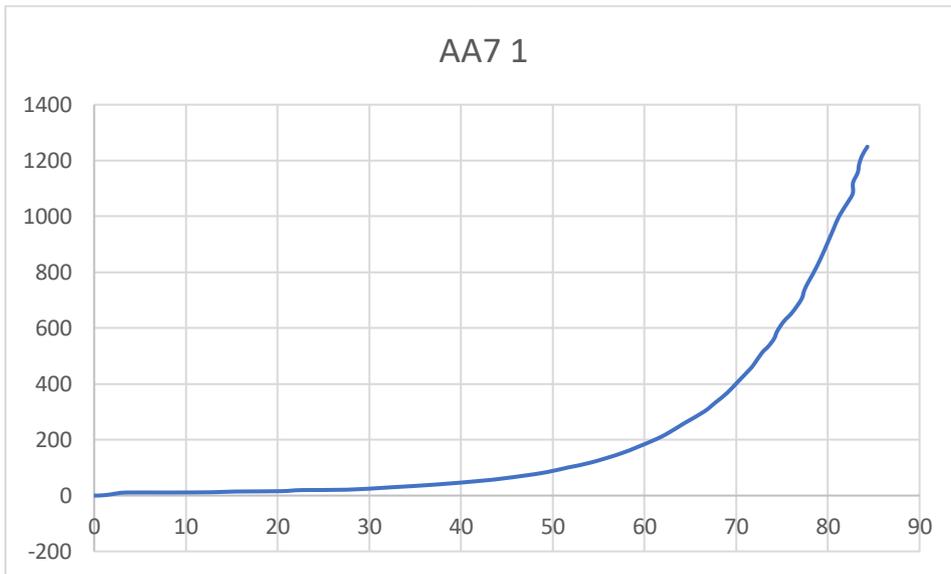


AA6 3

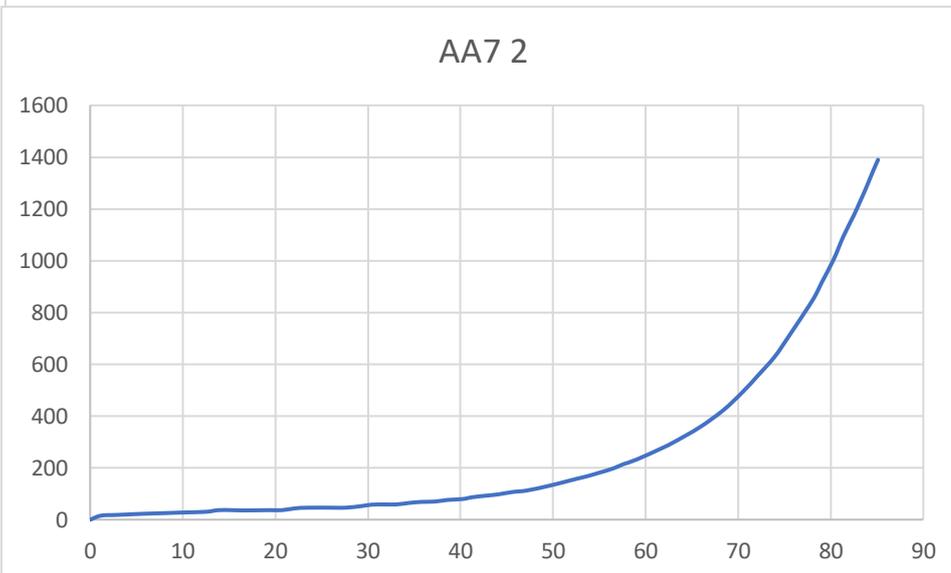


AA7

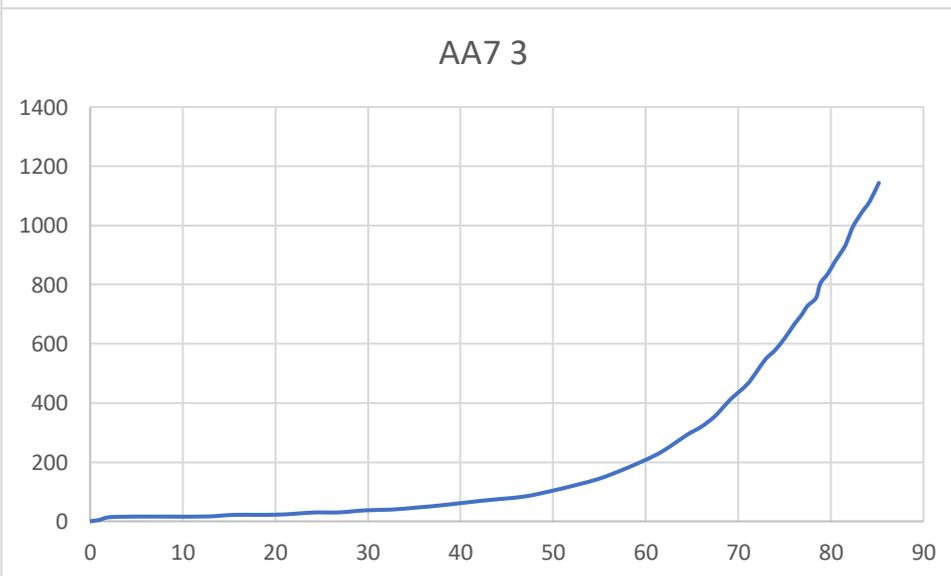
AA7 1



AA7 2



AA7 3



Hasil perhitungan impact

SPESIMEN	KE-	SUDUT AWAL	SUDUT AKHIR	cos ( $\alpha$ )	cos ( $\beta$ )
NON-HT	1	150	123.7	-0.866025404	-0.554844427
	2	150	124	-0.866025404	-0.559192903
	3	150	123	-0.866025404	-0.544639035
AA 5	1	150	114	-0.866025404	-0.406736643
	2	150	125	-0.866025404	-0.573576436
	3	150	113	-0.866025404	-0.390731128
AA 6	1	150	112	-0.866025404	-0.374606593
	2	150	108	-0.866025404	-0.309016994
	3	150	125	-0.866025404	-0.573576436
AA 7	1	150	110	-0.866025404	-0.342020143
	2	150	107.5	-0.866025404	-0.3007058
	3	150	124	-0.866025404	-0.559192903
HASIL (J)	RATA-RATA (J)		HASIL (kJ/m <sup>2</sup> )	Rata-rata Kekuatan Impact (kJ/m <sup>2</sup> )	
1.103335717	1.110257889		13.79169646	13.87822362	
1.087917586			13.59896983		
1.139520365			14.24400456		
1.628472602	1.450204584		20.35590752	18.1275573	
1.036918757			12.96148446		
1.685222394			21.06527993		
1.742394191	1.584754748		21.77992738	19.80943435	
1.974951297			24.68689121		
1.036918757			12.96148446		
1.857934012	1.650090467		23.22417515	20.62613083	
2.004419802			25.05524752		
1.087917586			13.59896983		

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

---

---

## UCAPAN TERIMA KASIH

Sangat banyak dukungan yang diterima oleh penulis dari berbagai pihak selama masa pengerjaan laporan penelitian tugas akhir ini. Oleh karenanya, penulis hendak menyampaikan rasa terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dan dorongan yang di antaranya:

1. Ayah, Ibu, dan Adik-adik serta keponakan penulis yang senantiasa memberi dukungan dan doa kepada penulis.
2. Seluruh guru dan dosen penulis yang dengan sabar membimbing dan memberi ilmu, nasihat serta pengalaman selama penulis menempuh pendidikan.
3. Miftakhul Arzaq Chusnul Maulana Ischaq dan Reynald Renanda Maulidana yang merupakan partner Tugas Akhir penulis serta rekan-rekan satu bimbingan yakni Bagastia Alief Safano dan Hanggoro Putra Pramudya Gianto yang telah berjuang bersama dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.
4. Anggota Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur serta Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material yang membantu dan menemani penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
5. Pak Sumarsono dan Pak Basuki yang telah mengawasi dan mengajari penulis cara untuk mengoperasikan burner dengan benar dan aman.
6. Pas Asman yang rela mengantar penulis dan teman-teman ke tempat pengujian kompresi yang berada di Waru, Sidoarjo.
7. Keluarga BADUY yang selalu memberikan doa dan dukungan kepada penulis selama masa perkuliahan serta selalu menghadirkan informasi menarik dan menjadi tempat untuk melepaskan penat.
8. Sae Fitri Novianti yang senantiasa menemani, memberikan dukungan, motivasi, doa, dan tempat penulis bercerita selama masa perkuliahan.
9. Keluarga besar MT20 yang telah menemani dan mewarnai kehidupan perkuliahan penulis dari awal hingga akhir.
10. Semua pihak yang telah ambil bagian dalam kehidupan penulis sehingga bisa sampai di titik ini yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Akhir kata, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mebanu penulis selama berkuliah hingga menyelesaikan Tugas Akhir ini, semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat untuk pengembangan lebih lanjut, khususnya demi kemajuan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS dan Indonesia.

Surabaya, 14 Juli 2022

Penulis

Muhamad Zaki Ramadhan

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Muhamad Zaki Ramadhan lahir di Serang pada tanggal 16 Desember 1999. Merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Bertempat tinggal di Komp. Puri Serang Hijau, Cipocok Jaya, Serang, Banten. Riwayat pendidikan masuk ke TK An-Nur pada umur yang belum genap 7 tahun, kemudian berlanjut ke SD Cipocok Jaya 1 dan lulus pada tahun 2012, kemudian SMP di Islamic Boarding School Daarul Ishlah dan lulus pada tahun 2015, dan melanjutkan pendidikan ke SMA Negeri 1 Tengeran dan lulus pada tahun 2018. Kemudian melanjutkan ke dunia perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem angkatan 2018. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi dan menjabat sebagai staff ahli di Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa – Lanjut. Penulis juga pernah tergabung dalam *Student Chapter Indocor (Indonesian Corrosion Association)* ITS menjabat sebagai staff. Penulis dapat dihubungi melalui nomor telepon +6282120191378 dan alamat email [zakirm2515@gmail.com](mailto:zakirm2515@gmail.com).

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*