

TUGAS AKHIR – TL184834

PENGARUH *HOLDING TIME* PADA *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* DENGAN *SPACE HOLDER NaCl*

MIFTAKHUL ARZAQ CHUSNUL MAULANA ISHAQ
NRP. 0251184000025

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 *HOLDING TIME* PADA *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* DENGAN *SPACE HOLDER* NaCl

MIFTAKHUL ARZAQ CHUSNUL MAULANA ISHAQ
NRP. 02511840000025

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 FOR SOLUTION
TREATMENT ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL
CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si ALLOY FOAM WITH
SPACE HOLDER NaCl**

MIFTAKHUL ARZAQ CHUSNUL MAULANA ISCHAQ
NRP. 0251184000025

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 left blank)

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH *HOLDING TIME* PADA *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* DENGAN *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 : **MIFTAKHUL ARZAQ CHUSNUL MAULANA ISCHAQ**
NRP. 0251184000025

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 Nurdiansah, S.T., M.T.



[Signature]
Pembimbing

[Signature]
Ko-Pembimbing

[Signature]
Penguji

[Signature]
Penguji

SURABAYA
Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

THE EFFECT OF HOLDING TIME FOR SOLUTION TREATMENT ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si ALLOY FOAM WITH 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 : **MIFTAKHUL ARZAQ CHUSNUL MAULANA ISCHAQ**
NRP. 0251184000025

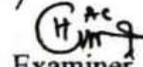
Approved by Final Project Examiner Team :

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 Nurdiansah, 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 : Miftakhul Arzaq Chusnul Maulana Ischaq /
0251184000025
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing/NIP : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. / 198405152014042003

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "PENGARUH *HOLDING TIME* PADA *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* DENGAN 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, 25 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing



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

Mahasiswa



(Miftakhul Arzaq Chusnul M.I.)
NRP. 0251184000025

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

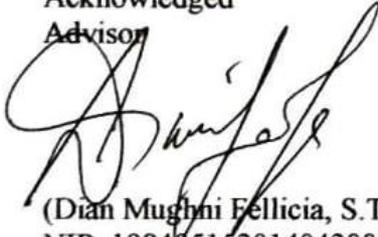
Name of student/NRP : Miftakhul Arzaq Chusnul Maulana Ischaq /
0251184000025
Departement : Material and Metallurgical Engineering
Advisor/NIP : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. / 198405152014042003

Hereby declare that the Final Project with the title of "THE EFFECT OF HOLDING TIME FOR SOLUTION TREATMENT ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AL-Mg-Si FOAM WITH 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, July 25th 2022

Acknowledged
Advisor



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

Student



(Miftakhul Arzaq Chusnul M.I.)
NRP. 0251184000025

(This page is intentionally blank)

**PENGARUH *HOLDING TIME* PADA *SOLUTION TREATMENT* TERHADAP
KARAKTERISTIK FISIK DAN MEKANIK PADUAN Al-Mg-Si *FOAM* DENGAN
SPACE HOLDER NaCl**

Nama Mahasiswa/NRP : Miftakhul Arzaq Chusnul Maulana Ischaq/
0251184000025
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

Crashbox adalah komponen yang penting pada mobil karena dapat menyerap energi kinetik ketika terjadi benturan sehingga dapat meminimalisir cedera pada penumpang. Performa *crashbox* perlu ditingkatkan agar dapat lebih menjamin keselamatan dan keamanan penumpang dengan cara mengaplikasikan aluminium foam sebagai *filler* di dalamnya dan harus memenuhi spesifikasi tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik fisik dan mekanik dari aluminium foam setelah diberi perlakuan panas *precipitation hardening* sehingga dapat memenuhi spesifikasi tersebut. Pengujian komposisi menggunakan *Spark-OES* dilakukan pada bahan penelitian yaitu paduan Al-Mg-Si yang kemudian dilebur dan dijadikan aluminium foam dengan NaCl sebagai *space holder*. Aluminium foam kemudian diberi perlakuan *solution treatment* pada temperatur 530 °C dengan variasi *holding time* selama 50 menit, 75 menit, dan 100 menit. Kemudian dilakukan *quenching* dengan udara dan dilakukan *artificial aging*. Pada ketiga variasi terjadi peningkatan *lattice constant* α -aluminium bila dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan yang mengindikasikan adanya *lattice strain* yang ditimbulkan oleh keberadaan presipitat. Pada ketiga spesimen ini juga terdeteksi *peak* Mg₂Si, yang artinya presipitat yang terbentuk adalah Mg₂Si. Semakin lama *holding time*, *lattice constant* dari α -aluminium semakin kecil menunjukkan *lattice strain* semakin berkurang. Pada ketiga variasi memperlihatkan adanya bintik-bintik hitam yang berukuran sangat kecil dan tersebar merata pada matriks α -aluminium yang mengandung unsur paduan Mg dan Si. Kadar Si naik seiring bertambahnya *holding time*. Bila diasumsikan semua Si membentuk Mg₂Si, maka kadar Mg₂Si juga naik seiring bertambahnya durasi *holding time*. Semakin lama *holding time* mengakibatkan nilai kekerasan, kekuatan densifikasi, *modulus young*, dan kekuatan impak menurun sedangkan keuletan meningkat. *Holding time* selama 100 menit merupakan waktu yang optimal karena dapat menghasilkan kemampuan absorpsi energi yang tertinggi yaitu 15,282 MJ/m³ dengan kombinasi yang bagus antara kekuatan sebesar 78,735 MPa dan keuletan 44,225% serta *modulus young* 0,915 GPa.

Kata Kunci: *Aluminium foam, Paduan Al-Mg-Si, Mg₂Si, Sifat mekanik, Solution treatment*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH VARIASI KECEPATAN TEMPUH DAN WAKTU
KEBERANGKATAN MOBIL PEMUDIK PADA LEBARAN TAHUN 2022 PADA
TINGKAT KEMACETAN PINTU TOL SURABAYA (INGGRISIN)**

Student Name / NRP : Miftakhul Arzaq Chusnul Maulana Ischaq/0251184000025
Departement : Material and Metallurgical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.
Co-Advisor : Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Crashbox is an important component in the car because it can absorb kinetic energy when a collision occurs to minimize injury to passengers. Crashbox performance needs to be improved to better ensure the safety and security of passengers by applying aluminium foam as a filler in it and must meet certain specifications. This study aims to analyze the physical and mechanical characteristics of aluminium foam after being heat treated with precipitation hardening so that it can meet these specifications. The composition test using Spark-OES was carried out on the research material, namely the Al-Mg-Si alloy which was then melted and made into the aluminium foam with NaCl as a space holder. The aluminium foam was then given solution treatment at a temperature of 530 °C with variations of holding time for 50 minutes, 75 minutes, and 100 minutes. Then it is quenched with air and artificial aging is done. In the three variations, there was an increase in the lattice constant of α -aluminium when compared to the untreated specimens which indicated the presence of lattice strain caused by the presence of the strengthening constituent. Mg_2Si peaks were also detected in these three specimens, which means that the strengthening constituent was Mg_2Si . The longer the holding time, the smaller the lattice constant of α -aluminium indicating that the lattice strain is decreasing. The three variations showed the presence of very small and evenly distributed black spots on the α -aluminium matrix containing alloying elements of Mg and Si. Si content increases with increasing holding time. If it is assumed that all Si forms Mg_2Si , then the Mg_2Si content also increases with increasing holding time duration. The longer the holding time causes the value of hardness, densification strength, Young's modulus, and impact strength to decrease while the ductility increases. Holding time for 100 minutes is the optimal time because it can produce the highest energy absorption capability of 15.282 MJ/m³ with a good combination of strength of 78.735 MPa and ductility of 44.225% and Young's modulus of 0.915 GPa.

Keywords: *Aluminium foam, Al-Mg-Si alloy, Mg_2Si , Mechanical properties, Solution treatment*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayah-Nya, tidak lupa sholawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis diberi ketekunan dalam menyelesaikan penelitian Tugas Akhir yang berjudul “Pengaruh *Holding Time* pada *Solution Treatment* Terhadap Karakteristik Fisik dan Mekanik Paduan Al-Mg-Si *Foam* dengan *Space Holder* NaCl”.

Atas terselesaikannya penelitian ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih sebesar-besarnya atas dukungan, doa, bantuan, motivasi, dan partisipasi dari semua pihak baik dari segi moril maupun materiil kepada:

1. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T, M.Sc. dan Bapak Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas segala ilmu dan bimbingannya yang telah diberikan selama pelaksanaan Tugas Akhir hingga penyusunan laporan Tugas Akhir.
2. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
3. Bapak Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D., selaku dosen wali penulis yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
4. 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, 25 Juli 2022
Penulis

Miftakhul Arzaq Chusnul Maulana Ischaq

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

Abstrak	xiii
Abstract	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Definisi Umum Aluminium <i>Foam</i>	3
2.2 Karakteristik Fisik Aluminium <i>Foam</i>	3
2.3 Karakteristik Mekanik Aluminium <i>Foam</i>	4
2.4 Bahan Dasar Aluminium <i>Foam</i>	5
2.4.1 Aluminium Murni	5
2.4.2 Paduan Aluminium	6
2.5 Metode Pembuatan Aluminium <i>Foam</i>	6
2.5.1 <i>Gas Injection</i>	7
2.5.2 <i>Blowing Agent</i>	7
2.5.3 <i>Casting</i>	8
2.5.4 <i>Sintering</i> Serbuk Logam	10
2.6 Aplikasi Aluminium <i>Foam</i>	10
2.7 <i>Heat Treatment</i>	12
2.7.1 <i>Heat Treatment</i> pada Paduan Aluminium	12
2.8 Penelitian Sebelumnya	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Diagram Alir	15
3.2 Bahan Penelitian	17
3.3 Peralatan Penelitian	17
3.4 Instrumen Karakterisasi Material	18
3.5 Metode Penelitian	18
3.5.1 Studi Literatur	18
3.5.2 Pengecoran Aluminium <i>Foam</i>	19
3.5.3 <i>Heat Treatment</i>	19
3.6 Pengujian	19
3.6.1 Pengujian Densitas dan Porositas	19
3.6.2 Pengujian Mikroskop Stereo	20
3.6.3 Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	20
3.6.4 Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray</i> (SEM-EDX)	20
3.6.5 Pengujian Kekerasan	21
3.6.6 Pengujian Kompresi	21
3.6.7 Pengujian Impak	21
3.7 Rancangan Penelitian	22

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Hasil dan Pembahasan Pengujian Komposisi	25
4.2 Hasil dan Pembahasan Pengujian Densitas dan Porositas	25
4.3 Hasil dan Pembahasan Pengujian Mikroskop	28
4.4 Hasil dan Pembahasan Pengujian XRD	29
4.5 Hasil dan Pembahasan Pengujian SEM-EDX.....	31
4.6 Hasil dan Pembahasan Pengujian Kekerasan.....	33
4.7 Hasil dan Pembahasan Pengujian Kompresi.....	34
4.8 Hasil dan Pembahasan Pengujian Impak	39
4.9 Karakteristik Fisik dan Karakteristik Mekanik Paduan Al-Mg-Si <i>Foam</i> Hasil Perlakuan Panas	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN.....	49
UCAPAN TERIMA KASIH	71
BIODATA PENULIS.....	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur aluminium <i>foam</i> : (a) <i>Closed-cell</i> dan (b) <i>Open-cell</i>	3
Gambar 2.2	Morfologi porositas aluminium <i>foam</i> dengan tipe <i>open cell</i>	4
Gambar 2.3	Kurva <i>stress-strain</i> aluminium <i>foam</i>	4
Gambar 2.4	Proses <i>foaming</i> dengan <i>gas injection</i>	7
Gambar 2.5	Proses <i>foaming</i> dengan <i>blowing agent</i>	8
Gambar 2.6	Proses pengecoran cetakan permanen: (a) Cetakan di- <i>preheat</i> dan dilapisi, (b) Cetakan ditutup dan dituangkan logam cair, (c) Cetakan dibuka dan benda kerja dikeluarkan, (d) Benda kerja	9
Gambar 2.7	Proses <i>foaming</i> dengan <i>filler space holder</i>	9
Gambar 2.8	Proses pembuatan Aluminium <i>Foam</i> dengan <i>space holder</i> NaCl	10
Gambar 2.9	Letak <i>crashbox</i> pada mobil	11
Gambar 2.10	Aplikasi aluminium <i>foam</i> pada <i>crash box</i>	12
Gambar 2.11	Proses <i>precipitation hardening</i>	13
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	16
Gambar 3.2	Logam paduan Al-Mg-Si	17
Gambar 3.3	Gambar NaCl kristal	17
Gambar 4.1	Hasil pengecoran aluminium <i>foam</i>	26
Gambar 4.2	Spesimen uji densitas dan porositas	26
Gambar 4.3	Grafik hasil pengujian densitas	26
Gambar 4.4	Grafik persentase porositas	27
Gambar 4.5	Hasil pengujian mikroskop stereo perbesaran 10x pada sampel aluminium <i>foam</i> : (a) sampel pertama, (b) sampel kedua, (c) sampel ketiga, (d) sampel keempat	28
Gambar 4.6	Perbandingan hasil pengujian XRD	30
Gambar 4.7	Hasil pengujian SEM: (a) Spesimen non-HT, (b) Spesimen SHT50, (c) Spesimen SHT75, (d) Spesimen SHT100	32
Gambar 4.8	Hasil pengujian EDX: (a) Spesimen non-HT, (b) Spesimen SHT50, (c) Spesimen SHT75, (d) Spesimen SHT100	32
Gambar 4.9	Perbandingan nilai kekerasan.....	33
Gambar 4.10	Spesimen pengujian kompresi	34
Gambar 4.11	Perbandingan nilai <i>densification stress</i>	35
Gambar 4.12	Perbandingan nilai <i>modulus young</i>	35
Gambar 4.13	Perbandingan nilai keuletan	36
Gambar 4.14	Perbandingan nilai absorpsi energi	37
Gambar 4.15	Hubungan antara energi dengan deformasi.....	38
Gambar 4.16	Spesimen uji impak	39
Gambar 4.17	Hasil pengujian impak	39
Gambar 4.18	Hasil perhitungan <i>impact strength</i>	40

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat fisik dan sifat mekanik Aluminium.....	5
Tabel 2.2 Komposisi paduan Al-Mg-Si (6061)	6
Tabel 2.3 Sifat mekanik paduan Al-Mg-Si (6061)	6
Tabel 2.4 Perbandingan sifat mekanik aluminium murni dan paduan 6061.....	6
Tabel 2.5 Sifat fisik NaCl	9
Tabel 2.6 Perbandingan metode pembuatan aluminium <i>foam</i>	10
Tabel 2.7 Penelitian Sebelumnya.....	13
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian.....	22
Tabel 3.2 Jadwal Penelitian	23
Tabel 4.1 Hasil pengujian <i>Spark-OES</i> komposisi paduan Al-Mg-Si	25
Tabel 4.2 Hasil perhitungan pengujian XRD fasa α -aluminium	30
Tabel 4.3 Perbandingan sifat mekanik aluminium <i>foam</i> dengan standar	42

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kendaraan khususnya mobil memiliki komponen-komponen yang berperan untuk penyerapan energi ketika terjadi benturan, yaitu *bumper* dan *crashbox*. Komponen-komponen ini menyerap energi ketika terjadi benturan saat kecelakaan. Sebagai system keamanan pasif pada kendaraan mobil, *crashbox* diharapkan mampu menyerap energi kinetik saat terjadi benturan dari arah depan dengan tetap memperhatikan keamanan dan keselamatan, serta untuk menurunkan peluang cedera pada penumpang ketika terjadi tabrakan. Salah satu jenis material yang sering digunakan untuk *crashbox* adalah aluminium paduan tipe 6xxx (Abdullah et al., 2020). Performa dari *crashbox* dapat ditingkatkan dengan mengaplikasikan *metal foam* sebagai *filler* di dalam *crashbox* (Han et al., 2014).

Aluminium *foam* adalah salah satu jenis *metal foam* yang memiliki sifat ringan, kekuatan kompresif serta penyerapan energi yang bagus sehingga tepat untuk diterapkan pada bidang otomotif, kereta api, dan luar angkasa. Sifat mekanik dari aluminium *foam* dapat disesuaikan dengan cara mengatur parameter *foam* seperti densitas, porositas, morfologi, dan komposisi paduan (Soni & Biswas, 2016). Dengan sifat-sifat tersebut, aluminium *foam* memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai *filler* pada *crashbox* sehingga dapat meningkatkan performanya dalam menyerap energi benturan dan mengurangi kerusakan baik pada mobil maupun pada pengemudi. Aluminium *foam* yang digunakan untuk *filler crashbox* saat ini secara komersial memiliki kekuatan kompresi mencapai 20 MPa dan penyerapan energi mencapai 12 MJ/m³ (Han et al., 2014).

Paduan aluminium *foam* dapat diberi perlakuan panas untuk memodifikasi sifat mekaniknya (Dirk Lehmhus & Banhart, 2003). Perlakuan panas pada paduan aluminium *foam* dapat meningkatkan kekuatan kompresinya namun tetap memperhatikan sifat penyerapan energinya. Perlakuan panas pada aluminium *foam* terdiri dari dua tahap, tahap pertama adalah *solution treatment* untuk mendapatkan larutan padat yang homogen kemudian tahap kedua adalah *artificial aging* untuk menghasilkan presipitat di antara kristal logam sehingga meningkatkan kekuatan (Ambriz & Jaramillo, 2014).

Pada penelitian sebelumnya, Khan (Khan et al., 2018) melakukan perlakuan panas *precipitation hardening* dengan *solution treatment* dilakukan pada temperatur 505 °C selama 60 menit. *Quenching* dengan air dan udara. Kemudian dilakukan *artificial aging*. Hasil dari penelitiannya yaitu *precipitation hardening* meningkatkan *compression strength* dari aluminium *foam* sebesar 28% dibandingkan dengan *as-foamed*. *Water quench* mengakibatkan *thermal stress* hingga terjadi *crack*. Penelitian lain oleh Dahil (Dahil et al., 2020) menggunakan paduan Al160 dan *space holder* NaCl yang juga diberi perlakuan panas *precipitation hardening* dengan *solution treatment* dilakukan pada temperatur 500 °C selama 30 menit. Kemudian di-*quench* dan dilakukan *artificial aging*. Hasil yang didapat yaitu aluminium *foam* tanpa perlakuan memiliki kekuatan rendah dan kekerasan cukup tinggi. Perlakuan panas *solution treatment* kemudian *artificial aging* dapat menaikkan kekuatan namun terus menurun seiring bertambahnya deformasi.

Pada penelitian ini digunakan paduan Al-Mg-Si dan *space holder* NaCl untuk menghasilkan aluminium *foam*. *Heat treatment* yang diberikan adalah *precipitation hardening* dengan variasi *holding time* ketika *solution treatment*. Sampel yang dihasilkan selanjutnya diuji densitas dan porositas, uji mikroskop stereo, uji metalografi, uji XRD, uji kekerasan, uji kompresi, dan uji kompresi untuk menganalisis karakteristik fisik dan mekaniknya, diharapkan dapat memenuhi spesifikasi untuk diaplikasikan pada *crashbox* dengan kekuatan kompresi mencapai 20 MPa dan penyerapan energi mencapai 12 MJ/m³.

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh *holding time* pada *solution treatment* terhadap karakteristik fisik paduan Al-Mg-Si *foam*?
2. Bagaimana pengaruh *holding time* pada *solution treatment* terhadap karakteristik mekanik paduan Al-Mg-Si *foam*?

1.3 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 penuangan aluminium cair dianggap konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh *holding time* pada *solution treatment* terhadap karakteristik fisik paduan Al-Mg-Si *foam*.
2. Menganalisis pengaruh *holding time* pada *solution treatment* terhadap karakteristik mekanik paduan Al-Mg-Si *foam*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan aluminium *foam* menggunakan *space holder* NaCl yang mengalami peningkatan sifat mekanik dengan cara *solution treatment* kemudian *artificial aging*, untuk meningkatkan performa *crashbox* sehingga dapat digunakan sebagai rujukan terhadap penelitian-penelitian selanjutnya dalam pengembangan material aluminium *foam* yang memenuhi kriteria untuk aplikasi sebagai *filler crashbox* pada mobil.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

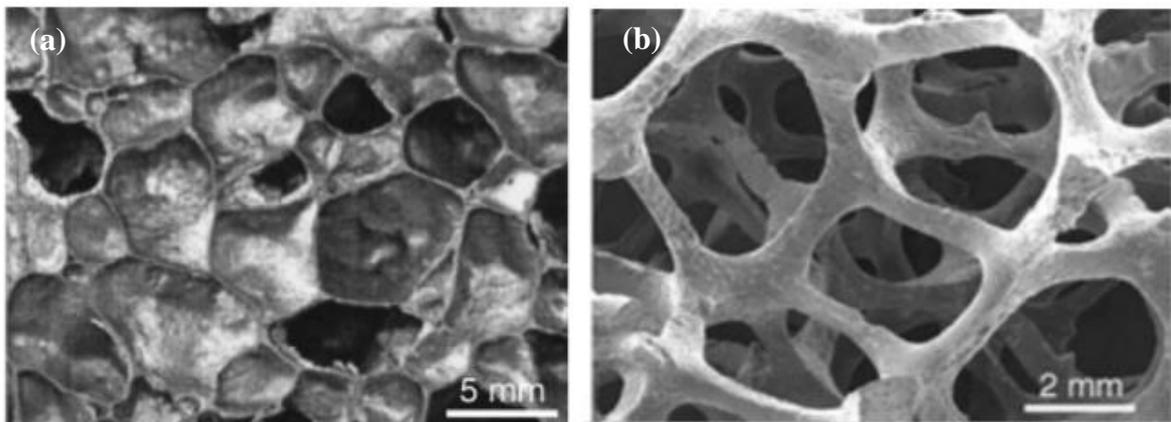
2.1 Definisi Umum Aluminium Foam

Aluminium *foam* merupakan logam aluminium yang memiliki tingkat porositas yang tinggi. Aluminium *foam* memiliki porositas dengan bentuk *uniform* dan tersebar merata di dalamnya yang mana menempati antara 70-95% dari total volume. Inilah yang mengakibatkan aluminium *foam* memiliki massa jenis yang rendah dan bersifat sangat ringan (Ozer et al., 2010). Aluminium *foam* memiliki kekuatan kompresif serta kapasitas penyerapan energi yang bagus sehingga tepat untuk diterapkan pada bidang otomotif, kereta api, dan luar angkasa yang membutuhkan sifat ringan dan mampu menyerap energi dengan baik. Sifat mekanik dari aluminium *foam* dapat disesuaikan dengan cara mengatur parameter *foam* seperti densitas, porositas, morfologi, dan komposisi paduan (Soni & Biswas, 2016).

Klasifikasi *closed-cell* dan *open-cell* pada aluminium *foam* didasarkan pada proses pembentukannya. Proses pembentukan *closed-cell* aluminium *foam* yang sering diterapkan adalah metode pengecoran, injeksi gas, dan kompaksi metalurgi serbuk. Aplikasi dari *closed-cell* aluminium *foam* biasa diterapkan sebagai material struktural yang berfungsi untuk menahan beban dan penyerap energi. Dalam hal proses pembentukan *open-cell* aluminium *foam*, metode yang paling umum digunakan adalah metode replikasi dan infiltrasi. Karena memiliki struktur *cell* yang terbuka dan saling terhubung, *open-cell* aluminium *foam* dapat diaplikasikan sebagai material struktural dan juga dapat digunakan pada lingkungan bertemperatur tinggi, penyerap suara, dan disipasi panas karena memiliki permeabilitas yang tinggi (Wan et al., 2021).

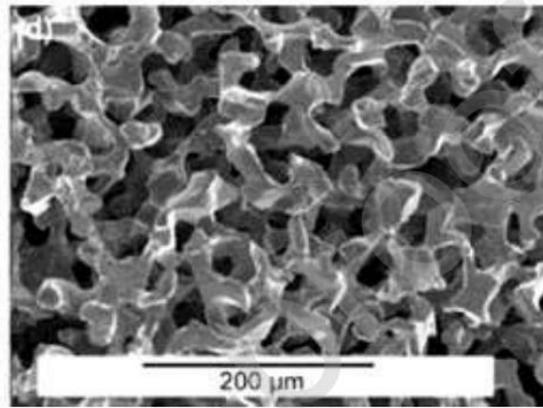
2.2 Karakteristik Fisik Aluminium Foam

Karakteristik aluminium *foam* dapat dilihat dari porositas, densitas, serta ukuran *cell* itu sendiri (Ashby et al., 2000). Porositas adalah persebaran fasa gas di dalam fasa cair maupun logam (J. Banhart, 2001). Berdasarkan karakteristik porositasnya, terdapat dua jenis struktur porositas dari aluminium *foam*, yaitu *closed-cell* dan *open-cell*. Pada struktur *closed-cell*, masing-masing *cell* dibatasi oleh suatu lapisan tipis logam yang *non-permeable*. Sedangkan pada struktur *open-cell*, semua *cell* saling terhubung satu sama lain sehingga memungkinkan untuk ditembus oleh air maupun fluida lainnya (Soni & Biswas, 2016). Tampilan struktur *closed-cell* dan *open-cell* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur aluminium *foam*: (a) *Closed-cell* dan (b) *Open-cell* (Kennedy, 2012)

Aluminium *foam closed-cell* umumnya digunakan pada bidang otomotif karena karena kemampuannya yang baik dalam menahan beban dan menyerap energi. Sedangkan *open-cell* aluminium *foam* umumnya digunakan dalam hal filtrasi temperatur tinggi, penyerapan suara, disipasi panas karena memiliki permeabilitas yang tinggi dengan adanya porositas yang terbuka dan saling terhubung (Kevorkijan*, 2010).

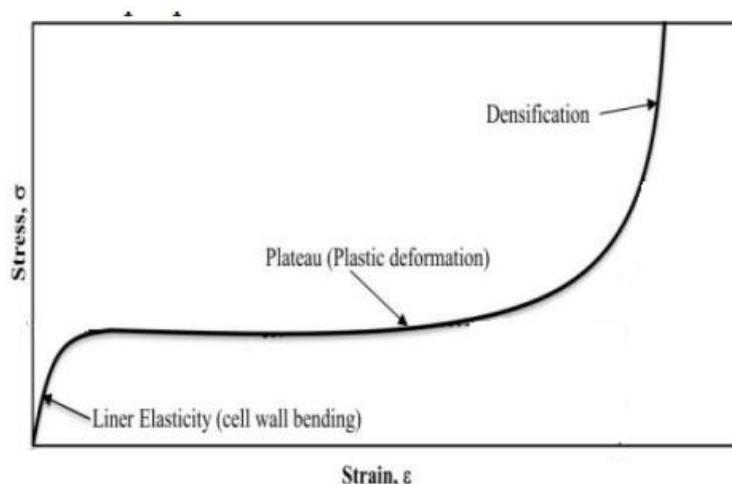


Gambar 2.2 Morfologi porositas aluminium *foam* dengan tipe *open cell* (Wan et al., 2021)

Gambar 2.2 di atas menunjukkan morfologi aluminium *foam* bertipe *open cell*. Pada gambar tersebut, bagian yang berwarna hitam menunjukkan adanya lubang, yang mengindikasikan bahwa tipe *foam* tersebut adalah *interconnected*. Ukuran dan jumlah porositas mempengaruhi densitas aluminium *foam* yang akan mempengaruhi sifat mekaniknya (Jang et al., 2015). Densitas aluminium *foam* berkisar antara 0,3 – 1,0 g/cm³. Densitas pada aluminium *foam* menggunakan prinsip pembagian massa benda (m) terhadap volume benda (v) seperti pada Persamaan 2.1. Densitas relatif (ρ^*) merupakan rasio antara densitas dari aluminium *foam* (ρ_f) dibanding dengan densitas aluminium padat (ρ_0). Dengan mengetahui densitas relatif, persentase porositas pun dapat diketahui (Rivera et al., 2019).

2.3 Karakteristik Mekanik Aluminium Foam

Sifat mekanik aluminium *foam* dapat dilihat dari kurva *stress-strain*. Kurva *stress-strain* pada aluminium *foam* memiliki tiga daerah, pertama yaitu daerah deformasi elastis, daerah plateau, dan daerah densifikasi (Ashby et al., 2000). Seperti Gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Kurva *stress-strain* aluminium *foam* (Haidar & Sekh, 2018)

Daerah plateau adalah daerah di mana aluminium *foam* mengalami penambahan *strain* namun dengan besarnya *stress* yang cenderung konstan. Daerah plateau menunjukkan proses hancurnya porositas hingga terjadi pemampatan (densifikasi). Densifikasi terjadi ketika semua pori pada aluminium *foam* sudah hancur sehingga *perubahan strain* lebih kecil namun penambahan *stress* yang tinggi. Luas daerah di bawah kurva mengindikasikan kemampuan penyerapan energi, sehingga bila daerah plateau semakin besar, maka energi yang mampu diserap juga lebih banyak (Ashby et al., 2000).

Dari kurva Tegangan-Regangan dapat ditentukan *plateau stress* dan *densification stress* dengan menggunakan standar dari ISO 13314. *Plateau stress* yaitu rata-rata tegangan dari 20% regangan hingga 30 % atau 40% regangan. *Densification stress* dapat dihitung dari 1,3 kali *plateau stress* (ISO, 2011). Nilai keuletan diambil dari *strain* ketika diberi *densification stress*. Kemampuan absorpsi energinya diambil dari nilai ketangguhannya (*toughness*). Nilai *toughness* didapat dengan menghitung luas daerah di bawah kurva *plateau*

Selain dari luasan daerah di bawah kurva, kemampuan penyerapan energi juga dapat dilihat dari kekuatan impaknya. Nazim (2013) menyebutkan dalam penelitiannya bahwa energi dari hasil uji impact memiliki nilai yang sama dengan energi di bawah kurva *stress-strain*. Kurva *stress-strain* juga menunjukkan sifat mekanik lain yaitu kekuatan kompresi yang terletak pada titik teratas dari kurva (Mahmutyazicioglu et al., 2013).

2.4 Bahan Dasar Aluminium Foam

Aluminium *foam* dapat dihasilkan dengan menggunakan bahan dasar berupa aluminium murni maupun paduan aluminium.

2.4.1 Aluminium Murni

Aluminium merupakan unsur logam yang ketersediaannya paling banyak nomor dua di bumi. Oleh karena itu, aluminium sering dimanfaatkan khususnya di bidang konstruksi dan otomotif. Aluminium merupakan logam yang termasuk jenis *non-ferrous* yang diperoleh dari proses Hall-Heroult. Aluminium memiliki massa jenis sebesar 2,7 gram/cm³ sehingga tergolong sebagai material ringan. Logam ini memiliki ketahanan korosi hampir di semua macam lingkungan, seperti atmosfer, air (termasuk air asin), petrokimia, dan lingkungan kimiawi lainnya. Hal yang menarik dari aluminium ialah karakteristiknya yang serba guna. Aluminium memiliki sifat fisik dan sifat mekanik yang luar biasa dapat dikembangkan lebih lanjut. Ratusan jenis paduan aluminium telah berhasil dikembangkan. Sifat-sifat yang membuat aluminium dan paduannya dinilai ekonomis dan atraktif untuk digunakan di berbagai aplikasi adalah karena tampilannya yang berkilau, ringan, dapat difabrikasi, sifat fisik dan sifat mekanik, serta ketahanan terhadap korosi (ASM, 2001). Tabel 2.1 berikut ini menyajikan sifat fisik dan sifat mekanik dari logam aluminium.

Tabel 2.1 Sifat fisik dan sifat mekanik Aluminium (Celik, 1999)

Properties	Nilai
Densitas (g/cm ³)	2,70
Resistansi ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$) x 10 ²	2,66
Konduktivitas Termal (cal/cm ² /cm°Cs)	0,52
Titik Lebur (°C)	660,00
Yield Strength (MPa)	34,50
Ultimate Strength (MPa)	91,50
Elongasi (%)	30,10
Kekerasan (HV)	57,98

2.4.2 Paduan Aluminium

Paduan aluminium umumnya dibagi dalam dua kategori yaitu paduan *casting* dan paduan *wrought*. Paduan *casting* atau cor merupakan paduan aluminium yang dihasilkan hanya dari proses pengecoran dan tidak mendapat perlakuan lanjutan. Sedangkan paduan *wrought* atau tempa merupakan paduan aluminium yang dihasilkan dari proses pengecoran namun sudah mendapat perlakuan lanjutan seperti *forging*, *rolling*, dan sebagainya (ASM, 2001).

Paduan aluminium yang dapat diberi perlakuan panas salah satunya adalah Al-Mg-Si. Salah satu contoh paduan Al-Mg-Si adalah 6061 (ASM, 2001). Ketahanannya terhadap korosi membuat paduan ini merupakan kandidat yang cocok untuk aplikasi struktur bangunan laut (Christy et al., 2010). Paduan Al-Mg-Si memiliki berbagai keunggulan yaitu kekuatan medium, dapat dibentuk, dapat dilas, tahan korosi, dan biaya rendah bila dibandingkan dengan paduan aluminium yang lainnya (Lee et al., 2002). Di bawah ini disajikan kadar komposisi salah satu jenis paduan Al-Mg-Si (6061) pada Tabel 2.2 dan sifat mekaniknya pada Tabel 2.3.

Tabel 2.2 Komposisi paduan Al-Mg-Si (6061) (ASM, 2001)

Unsur	Kadar (wt%)
Si	0,40 – 0,80
Fe	0,70
Cu	0,15 – 0,40
Mn	0,15
Mg	0,80 – 1,20
Cr	0,04 – 0,35
Zn	0,25
Ti	0,15
Al	<i>Balanced</i>

Tabel 2.3 Sifat mekanik paduan Al-Mg-Si (6061) (Leon & Jayakumar, 2015)

Material	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elongation (%)	Kekerasan (HV)
Aluminium 6061	110	207	16	75

Tabel 2.4 berikut ini menyajikan perbandingan antara aluminium murni dengan paduan aluminium.

Tabel 2.4 Perbandingan sifat mekanik aluminium murni dan paduan 6061

Aspek yang Dibandingkan	Aluminium Murni	Aluminium 6061
Yield strength (MPa)	34,50	110
Ultimate strength (MPa)	91,50	207
Elongation (%)	30,10	16
Kekerasan (HV)	57,98	75

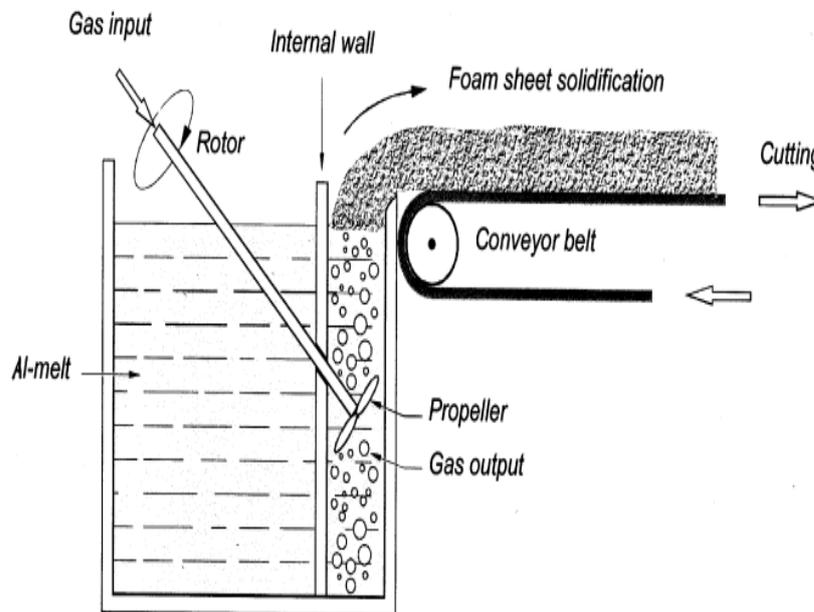
2.5 Metode Pembuatan Aluminium Foam

Metode pembuatan aluminium *foam* sama seperti pembuatan *metal foam* pada umumnya. Beberapa metode pembuatan aluminium *foam* yaitu *gas injection*, *blowing agent*, *space holder*, dan *sintering* serbuk logam. *Gas injection*, *blowing agent*, dan *space holder* termasuk dalam kategori *liquid state*, yaitu bahan baku logam diproses dalam wujud cair.

Metode *space holder* sendiri menggunakan proses *casting* atau pengecoran. Sedangkan untuk *sintering* termasuk kategori *solid state* karena bahan baku logam diproses dalam wujud padat (serbuk) (J. Banhart, 2001).

2.5.1 Gas Injection

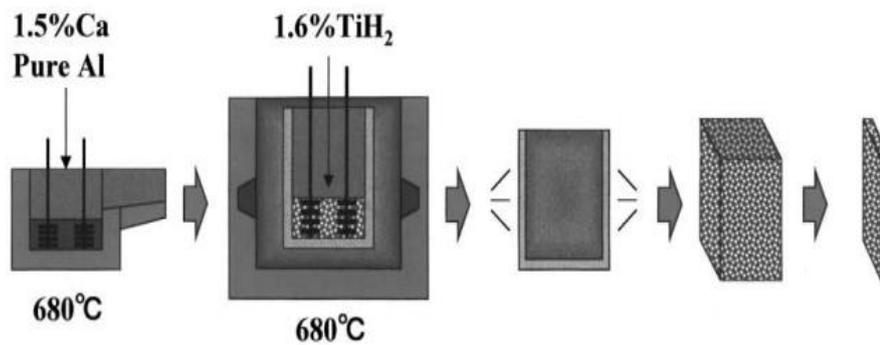
Langkah pertama pada metode ini yaitu persiapan aluminium cair agar mengandung salah satu jenis partikel *reinforce* seperti SiC, Al₂O₃, atau MgO dengan tujuan untuk meningkatkan viskositas aluminium cair. Dalam hal ini *wetting* dari aluminium cair terhadap partikel *reinforce* merupakan hal yang harus diperhatikan. Langkah selanjutnya yaitu menginjeksikan gas (udara, nitrogen, atau argon) ke dalam aluminium cair menggunakan alat khusus bernama *nozzle* atau *impeller*. Alat ini menginjeksikan gelembung gas yang sangat halus dan mendistribusikannya secara *uniform* di dalam logam cair. Gelembung gas dengan kehalusan yang tepat dapat menghasilkan aluminium *foam* yang berkualitas. Fraksi volume dari partikel *reinforce* adalah sekitar 10 – 20% dengan ukuran 5 – 20 mikron (J. Banhart, 2001). Gambar 2.4 menunjukkan proses *foaming* dengan *gas injection*.



Gambar 2.4 Proses *foaming* dengan *gas injection* (J. Banhart, 2001)

2.5.2 Blowing Agent

Metode lain dalam pembuatan aluminium *foam* yaitu dengan memasukkan *blowing agent* ke dalam aluminium cair. *Blowing agent* akan mengalami dekomposisi karena temperatur yang tinggi dan menghasilkan gas yang akan memicu proses *foaming*. Dalam teknik ini, logam kalsium ditambahkan ke dalam aluminium cair pada temperatur 680 °C. Logam cair diaduk selama beberapa menit dan viskositasnya meningkat akibat terbentuknya CaO, CaAl₂O₄, atau Al₄Ca. Biasanya logam kalsium yang ditambahkan adalah sebanyak 1,5 – 3%. Setelah dirasa mencapai viskositas yang cukup, selanjutnya dilakukan penambahan *blowing agent* untuk melepaskan gas di dalam logam cair. Logam cair perlahan akan mengembang, dan ketika didinginkan dan mengeras aluminium *foam* yang dihasilkan siap diproses lebih lanjut. Gambar 2.5 menunjukkan proses *foaming* menggunakan *blowing agent* (J. Banhart, 2001).



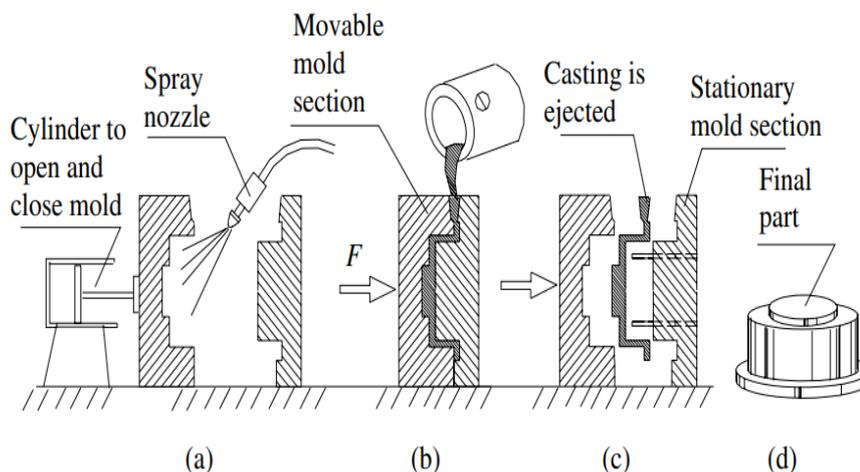
Gambar 2.5 Proses *foaming* dengan *blowing agent* (J. Banhart, 2001)

2.5.3 Casting

Pengecoran logam adalah proses di mana logam cair dituangkan ke dalam cetakan kemudian memadat dan menghasilkan bentuk sesuai yang diharapkan. Empat komponen utama yang diperlukan dalam proses pengecoran adalah pola, cetakan, *core*, dan benda kerja. Pola adalah benda yang membuat rongga pada cetakan, *core* adalah komponen yang diletakkan dalam cetakan yang nantinya menghasilkan lubang atau saluran pada benda kerja, dan benda kerja adalah hasil dari pengecoran (Boljanovic, 2009).

Proses pengecoran logam dibagi menjadi dua, yaitu *expendable mold* dan *nonexpendable mold*. Proses *expendable mold* adalah proses pengecoran menggunakan cetakan sekali pakai dan membutuhkan gaya gravitasi untuk membantu logam cair memasuki rongga cetakan. Ketika benda kerja telah solidifikasi dengan sempurna, maka untuk mengeluarkannya diperlukan menghancurkan cetakan terlebih dahulu. Sedangkan pada proses *nonexpendable mold* tidak perlu untuk menghancurkan cetakan untuk mengeluarkan benda kerja. Namun sebelum menuang logam cair, permukaan cetakan disemprot dilapisi terlebih dahulu dengan asetilen agar memudahkan mengeluarkan benda kerja. Terdapat setidaknya empat jenis pengecoran yaitu permanen, *die*, sentrifugal, dan *continuous casting* (Boljanovic, 2009).

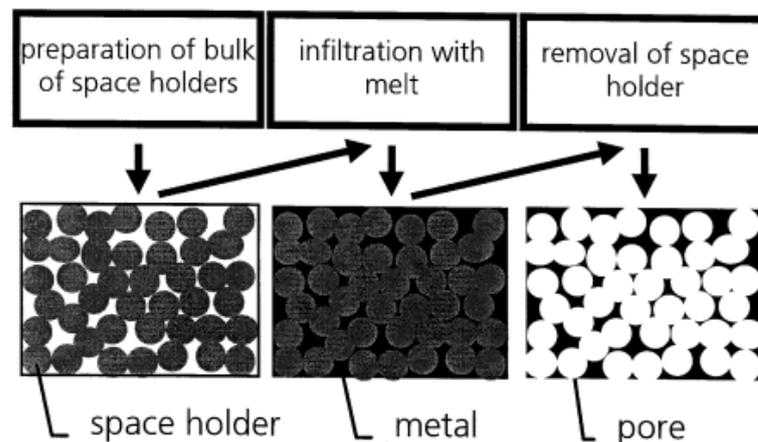
Gambar 2.6 mengilustrasikan proses pengecoran cetakan permanen. Pengecoran cetakan permanen yaitu proses penuangan logam cair ke dalam cetakan yang dapat dipakai berkali-kali, biasanya terbuat dari baja atau besi tuang. Cetakan permanen biasanya digunakan pada pengecoran besi, aluminium, magnesium, dan paduan berbasis tembaga. Secara spesifik, sekitar 90% produk pengecoran aluminium dihasilkan dengan cetakan logam (Boljanovic, 2009).



Gambar 2.6 Proses pengecoran cetakan permanen: (a) Cetakan di-*preheat* dan dilapisi, (b) Cetakan ditutup dan dituangkan logam cair, (c) Cetakan dibuka dan benda kerja dikeluarkan, (d) Benda kerja (Boljanovic, 2009)

Metode lainnya dalam memproduksi aluminium *foam* adalah dengan menuangkan logam cair ke butiran organik atau anorganik, atau dengan menenggelamkan butiran tersebut ke dalam logam cair. Butiran-butiran tersebut masih tersisa dalam produk logam hasil coran sehingga biasanya dihilangkan terlebih dahulu dengan cara *leaching* dalam larutan yang tepat atau dengan perlakuan panas. Metode ini dapat dilakukan dengan baik bila jumlah *space holder* yang digunakan cukup banyak sehingga masing-masing butiran saling terhubung. Dalam beberapa kasus, metode ini membutuhkan tekanan infiltrasi yang cukup besar (J. Banhart, 2001).

Melakukan *preheat* pada *space holder* dibutuhkan untuk menghindari solidifikasi prematur dari logam cair. Gambar 2.7 menunjukkan proses pembuatan aluminium *foam* dengan menggunakan *space holder* (J. Banhart, 2001).



Gambar 2.7 Proses *foaming* dengan *filler space holder* (J. Banhart, 2001)

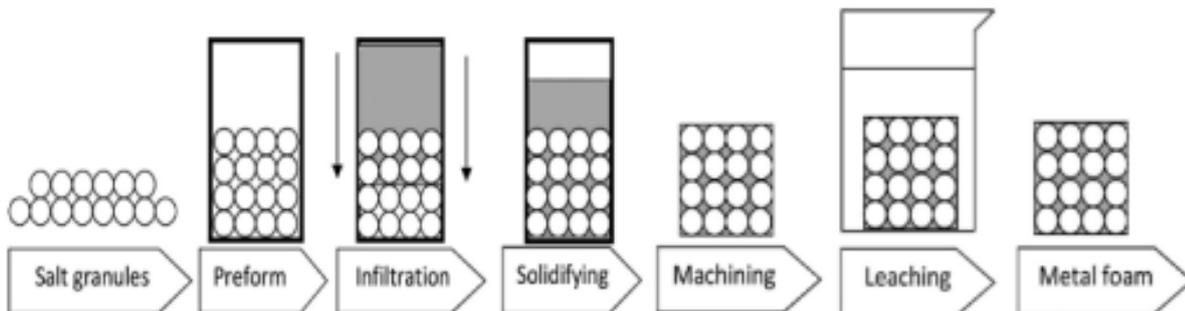
Salah satu jenis *space holder* yang dapat dipakai adalah NaCl. NaCl adalah salah satu jenis garam yang memiliki kelarutan yang bagus dalam air. NaCl merupakan senyawa ionik yang mana dalam wujud kristal, ion Na^+ dan Cl^- terletak berselang-seling. NaCl memiliki struktur kristal FCC (Westphal & Et, 2012). Tabel 2.5 Menyajikan sifat-sifat dari NaCl.

Tabel 2.5 Sifat fisik NaCl (Westphal & Et, 2012)

<i>Properties</i>	Nilai
M_r	58,443
Titik lebur	801 °C
Titik didih	1465 °C
Densitas	2,1615 g/cm ³
Kekerasan	14 HB
Resistivitas listrik	4,6 x 10 ¹⁶ Ωcm
Konduktivitas termal	0,072 W/cmK

Pada proses pembuatan aluminium *foam*, NaCl berperan sebagai *space holder*. Aluminium memiliki titik lebur 660 °C sedangkan NaCl memiliki titik lebur 801 °C. Umumnya penuangan aluminium cair dilakukan pada temperatur di atas 700 °C yang mana masih di bawah titik lebur NaCl sehingga ketika aluminium cair dituang, NaCl masih

berwujud solid dan logam cair masuk ke dalam sela-sela butir NaCl. Ketika solidifikasi, aluminium *foam* masih mengandung butiran NaCl di dalamnya sehingga perlu dilakukan *leaching* terhadap aluminium *foam* di dalam air panas selama waktu tertentu untuk melarutkan NaCl sehingga butir-butir NaCl hilang dari aluminium *foam* dan porositas pun terbentuk (Patricio et al., 2017). Gambar 2.8 menunjukkan proses pembuatan aluminium *foam* dengan *space holder* NaCl.



Gambar 2.8 Proses pembuatan Aluminium *Foam* dengan *space holder* NaCl (Patricio et al., 2017)

2.5.4 Sintering Serbuk Logam

Metode selanjutnya yaitu metalurgi serbuk. Tahap-tahapnya yaitu preparasi dan penentuan fraksi serbuk, kompaksi, dan *sintering*. Cukup sulit untuk membuat aluminium *foam* dari serbuk karena aluminium memiliki lapisan oksida yang mencegah terjadinya *sintering* antar serbuk. Maka dari itu perlu untuk mendeformasi campuran serbuk untuk menghancurkan lapisan oksida sehingga butir logam aluminium dapat perikatan satu sama lain. Penambahan unsur Cu, Si, atau Mg dapat menciptakan paduan eutektik bertitik lebur rendah ketika *sintering* pada temperatur 595 – 625 °C. metode ini merupakan metode terbaru dalam menghasilkan aluminium *foam* (J. Banhart, 2001). Tabel 2.6 berikut ini menyajikan perbandingan dari masing-masing metode.

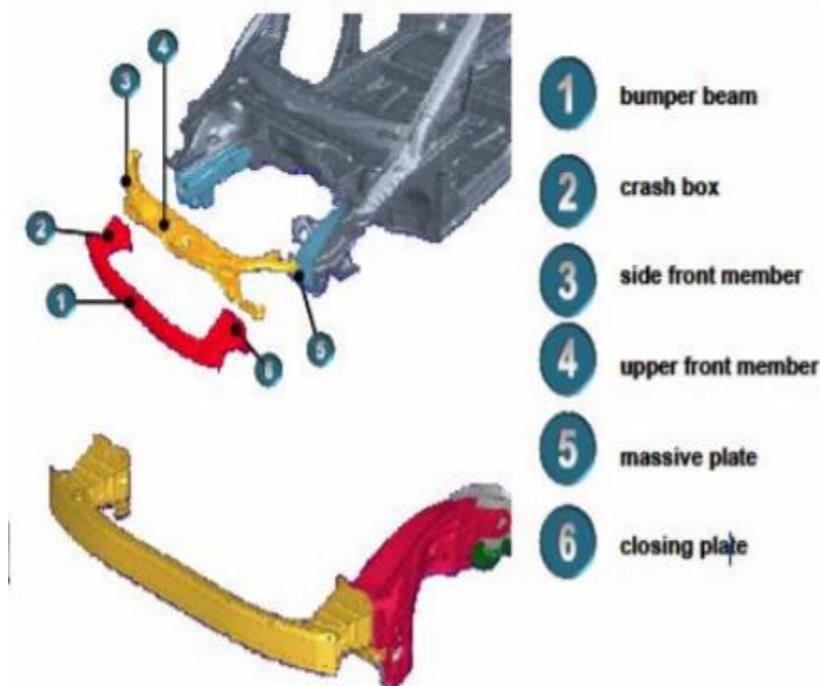
Tabel 2.6 Perbandingan metode pembuatan aluminium *foam*

Aspek yang Dibandingkan	<i>Gas Injection</i>	<i>Blowing Agent</i>	<i>Casting on Space holder</i>	<i>Sintering and Compaction</i>
Tipe pori yang dihasilkan	<i>Closed-cell</i>	<i>Closed-cell</i>	<i>Open-cell</i>	<i>Open-cell</i>
Wujud aluminium ketika proses	likuid	likuid	likuid	Solid
Pembentuk pori	Udara, Nitrogen, Argon	TiH ₂ , CaCO ₃	NaCl, Urea, CaCl ₂	NaCl, Urea, CaCl ₂

2.6 Aplikasi Aluminium *Foam*

Aluminium *foam closed-cell* umumnya digunakan pada bidang otomotif karena karena kemampuannya yang baik dalam menahan beban dan menyerap energi. Sedangkan *open-cell* aluminium *foam* umumnya digunakan dalam hal filtrasi temperature tinggi, penyerapan suara, disipasi panas karena memiliki permeabilitas yang tinggi dengan adanya porositas yang terbuka dan saling terhubung (Kevorkijan*, 2010). Aluminium *foam* memiliki kekuatan kompresif serta kapasitas penyerapan energi yang bagus sehingga tepat untuk diterapkan pada bidang otomotif, kereta api, dan luar angkasa yang membutuhkan sifat ringan dan mampu menyerap energi dengan baik. Selain itu, karena biayanya yang murah, proses manufaktur

yang mudah, dan memiliki sifat mekanik yang lebih baik bila dibandingkan dengan logam lain yang juga memiliki titik lebur rendah membuat aluminium *foam* banyak digunakan (Soni & Biswas, 2016). Salah satu aplikasi aluminium *foam* yaitu untuk *filler crash box* pada mobil sebagai komponen penyerapan energi. *Crashbox* merupakan sistem keamanan pasif pada mobil untuk menyerap energi kinetik ketika terjadi tabrakan dari depan maupun belakang sehingga dapat mengurangi energi tabrakan yang mengalir ke *body* mobil. *Crashbox* menghubungkan *bumper* dan *body* mobil. Penggunaan aluminium *foam* pada *crashbox* dapat meningkatkan penyerapan energi saat terjadi benturan (Renreng et al., 2020). Gambar 2.9 menjelaskan letak dari *crashbox* pada mobil.



Gambar 2.9 Letak *crashbox* pada mobil (Constantin et al., 2016)

Crashbox biasanya dapat menahan energi benturan maksimumnya pada kecepatan 15 km/h. Angka tersebut merupakan sisa energi dari *bumper* mobil yang mengalami benturan pada kecepatan lebih dari 30 km/h. Dari angka-angka tersebut maka energi yang dapat diserap oleh *crashbox* adalah 5000 Joule (Fuganti et al., 2000). *Crashbox* biasanya berbentuk balok atau silinder *hollow* berdinding tipis dan terbuat dari logam yang diketahui bagus dalam hal penyerapan energi. Penambahan aluminium *foam* sebagai *filler* pada *crashbox* dapat meningkatkan kemampuan penyerapan energi namun tidak menambah berat secara signifikan karena sifatnya yang sangat ringan (Renreng et al., 2020). Gambar 2.10 menunjukkan penerapan aluminium *foam* pada *crash box*.



Gambar 2.10 Aplikasi aluminium *foam* pada *crash box* (John Banhart, 2005)

Aluminium *foam* yang digunakan pada *filler crashbox* secara saat ini menggunakan aluminium *foam* komersial dengan berbagai tipe. Aluminium *foam* tersebut memiliki rentang densitas di sekitar $0,3 - 1,0 \text{ g/cm}^3$, kekuatan kompresi mencapai 20 MPa, *modulus young* minimal 0,4 GPa, memiliki *densification strain* dengan rentang 40-80%, dan kemampuan menyerap energi di mencapai 12 MJ/m^3 (Ashby et al., 2000).

2.7 Heat Treatment

Heat Treatment atau perlakuan panas adalah kombinasi dari operasi pemanasan dan pendinginan yang diterapkan pada logam atau paduan dalam keadaan padat yang mana diharapkan mampu menghasilkan sifat-sifat yang diinginkan, seperti kekuatan, keuletan, kekerasan, dan ketangguhan (Avner, 1974). Paduan aluminium merupakan logam yang dapat dilakukan perlakuan panas. Tujuan dilakukannya perlakuan panas ialah untuk memodifikasi sifat mekaniknya (Dirk Lehmus & Banhart, 2003).

2.7.1 Heat Treatment pada Paduan Aluminium

Perlakuan panas pada aluminium bertujuan untuk memodifikasi nilai kekuatan, ketangguhan, keuletan, dan kekerasannya. Hal ini diakibatkan oleh terhambatnya dislokasi karena adanya partikel-partikel kecil yang tersebar merata pada matriks aluminium. Partikel-partikel kecil tersebut adalah presipitat (ASM, 1991). *Heat treatment* pada paduan aluminium memiliki tiga langkah dasar yaitu *solution treatment*, *rapid cooling (quenching)*, dan *aging* baik itu natural atau *artificial* (Genculu, 2000).

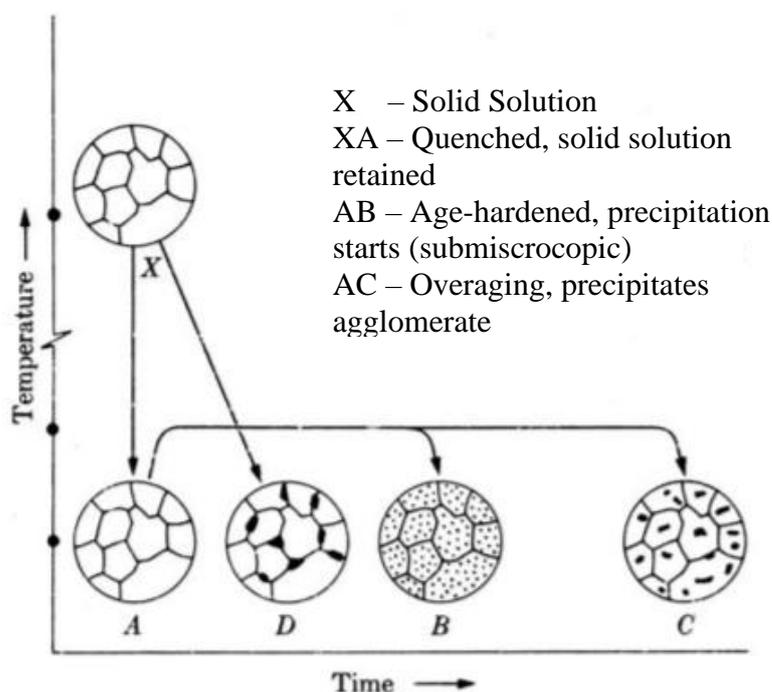
Pada tahap *solution treatment*, bertujuan untuk melarutkan konstituen eutektik dan menjadikannya larutan padat. Proses pemanasan diatur pada rentang temperatur $515 - 540 \text{ }^\circ\text{C}$ (ASM, 1991). Bila temperatur terlalu rendah, kekuatan maksimum tidak dapat dicapai. Bila temperatur terlalu tinggi, berpotensi untuk meleburkan konstituen dengan titik lebur rendah sehingga menurunkan sifat fisik paduan. Saat *solution treatment*, beberapa unsur paduan larut untuk membentuk larutan padat. Tujuannya untuk memaksimalkan konsentrasi unsur penguat seperti Cu, Zn, Mg, atau Si pada larutan padat. Waktu tahan juga menjadi parameter yang penting, bila waktu tahan terlalu pendek, maka unsur-unsur paduan tidak dapat larut sempurna. Jika waktu tahan terlalu lama, maka dapat menimbulkan oksidasi temperatur tinggi (Genculu, 2000) atau juga mendapatkan sifat mekanik yang kurang optimal akibat pertumbuhan butir (Jin et al., 2019).

Paduan Al-Mg-Si dengan presipitat yang muncul berupa Mg_2Si dapat dilakukan *solution treatment* pada temperatur di atas $500 \text{ }^\circ\text{C}$ dan di bawah temperatur $595 \text{ }^\circ\text{C}$. Namun beberapa unsur paduan dapat membentuk senyawa yang memiliki titik lebur lebih rendah. Sehingga

batas untuk *solution treatment* pada paduan Al-Mg-Si berada pada kisaran 515 – 540 °C (ASM, 1991).

Tahap selanjutnya adalah *rapid cooling* atau *quenching* dilakukan untuk mencegah atau memperlambat proses represipitasi. Biasanya dilakukan dengan air yang mana dapat mempertahankan struktur metalurgi dan dalam waktu singkat dapat membuat logam menjadi mampu dikerjakan (Genculu, 2000).

Tahap terakhir adalah *aging*. Setelah mengalami *quenching*, kebanyakan paduan tidak stabil pada temperatur ruang ataupun pada temperatur yang lebih tinggi, dan konstituen pada larutan padat super jenuh mulai mengalami presipitasi. Setelah beberapa hari berada pada temperatur ruang, paduan menjadi lebih keras dan kuat. Peristiwa ini biasa disebut *natural aging*. Paduan aluminium yang dapat mengalami *natural aging* biasanya adalah paduan yang mengandung Mg dan Si atau Mg dan Zn. Namun dengan menaikkan temperatur sedikit lebih tinggi dengan waktu yang terkontrol, pengerasan lebih lanjut pun dapat dicapai dan lebih stabil. Hal ini disebut *artificial aging*. Pemanasan berkisar antara 107 – 191 °C selama 4 hingga 24 jam kemudian didinginkan di udara. *Artificial aging* menghasilkan material dengan sifat mekanik lebih tinggi dari *natural aging* (Genculu, 2000). Gambar 2.11 menunjukkan struktur mikro dan proses perlakuan panas pada paduan aluminium.



Gambar 2.11 Proses *precipitation hardening* (Genculu, 2000)

2.8 Penelitian Sebelumnya

Pada Tabel 2.7 di bawah ini disajikan penelitian-penelitian sebelumnya mengenai pembuatan aluminium *foam* serta perlakuan panas yang dilakukan terhadap aluminium *foam*.

Tabel 2.7 Penelitian Sebelumnya

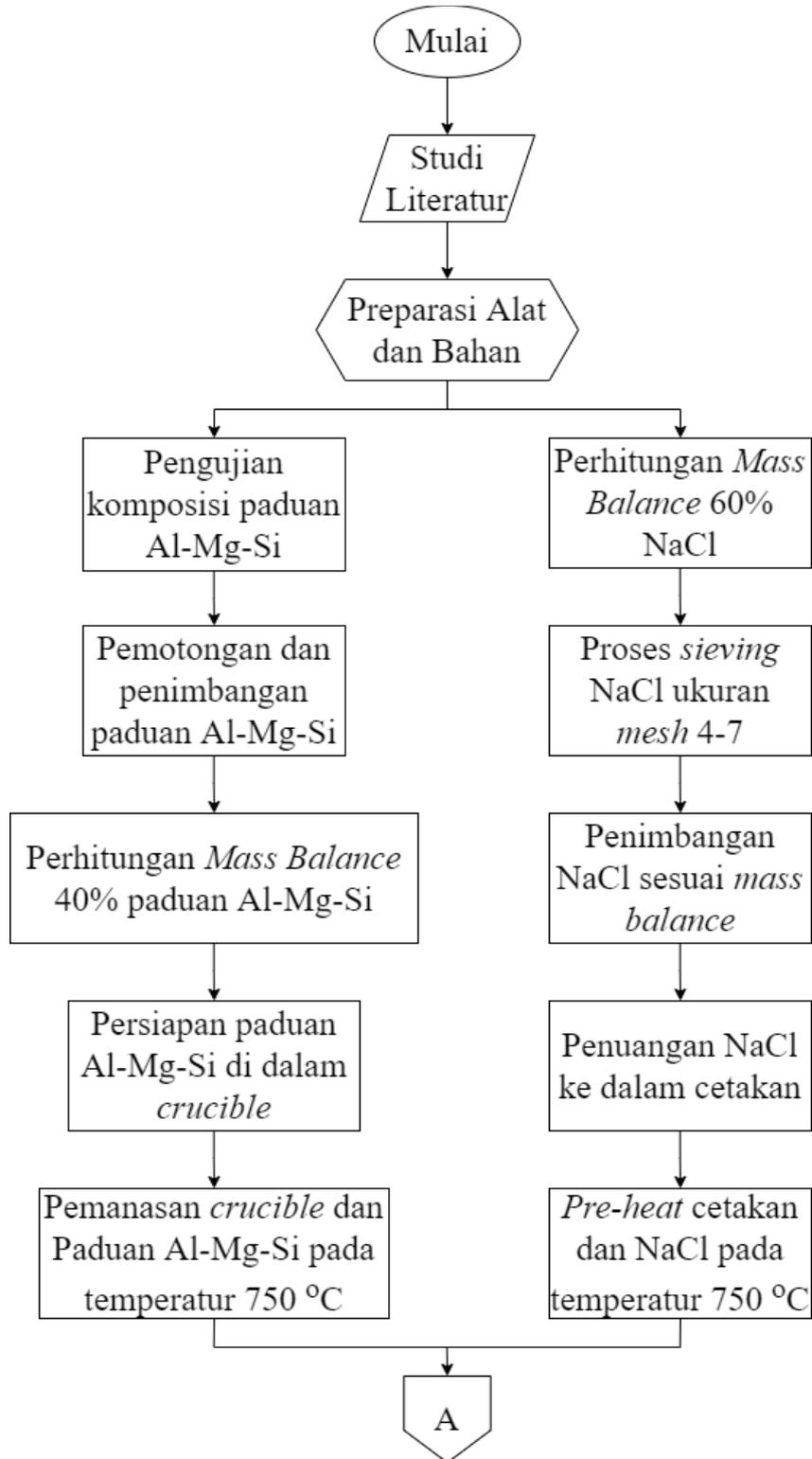
Judul dan Penulis	Parameter	Hasil
<i>Effect of Artificial Aging Process on Aluminium Foam Made of Etial 160</i>	<i>Solution Treatment</i> dilakukan pada temperatur 500 °C selama 30 menit.	<i>Artificial Aging</i> pada temperatur 170 °C merupakan temperatur optimal dan memiliki kekuatan

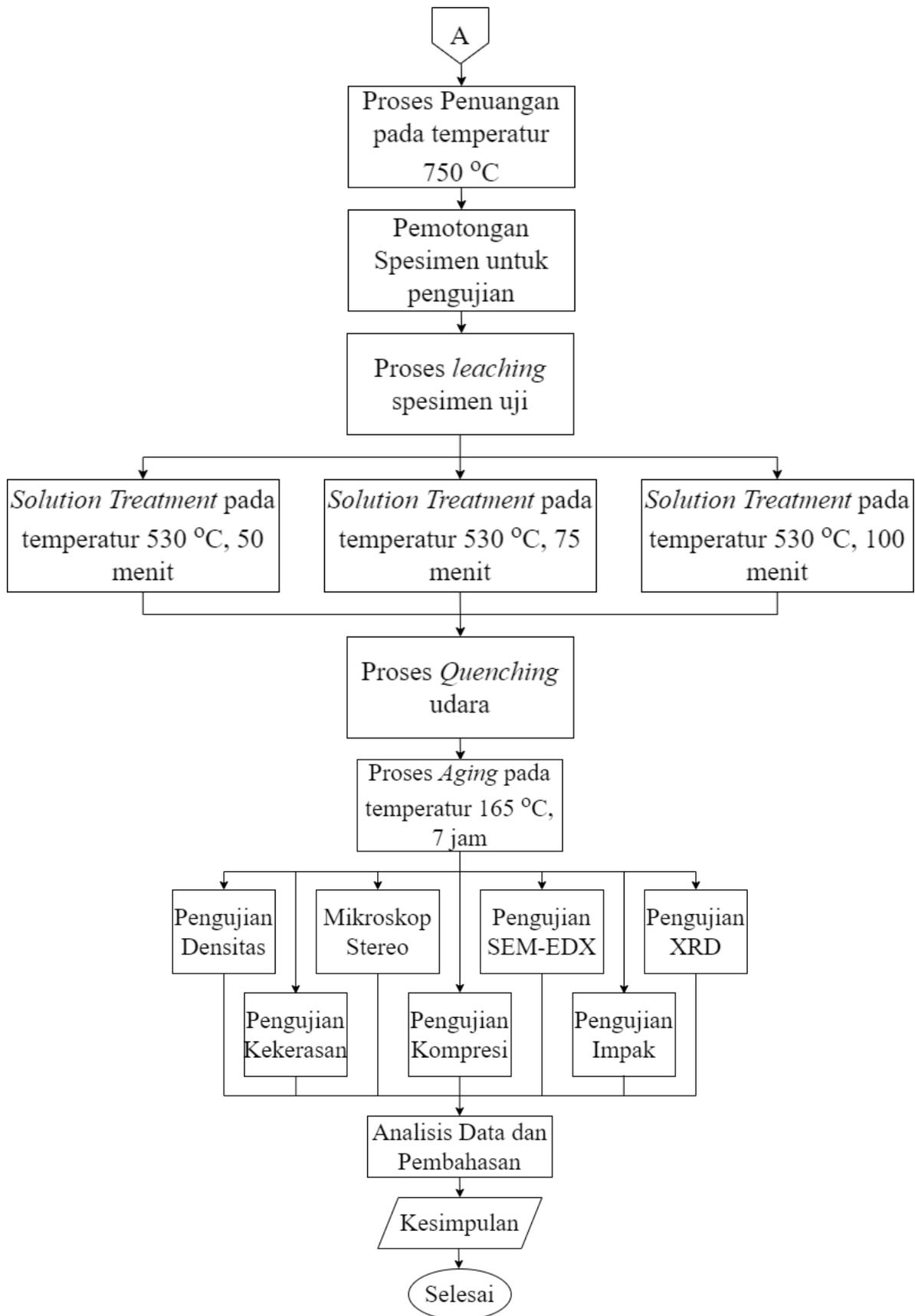
(Dahil et al., 2020)	<i>Quenching</i> dengan air. <i>Artificial aging</i> pada 120 °C, 170 °C, dan 220 °C selama 10 jam.	dan kekerasan tertinggi.
<i>Effect of Age Hardening and Quenching Media on Aluminium Foams</i> (Khan et al., 2018)	<i>Solution Treatment</i> dilakukan pada temperatur 505 °C selama 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 sebesar 28% dibandingkan dengan <i>as-foamed</i> . <i>Water quench</i> mengakibatkan <i>thermal stress</i> hingga terjadi <i>crack</i> . Waktu <i>aging</i> optimum pada 5 jam.
<i>Effect of Heat Treatments on the Mechanical Behaviour of Aluminium Alloy Foams</i> (Campana & Pilone, 2009)	<i>Solution Treatment</i> dilakukan pada temperatur 530 °C selama 1,7 jam. <i>Quenching</i> dengan air. <i>Artificial aging</i> pada 165 °C selama 10 jam.	<i>Artificial aging</i> dapat meningkatkan batas elastis dan kekuatan <i>plateau</i> sehingga kemampuan penyerapan energinya juga meningkat.
<i>Properties of Heat-Treated Aluminium Foams</i> (Dirk Lehmhus & Banhart, 2003)	<i>Solution Treatment</i> dilakukan pada temperatur 530 °C selama 100 menit. <i>Quenching</i> dengan air dan udara. <i>Artificial aging</i> pada 165 °C selama 10 jam.	Perlakuan panas yang dilakukan dapat meningkatkan kekuatan dari aluminium foam. <i>Water quenching</i> menghasilkan <i>mesostructure</i> yang bagus.
<i>Adaptation of Aluminium Foam Properties by Means of Precipitation Hardening</i> (D. Lehmhus et al., 2002)	<i>Solution Treatment</i> dilakukan pada temperatur 530 °C selama 100 menit. <i>Quenching</i> dengan air dan udara. <i>Artificial aging</i> pada 165 °C selama 10 jam.	Perlakuan panas <i>precipitation hardening</i> meningkatkan kekuatan aluminium foam. <i>Water quenching</i> sebaiknya dihindari karena dapat menimbulkan efek yang tidak bagus pada struktur sel.
<i>Forming of Aluminium Foam Sandwich Panels</i> (Hassan et al., 2020)	Menggunakan NaCl berukuran 0,15-0,8 µm. Komposisi NaCl yaitu 30, 40, 50, dan 60 wt%.	60 wt% NaCl menunjukkan <i>interconnected pores</i> dan densitas terendah serta porositas tertinggi. Namun menghasilkan kekuatan dan absorpsi energi yang lebih rendah.
<i>Monitoring the Influence of Sodium Chloride Particle Size on the Physical, Mechanical Properties and Structure of Samples of Porous Aluminium Materials</i> (Nova et al., 2021)	Menggunakan NaCl dengan ukuran 3-5 mm, 5-7 mm, dan 8-10 mm. Temperatur <i>pouring</i> yaitu 720-750 °C.	Semakin besar ukuran NaCl yang digunakan, semakin besar juga porositasnya sehingga densitas semakin kecil. <i>Modulus young</i> semakin rendah, dan konduktivitas termal juga semakin rendah.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Gambar 3.1 di bawah ini menyajikan diagram alir pada penelitian ini.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Bahan Penelitian

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

1. Paduan Al-Mg-Si

Bahan baku yang digunakan adalah Aluminium paduan Mg dan Si (paduan Al-Mg-Si) yang memiliki sertifikat mengenai komposisi paduannya. Bahan ini diperoleh dari Sutindo Surya Sejahtera.



Gambar 3.2 Logam paduan Al-Mg-Si (dokumentasi pribadi)

2. NaCl kristal

NaCl yang digunakan dalam penelitian adalah NaCl dengan kemurnian tinggi yang berbentuk kristal dengan ukuran mesh 4 – 7. NaCl kristal didapatkan secara *online*.



Gambar 3.3 Gambar NaCl kristal (dokumentasi pribadi)

3.3 Peralatan Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut. Gergaji Mesin digunakan untuk memotong bahan baku paduan Al-Mg-Si yang akan dilelehkan. Alat ini terdapat di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Neraca digital digunakan untuk menimbang potongan paduan Al-Mg-Si dan NaCl yang dibutuhkan juga untuk mengukur massa spesimen. Alat ini terdapat di Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. *Crucible* digunakan sebagai wadah untuk melelehkan bahan baku paduan Al-

Mg-Si. Alat ini berukuran A5 dengan volume 900 ml. *Burner* beserta perlengkapannya digunakan untuk melelehkan bahan baku paduan Al-Mg-Si. Peralatan ini terdapat di Laboratorium Teknologi Pengolahan Mineral dan Material Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Ayakan ukuran mesh 4–7 digunakan untuk menyaring kristal NaCl dan didapatkan ukuran yang sesuai. Cetakan ini diisi dengan kristal NaCl yang sudah diayak kemudian ke dalamnya dituangkan logam cair. Gergaji manual digunakan untuk proses preparasi spesimen sesuai dimensi yang dibutuhkan. Gelas *beaker* digunakan sebagai wadah untuk proses *leaching*. Alat ini berukuran 500 ml. *Heat Treatment Furnace* digunakan untuk melakukan proses *solution treatment* dan *artificial aging* terhadap spesimen, juga untuk proses *preheat* cetakan beserta NaCl. Alat ini terdapat di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. *Blower* digunakan untuk proses *quenching* udara setelah *solution treatment*. *Thermocouple* digunakan untuk mengontrol temperatur di dalam *burner*. *Thermogun* digunakan untuk memeriksa temperatur logam cair. Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi spesimen.

3.4 Instrumen Karakterisasi Material

Berikut ini instrumen karakterisasi yang digunakan untuk menguji sampel pada penelitian ini.

- Spark – Optical Emission Spectrometry (Spark-OES)*
Digunakan untuk memperoleh komposisi paduan dari bahan baku paduan Al-Mg-Si.
- Mikroskop Stereo
Digunakan untuk menganalisis pori yang terdapat pada spesimen aluminium *foam*.
- Mesin Uji *X-Ray Diffraction (XRD)*
Digunakan untuk menganalisis senyawa dominan yang terkandung dalam spesimen aluminium *foam* serta ukuran kristalnya.
- 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.
- Mesin Uji Kompresi
Digunakan untuk menganalisis kekuatan densifikasi dari spesimen aluminium *foam* dengan variasi *holding time* ketika *solution treatment*.
- Mesin Uji Impak
Digunakan untuk menganalisis kekuatan impak dan banyaknya energi yang mampu diserap oleh spesimen aluminium *foam*.
- Mesin Uji Kekerasan *Vickers*
Digunakan untuk menganalisis nilai kekerasan spesimen aluminium *foam* yang diberi perlakuan berbeda.

3.5 Metode Penelitian

Variable yang digunakan dalam penelitian aluminium *foam* ini yaitu *holding time* pada proses *Solution Treatment*. 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 pembuatan aluminium *foam* dengan metode *permanent mold gravity die casting*.

1. Preparasi alat dan bahan.
2. Bahan baku paduan Al-Mg-Si diuji komposisi paduannya menggunakan *Spark-OES*.
3. Kristal NaCl diayak dan disaring untuk didapatkan ukuran seragam *mesh 4 – 7*.
4. Bahan baku paduan Al-Mg-Si dan NaCl dipotong dan ditimbang sesuai perhitungan *mass balance* 60% NaCl.
5. Paduan Al-Mg-Si dimasukkan ke dalam *crucible* dan NaCl kristal ditempatkan di dalam cetakan.
6. *Crucible* yang berisi bahan baku paduan Al-Mg-Si dimasukkan ke dalam *burner*.
7. *Burner* diatur untuk memanaskan *crucible* hingga temperatur 750° C.
8. Cetakan yang berisi kristal NaCl di-*preheat* hingga temperatur 750° C.
9. Paduan Al-Mg-Si cair dituang ke dalam cetakan yang berisi kristal NaCl dengan temperatur tuang 750° C dan diberi sedikit pengadukan untuk memastikan NaCl tersebar merata. Kemudian didinginkan hingga temperature tuang.
10. Hasil coran yang telah solidifikasi dipotong untuk mendapatkan specimen uji dan dilakukan proses *leaching* di dalam air pada temperatur 90° C selama 1 jam untuk menghilangkan kristal NaCl yang ada di produk hasil cor.

3.5.3 Heat Treatment

Heat treatment dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik aluminium *foam*. 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 treatment* pada temperatur 530° C dengan variasi *holding time* 50 menit, 75 menit, dan 100 menit.
2. Sampel dikeluarkan dari *furnace* dan dilakukan *air quenching* dengan cara mengalirkan udara dari *blower*.
3. Sampel dimasukkan kembali ke dalam *heat treatment furnace* untuk dilakukan proses *aging* pada temperatur 165° C selama 7 jam.
4. Sampel dikeluarkan dari *furnace* dan didinginkan di temperatur ruang.

3.6 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa proses pengujian untuk menganalisis karakteristik fisik seperti struktur morfologi dan struktur mikro serta menganalisis sifat mekanik dari spesimen yang telah disiapkan. Adapun beberapa pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

3.6.1 Pengujian Densitas dan Porositas

Sampel untuk pengujian densitas memiliki dimensi 2 cm x 2 cm x 2 cm. Nilai porositas didapatkan dengan menghitung densitas relatif dari aluminium *foam* (Rivera et al., 2019). Dari hari pengecoran dipotong beberapa bagian untuk dijadikan spesimen pengujian. Data yang diperoleh berupa massa (*m*) dan volume (*v*). Data ini digunakan untuk menghitung densitas aluminium *foam* (ρ), kemudian dilakukan perhitungan densitas relatif (ρ^*) serta persentase porositas. Perhitungan densitas dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.1 dan perhitungan densitas relatif menggunakan Persamaan 3.2. Sedangkan perhitungan persentase porositas menggunakan Persamaan 3.3.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

$$\rho^* = \frac{\rho(\text{foam})}{\rho(\text{bulk})} \quad (3.2)$$

$$\text{Porositas} = (1 - \rho^*) \times 100\% \quad (3.3)$$

3.6.2 Pengujian Mikroskop Stereo

Pengujian dan pengamatan dengan menggunakan mikroskop stereo dilakukan untuk mengkarakterisasi morfologi dengan perbesaran 10x yang masih termasuk makroskopis. Pengamatan dengan menggunakan mikroskop stereo dapat menganalisis karakteristik pori yang dimiliki aluminium *foam*, seperti ukuran diameter terpanjang pori serta jenis pori yang saling terhubung (*interconnected*) atau tidak. Mikroskop stereo yang digunakan terdapat di Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pengujian mikroskop yang dilakukan adalah mikroskop Stereo dengan tipe Zeiss Stemi DV4.

3.6.3 Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD digunakan untuk mengkarakterisasi unsur dan senyawa yang terdapat pada suatu material serta ukuran kristalnya. XRD memiliki instrumen pengujian yang bernama *X-Ray Diffractometry* yang menggunakan sinar-X dalam proses analisisnya. Sinar-X ini kemudian secara terus menerus berubah arah sudut datangnya sehingga menciptakan spektrum intensitas difraksi dengan sudut di antara sinar datang dan sinar pantul. XRD memiliki basis data lebih dari 6000 jenis material untuk dibandingkan dengan spektrum hasil analisis. Spesimen untuk pengujian XRD adalah spesimen yang berbentuk serbuk atau berukuran sangat kecil (Widyastuti et al., 2019). Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS dengan menggunakan alat uji *PANalytical Xpert Pro*. Dalam penelitian ini spesimen yang diuji adalah spesimen tanpa perlakuan, spesimen SHT50, spesimen SHT75, dan spesimen SHT100. Sudut 2θ yang digunakan adalah antara $5^\circ - 90^\circ$. Data hasil pengujian selanjutnya diolah menggunakan *software* bernama *X'Pert Highscore* dan *Origin 2018*. Data hasil pengujian XRD juga digunakan untuk menghitung d_{spacing} menggunakan Persamaan 3.4. Penghitungan parameter kisi (a) menggunakan Persamaan 3.5 serta ukuran kristal aluminium dan Mg_2Si dengan menggunakan Persamaan 3.6 berikut yang mengacu pada buku Karakterisasi Material (Widyastuti et al., 2019).

$$d_{\text{spacing}} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (3.4)$$

$$a = d \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (3.5)$$

$$D = \frac{K \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.6)$$

Di mana:

d_{spacing} = Jarak antar layer (\AA)

a = Parameter kisi (\AA)

D = Ukuran rata-rata kristal (nm)

K = Konstanta *Scherrer* (0,9)

λ = Panjang gelombang sinar X (0,154 nm)

β = FWHM (rad)

θ = Sudut *Bragg* ($^\circ$)

3.6.4 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 beberapa tahapan yang harus dilakukan untuk pengujian SEM-EDX. Tahap pertama adalah menghaluskan permukaan spesimen dengan cara mengamplasnya dari *grade* 80 hingga *grade*

2000. Tahap kedua yaitu pemolesan permukaan spesimen yang sudah diampas dengan menggunakan autosol hingga semua *scratch* hilang. Tahap selanjutnya yaitu pengetsaan aluminium *foam* dengan menggunakan etsa jenis Keller. Pengetsaan dilakukan selama 20 detik. Setelah pengetsaan spesimen dapat diamati menggunakan mesin SEM-EDX. Pengujian SEM-EDX dilakukan di Laboratorium Instrumen UPN Veteran Surabaya.

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

Tujuan pengujian kompresi adalah untuk menganalisis kekuatan densifikasi dari aluminium *foam* yang telah mengalami perlakuan panas sesuai aplikasinya yaitu *crash box* yang mengalami beban tekan. Hasil pengujian kompresi dapat memberikan informasi mengenai kemampuan absorpsi energi dari aluminium *foam*. Sampel berbentuk kubus dengan ukuran 2,0 cm x 2,0 cm x 2,0 cm (Rivera et al., 2019). Dimensi ini sudah sesuai dengan standar ISO13314 yang menerangkan bahwa syarat minimum ukuran dimensi pengujian kompresi untuk *cellular materials* yaitu lebih dari 10 mm. Pengujian kompresi dilakukan di PT. Hanil Jaya Steel dan masing-masing spesimen dilakukan 3 pengulangan. Data tersebut kemudian diolah dengan menggunakan Persamaan 3.7 dan Persamaan 3.8 di bawah ini sehingga didapatkan kurva Tegangan vs Regangan (Callister Jr & Rethwisch, 2018).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.8)$$

3.6.7 Pengujian Impak

Pengujian impak dilakukan untuk menganalisis kemampuan aluminium *foam* yang telah mengalami *heat treatment* dalam menyerap energi. Kemampuan ini harus dimiliki oleh *crash box*. Dimensi dari sampel yang digunakan sesuai standar ASTM E23 yaitu 10 mm x 10 mm x 55 mm. alat yang digunakan khusus untuk material *non-ferrous* sesuai standar ISO179-1992, data yang didapatkan adalah sudut akhir pendulum setelah mengenai sampel. Setelah itu dilakukan perhitungan besarnya energi yang diserap oleh sampel uji. Pengujian impak dilakukan di laboratorium milik Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya dan masing-masing spesimen dilakukan 3 pengulangan. Data yang didapat dari pengujian ini berupa sudut awal sebelum impak dan sudut akhir setelah impak, yang selanjutnya digunakan untuk perhitungan energi impak dan kekuatan impak menggunakan Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10 berikut ini (Koppula et al., 2018).

$$IE = m \cdot g \cdot l (\cos\beta - \cos\alpha) \quad (3.9)$$

$$IS = \frac{IE}{A} \quad (3.10)$$

Di mana:

IE = *Impact Energy* (Joule)

m = Massa bandul (kg)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

- l = Panjang bandul (m)
 β = Sudut akhir setelah impak ($^{\circ}$)
 α = Sudut awal sebelum impak ($^{\circ}$)
 IS = *Impact Strength* (kJ/m^2)
 A = Luas penampang di bawah takik (m^2)

3.7 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan dan jadwal penelitian pada penelitian kali ini terdapat pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

Perlakuan	Sampel				
	Al Bulk	Non-HT	SHT50	SHT60	SHT70
<i>Holding time</i> <i>Solution Treatment</i> (menit)	-	-	50	75	100
Pengujian	Spark-OES	✓	-	-	-
	Densitas dan Porositas	-	✓	✓	✓
	Mikroskop Stereo	-	✓	✓	✓
	XRD	-	✓	✓	✓
	Metalografi	-	✓	✓	✓
	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	█	█	█	█																
Pengecoran Aluminium Foam					█	█	█	█	█	█	█	█								
Solution Heat Treatment													█							
Artificial Aging													█							
Pengujian								█					█	█	█	█				
Analisis Data dan Pembahasan														█	█	█	█	█	█	█
Penyusunan Laporan Akhir															█	█	█	█	█	█

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil dan Pembahasan Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi dilakukan terhadap bahan baku paduan Al-Mg-Si. Hasil pengujian *Spark-OES* untuk komposisi bahan paduan disajikan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Hasil pengujian *Spark-OES* komposisi paduan Al-Mg-Si

Unsur	Kadar (wt%)	Kadar (wt%) (ASM, 2001)
Si	0,612	0,40 – 0,80
Fe	0,227	Max 0,70
Cu	0,289	0,15 – 0,40
Mn	0,0132	Max 0,15
Mg	0,753	0,80 – 1,20
Cr	0,0936	0,04 – 0,35
Zn	0,0181	Max 0,25
Ti	0,0237	Max 0,15
Al	<i>Balanced</i>	<i>Balanced</i>

Hasil pengujian komposisi bahan penelitian paduan Al-Mg-Si sebagian besar telah menunjukkan kesesuaian dengan standar ASM aluminium 6061. Unsur paduan utama yang terdapat dalam bahan penelitian paduan aluminium adalah Mg dan Si. Untuk kadar dari unsur Si sendiri sebesar 0,612 wt% sudah memenuhi rentang yang terdapat di ASM (ASM, 2001) yang mana sebanyak 0,40 – 0,80 wt%. Namun dari tabel di atas terlihat adanya perbedaan kadar unsur Mg yang sebesar 0,753 wt% dengan standar komposisi paduan Al-Mg-Si (6061) menurut ASM (ASM, 2001) yang sebanyak 0,80 – 1,20 wt% pada Tabel 4.1. Adanya unsur paduan Magnesium pada aluminium dapat meningkatkan sifat mekaniknya yaitu salah satunya kekuatan. Penambahan unsur Magnesium ke dalam paduan aluminium yang juga mengandung unsur Silikon dapat mengakibatkan paduan tersebut bersifat *heat treatable* atau dapat diberi perlakuan panas. Perlakuan panas yang diterapkan pada paduan aluminium adalah *precipitation hardening*. Paduan Al-Mg-Si yang dikenai perlakuan panas akan mengalami peningkatan kekuatan akibat terbentuknya presipitat penguat yaitu Mg₂Si. Pada penelitian ini menganalisis fenomena yang terjadi akibat perlakuan panas *precipitation hardening* pada paduan Al-Mg-Si *foam* sehingga jika bahan memiliki kadar Magnesium yang lebih rendah maka dapat berpengaruh pada presipitat Mg₂Si yang terbentuk sehingga berdampak pada sifat mekanik yang dihasilkan.

4.2 Hasil dan Pembahasan Pengujian Densitas dan Porositas

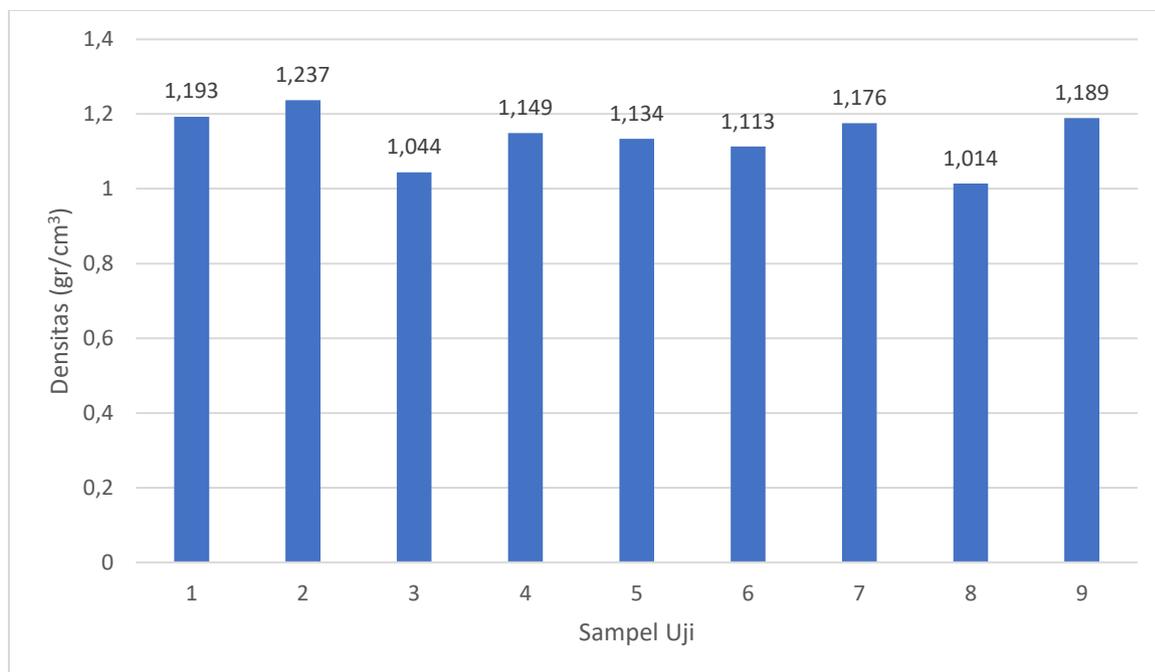
Hasil pengecoran aluminium *foam* ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hasil cor tersebut memiliki *foam* yang uniform dan homogen. Dari coran tersebut dipotong beberapa bagian untuk dijadikan spesimen pengujian. Pengujian densitas dilakukan dengan menggunakan spesimen seperti pada Gambar 4.2. Data yang diperoleh berupa massa (*m*) dan volume (*v*). Data ini digunakan untuk menghitung densitas aluminium *foam*, kemudian dilakukan perhitungan densitas relatif serta persentase porositas. Perhitungan densitas dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.1 dan perhitungan densitas relatif menggunakan Persamaan 3.2. Sedangkan perhitungan persentase porositas menggunakan Persamaan 3.3. Grafik densitas dari masing-masing spesimen aluminium *foam* disajikan pada Gambar 4.3 berikut ini dan Gambar 4.4 untuk grafik porositas masing-masing.



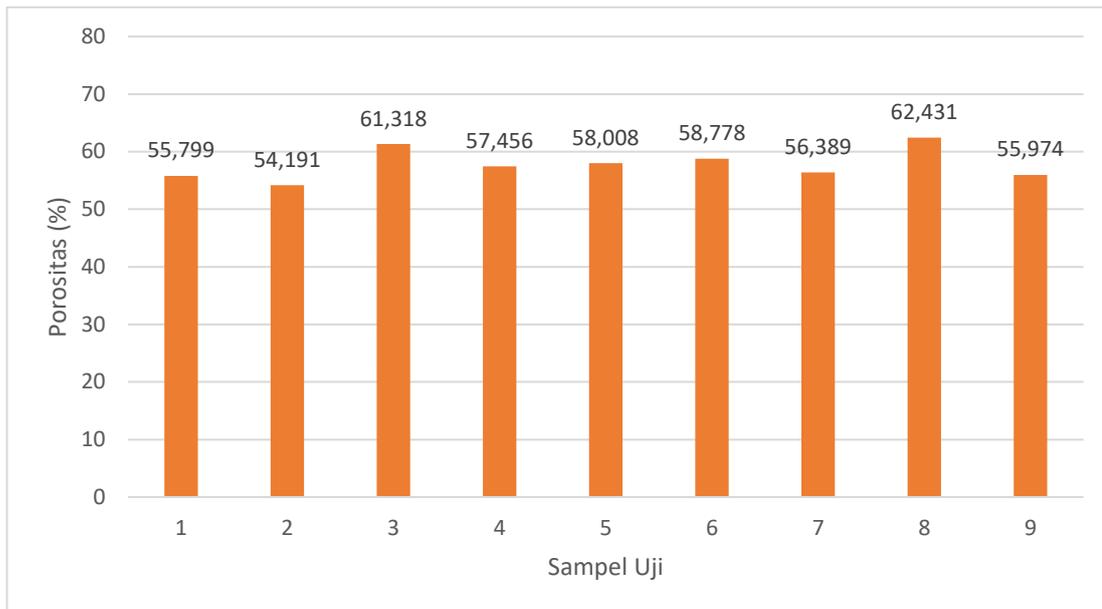
Gambar 4.1 Hasil pengecoran aluminium *foam*



Gambar 4.2 Spesimen uji densitas dan porositas



Gambar 4.3 Grafik hasil pengujian densitas



Gambar 4.4 Grafik persentase porositas

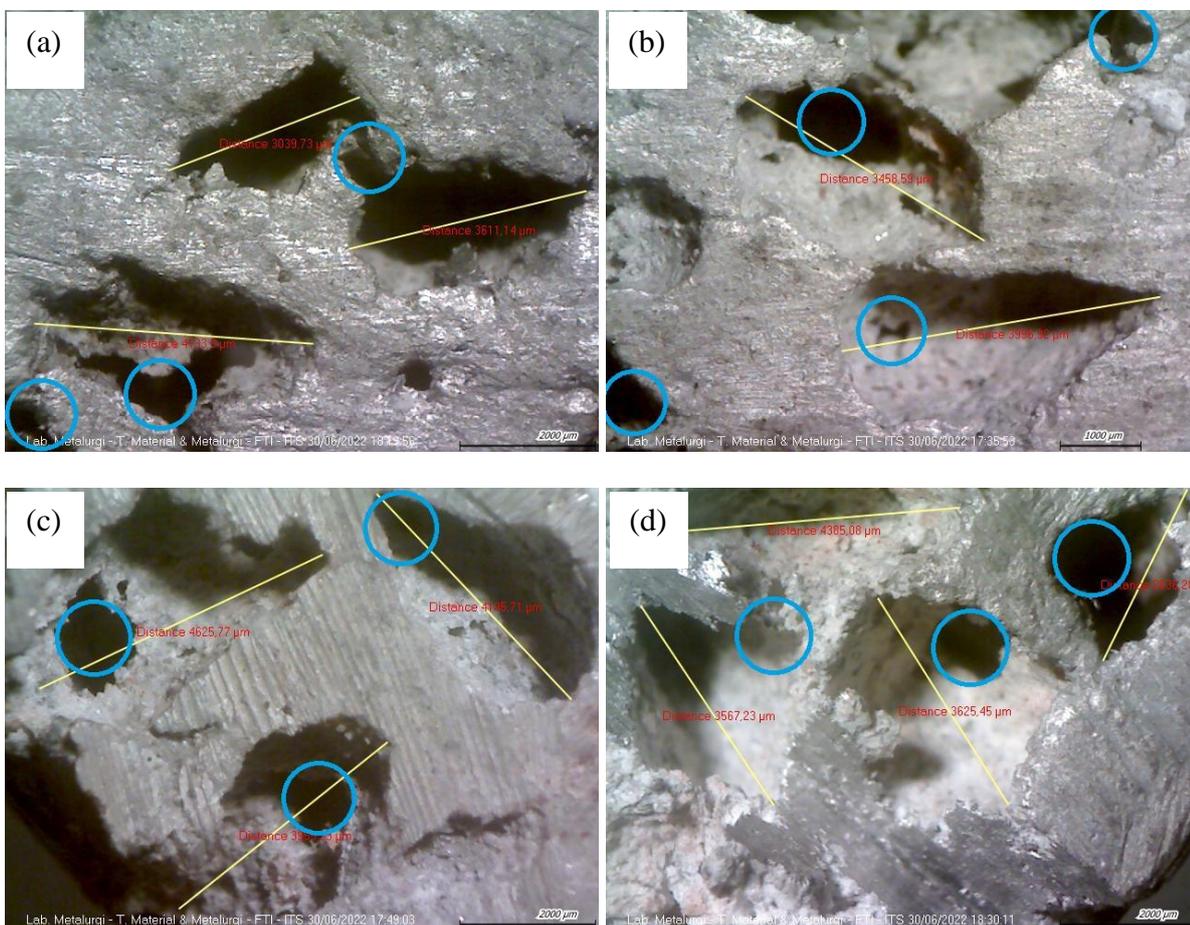
Dari Gambar 4.3 di atas dapat diamati bahwa nilai densitas sampel yang terkecil adalah $1,014 \text{ gr/cm}^3$ dan densitas terbesar adalah $1,237 \text{ gr/cm}^3$, sehingga nilai densitas dari aluminium *foam* yang dihasilkan pada penelitian ini berkisar antara $1,014 - 1,237 \text{ gr/cm}^3$ dengan nilai densitas rata-rata adalah $1,138 \text{ gr/cm}^3$. Nilai densitas yang dimiliki oleh sampel aluminium *foam* pada penelitian dapat mencapai angka yang lebih rendah dari aluminium *bulk* karena pada aluminium *foam* terdapat porositas di dalamnya. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.4, persentase porositas tertinggi yang dapat dicapai adalah sebesar 62,431% dan persentase porositas terkecil adalah 54,191%. Dengan demikian, dalam penelitian ini telah menghasilkan spesimen aluminium *foam* dengan nilai porositas berkisar antara 54,191 – 62,431% dengan rata-rata sebesar 57,816%.

Pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 dapat diamati adanya perbedaan nilai densitas maupun nilai porositas dari masing-masing sampel, meskipun sampel-sampel tersebut diambil dari satu hasil pengecoran yang sama. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan densitas antara *space holder* (NaCl) dengan densitas aluminium. Densitas NaCl adalah sebesar 2,165 gr/ml sedangkan densitas aluminium adalah sebesar 2,70 gr/ml. Akibatnya, ketika aluminium cair yang memiliki temperatur sebesar $750 \text{ }^\circ\text{C}$ dan memiliki viskositas yang rendah dituangkan ke cetakan yang berisi NaCl, terdapat butir NaCl yang mengambang dan tersebar secara tidak merata di dalam lelehan aluminium. Kondisi tersebut tidak dapat dikontrol dan berlangsung hingga logam mengalami solidifikasi. NaCl merupakan konstituen *space holder* yang menciptakan porositas pada aluminium *foam*, sehingga ketika NaCl tersebar secara tidak merata dalam matriks aluminium mengakibatkan terbentuknya porositas yang juga tidak merata dalam produk hasil pengecoran. Akibatnya, ketika produk hasil pengecoran tersebut dibagi menjadi beberapa segmen, tiap-tiap segmen tersebut memiliki nilai porositas yang berbeda dan berdampak pada perbedaan nilai densitas. Fenomena ini juga yang menyebabkan aluminium *foam* yang dihasilkan dalam penelitian ini memiliki nilai densitas yang lebih tinggi dari densitas aluminium *foam* komersial yang diaplikasikan untuk *crashbox* dengan densitas sebesar $0,3 - 1,0 \text{ gr/cm}^3$, dan memiliki persentase porositas yang lebih rendah dari aluminium *foam* komersial yang minimal 70%. Namun demikian, nilai densitas yang dimiliki oleh aluminium *foam* hasil penelitian ini sudah lebih rendah dari densitas aluminium *foam* yang dihasilkan oleh penelitian yang dilakukan Soni yaitu sebesar $1,269 \text{ gr/cm}^3$ (Soni & Biswas, 2016). Begitu pula nilai porositas yang dimiliki aluminium *foam* hasil penelitian ini sudah

lebih tinggi dari porositas aluminium *foam* hasil penelitian yang dilakukan oleh Hussain yang sebesar 48,15% (Z. Hussain and N. S. A. Suffin, 2011). Besarnya densitas dan porositas aluminium *foam* ketika sebelum *heat treatment* tidak berbeda dengan ketika setelah *heat treatment*, sehingga dapat dikatakan bahwa *heat treatment* tidak mempengaruhi densitas maupun porositas dari aluminium *foam*.

4.3 Hasil dan Pembahasan Pengujian Mikroskop

Pengujian mikroskop yang dilakukan adalah mikroskop Stereo dengan tipe Zeiss Stemi DV4 yang terdapat di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pengamatan dengan menggunakan mikroskop stereo ini menggunakan perbesaran 10x bertujuan untuk menganalisis diameter terpanjang pori dari aluminium *foam* yang dihasilkan, serta untuk menganalisis tipe pori yang saling terhubung atau *interconnected*. Hasil pengamatan dengan mikroskop Stereo disajikan pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Hasil pengujian mikroskop stereo perbesaran 10x pada sampel aluminium *foam*:
(a) sampel pertama, (b) sampel kedua, (c) sampel ketiga, (d) sampel keempat

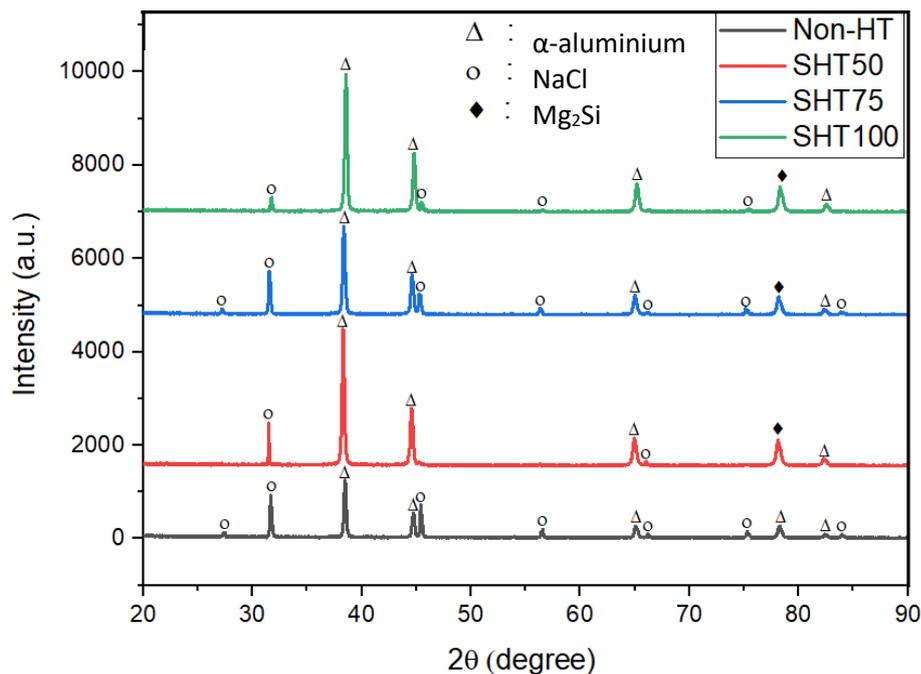
Dari Gambar 4.5 di atas dapat dianalisis diameter terpanjang pori yang terbentuk pada masing-masing sampel yang ditunjukkan dengan garis berwarna kuning. Rata-rata diameter terpanjang pori pada sampel pertama adalah sebesar 3,595 mm. Pada sampel kedua memiliki rata-rata diameter terpanjang pori sebesar 3,727 mm. Sampel ketiga memiliki rata-rata diameter terpanjang pori sebesar 4,241 mm sedangkan pada sampel keempat memiliki diameter terpanjang rata-rata pori sebesar 3,603 mm. Diameter terpanjang pori ini tidak berbeda jauh dengan ukuran *space holder* yang digunakan, yang mana dalam penelitian ini

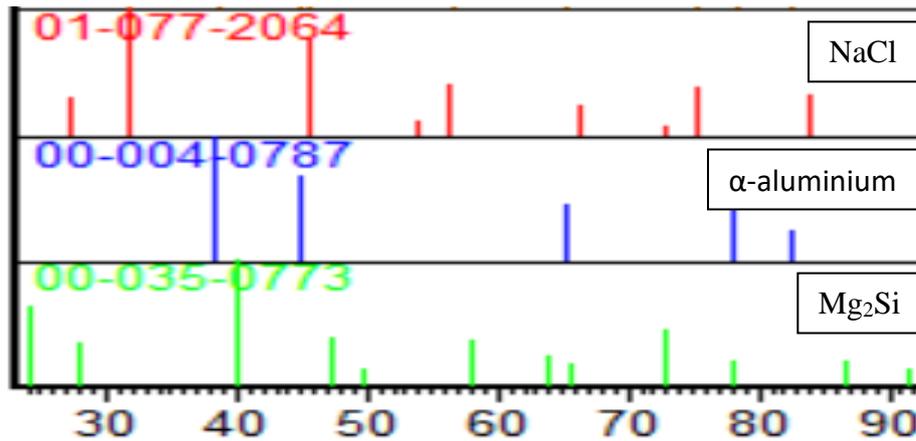
adalah NaCl dengan ukuran maksimal *mesh* 4 dan minimal *mesh* 7 atau setara dengan 2,83 – 4,75 mm. Hal serupa juga dihasilkan oleh penelitian sebelumnya yang menggunakan NaCl berukuran 2 mm, ukuran pori yang dihasilkan juga memiliki rata-rata 2 mm (Casas et al., 2020). Berdasarkan fakta tersebut, maka penelitian ini sudah sesuai dengan tinjauan pustaka yang menyatakan bahwa bentuk dan ukuran partikel *space holder* menentukan bentuk dan ukuran pori pada aluminium *foam* yang dihasilkan (Wan et al., 2021).

Dari masing-masing gambar sampel juga dapat diamati adanya struktur pori yang saling terhubung. Pada gambar di atas ditandai dengan lingkaran berwarna biru. Lingkaran biru pada gambar di atas menandai bagian yang gelap pada sampel. Bagian-bagian gelap yang terdeteksi pada semua spesimen merupakan lubang saluran yang menghubungkan antar pori. Hal ini menunjukkan bahwa dalam penelitian ini menghasilkan *open-cell* aluminium *foam* dengan *interconnected porous*. Pori yang saling terhubung (*interconnected*) ini diakibatkan oleh partikel-partikel *space holder* (NaCl) yang saling bersentuhan. Sehingga setelah dilakukan proses *leaching*, partikel-partikel NaCl yang saling terhubung menghasilkan *interconnected porous*. Hal serupa juga dihasilkan oleh penelitian sebelumnya yang menghasilkan aluminium *foam* dengan struktur *interconnected porous* yang juga menggunakan partikel NaCl sebagai *space holder* (Karuppasamy et al., 2020). Dari hasil penelitian ini dapat dikatakan bahwa penelitian ini sudah sesuai dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa aluminium *foam* bertipe *open-cell* didapatkan dengan menggunakan *space holder* yang dapat menghasilkan struktur *interconnected porous* akibat partikel-partikelnya yang saling bersentuhan satu sama lain (Wan et al., 2021). Karakteristik pori aluminium *foam* sebelum diberi *heat treatment* tidak berbeda dengan setelah *heat treatment* sehingga dapat dikatakan bahwa *heat treatment* tidak berpengaruh pada karakteristik pori aluminium *foam*.

4.4 Hasil dan Pembahasan Pengujian XRD

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk menganalisis kristal dari unsur, senyawa, maupun fasa yang terdapat di dalam spesimen uji. Khususnya pengujian XRD dalam penelitian ini untuk menganalisis keberadaan Mg₂Si. Hasil pengujian XRD dari semua spesimen disajikan pada Gambar 4.6 di bawah ini.





Gambar 4.6 Perbandingan hasil pengujian XRD

Berdasarkan Gambar 4.6 di atas, dari pengujian XRD ini dapat diamati unsur dan senyawa yang terdeteksi di antaranya adalah α -aluminium, NaCl, dan Mg_2Si . Walaupun paduan Al-Mg-Si 6061 memiliki unsur paduan lain, namun unsur-unsur paduan tersebut dapat diabaikan karena menjadi bagian dari *background* dalam hasil pengujian XRD.

Untuk fasa α -aluminium, posisi *peak* tertinggi berada pada 2θ sebesar 38° pada bidang [1 1 1]. Berdasarkan hkl-nya, kristal fasa α -aluminium berstruktur FCC (*Face Centered Cubic*). Berdasarkan posisi *peak* tertinggi ini, dapat dihitung nilai d_{spacing} , *lattice constant*, dan ukuran kristalit fasa α -aluminium pada masing-masing spesimen menggunakan Persamaan 3.4, Persamaan 3.5, dan Persamaan 3.6. berikut disajikan hasil perhitungannya pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan pengujian XRD fasa α -aluminium

Spesimen	2θ	FWHM	d_{spacing} (Å)	<i>Lattice Constant</i> (Å)	Ukuran kristal (nm)
Non-HT	$38,4768^\circ$	$0,2040^\circ$	2,334	4,043	41,235
SHT50	$38,2604^\circ$	$0,2802^\circ$	2,349	4,069	30,001
SHT75	$38,3325^\circ$	$0,2632^\circ$	2,345	4,062	32,321
SHT100	$38,4204^\circ$	$0,2342^\circ$	2,337	4,048	35,897

Dari Tabel 4.2 di atas diketahui bahwa perlakuan panas pada ketiga spesimen menghasilkan nilai FWHM yang lebih besar dan nilai *lattice constant* yang juga lebih besar dari pada spesimen tanpa perlakuan. Di dalam buku yang ditulis oleh Widyastuti dkk. dinyatakan bahwa peningkatan nilai FWHM diakibatkan oleh keberadaan tegangan tarik di dalam material (Widyastuti et al., 2019). Selain itu, hasil penelitian Ahamed dkk. menunjukkan bahwa nilai *lattice constant* juga berbanding lurus dengan *lattice strain* (Ahamed & Kumar, 2011). Hal ini menunjukkan bahwa di dalam ketiga spesimen hasil perlakuan panas pada penelitian ini terdapat *lattice strain* dan tegangan internal. Adanya *lattice strain* disebabkan oleh keberadaan presipitat. Keberadaan presipitat dapat menahan pergerakan dislokasi dan mengakibatkan *lattice strain* (Budiarto et al., 2021). Di sisi lain, terjadinya pergeseran sudut difraksi (2θ) juga dapat mengindikasikan keberadaan presipitat (Chen et al., 2020). Dari pengujian XRD ini juga terdeteksi adanya *peak* Mg_2Si pada posisi 2θ di sekitar 78° pada bidang [5 1 1] dan berstruktur FCC pada ketiga spesimen hasil perlakuan panas, sedangkan pada spesimen tanpa perlakuan tidak terdeteksi adanya Mg_2Si . Maka presipitat yang muncul pada paduan Al-Mg-Si yang mengalami perlakuan panas adalah presipitat Mg_2Si . Sehingga dapat dikatakan bahwa perlakuan panas yang dilakukan dalam penelitian ini telah berhasil membentuk presipitat Mg_2Si yang menyebabkan adanya *lattice*

strain dan tegangan internal dan sesuai dengan ASM (ASM, 1991) sehingga berpengaruh pada sifat mekaniknya yaitu mengakibatkan naiknya kekerasan dan kekuatan.

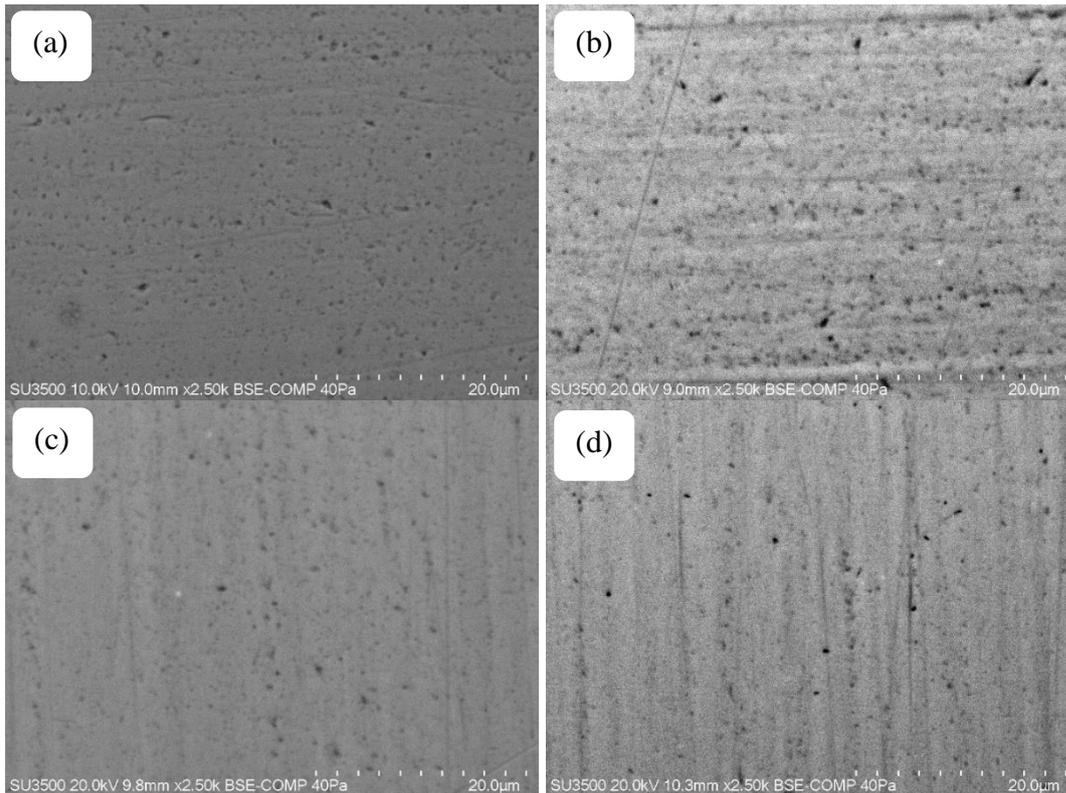
Perbedaan durasi *holding time* ketika *solution treatment* mengakibatkan posisi *peak* tertinggi fasa α -aluminium bergeser ke kanan. Selain itu nilai FWHM dan nilai *lattice constant* semakin turun. Selain itu, ukuran kristalinitasnya juga semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan *lattice strain* dan penurunan tegangan internal pada spesimen. Semakin lama durasi *holding time* dapat meningkatkan ukuran kristal dan menurunkan nilai *lattice constant* sehingga dapat mengurangi *lattice strain* dan tegangan di dalam material dan pada akhirnya dapat menurunkan kekuatan dan kekerasannya.

Dari Gambar 4.6 dapat diamati bahwa pada semua spesimen terdeteksi adanya NaCl. Hal ini menunjukkan bahwa NaCl tersebut tidak larut ketika dilakukan proses *leaching*, dikarenakan NaCl tersebut terjebak dan terisolasi dalam matriks logam paduan aluminium. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan densitas antara *space holder* (NaCl) dengan densitas aluminium. Densitas NaCl adalah sebesar 2,165 gr/ml sedangkan densitas aluminium adalah sebesar 2,70 gr/ml. Akibatnya, ketika aluminium cair yang memiliki temperatur sebesar 750 °C dan memiliki viskositas yang rendah dituangkan ke cetakan yang berisi NaCl, terdapat butir NaCl yang mengambang dan tersebar secara tidak merata bahkan ada yang terpisah dari butir lain di dalam lelehan aluminium. Kondisi tersebut tidak dapat dikontrol dan berlangsung hingga logam mengalami solidifikasi, dan butir NaCl yang terpisah dari butir lain tersebut terjebak dan terisolasi di dalam matriks logam paduan aluminium. Ditemukannya NaCl dalam sampel pada penelitian ini berhubungan dengan pernyataan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa keadaan di mana permukaan dari masing-masing partikel *space holder* (NaCl) merupakan keadaan yang penting untuk mengoptimalkan proses disolusi. Partikel *space holder* yang masih tersisa dan terperangkap di dalam matriks aluminium akan berdampak pada nilai densitas dan porositas (Wan et al., 2021). Hal ini mendukung hasil pengujian densitas dan porositas yang menunjukkan adanya perbedaan nilai densitas dan porositas dari beberapa sampel yang diambil dari satu hasil pengecoran yang sama.

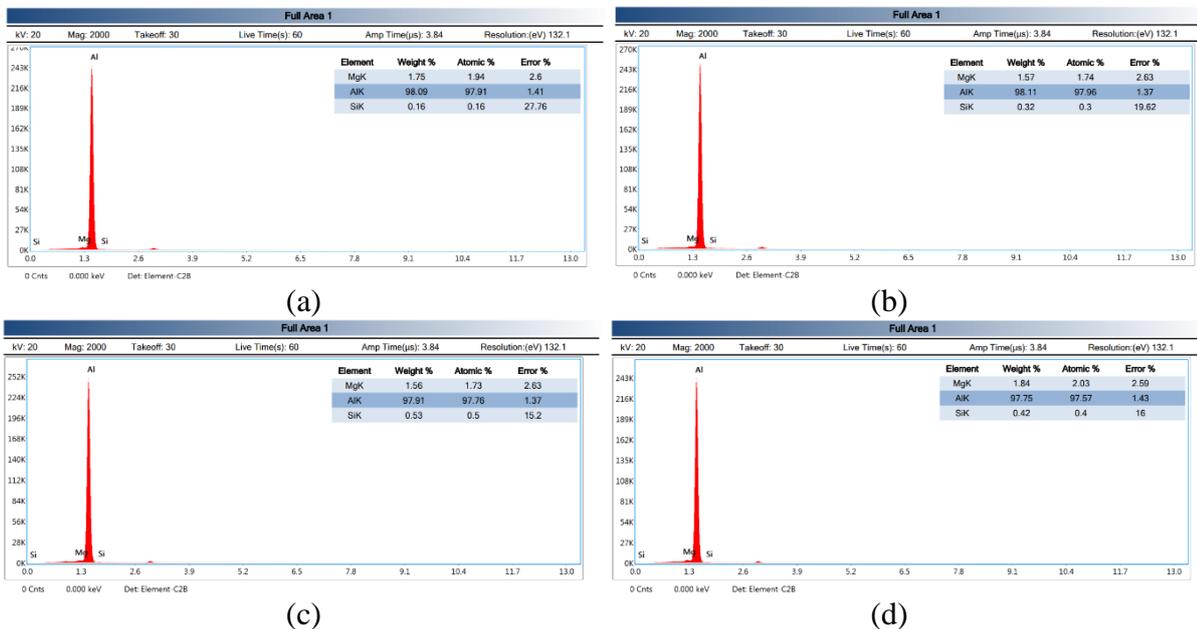
Adanya NaCl yang tidak larut ini juga menyebabkan terbentuknya senyawa *impurities* seperti *sodium silicide* (Na_xSi_y), *silicon tetrachloride* (SiCl_4), *sodium magnesium chloride* (Na_2MgCl_4), *magnesium aluminum chloride* (MgAl_2Cl_8). *Impurities* tersebut tidak dibutuhkan dan lebih baik dihilangkan. NaCl yang masih tersisa juga berpotensi merusak lapisan pasif dan menimbulkan korosi apabila berada pada lingkungan yang mengandung air.

4.5 Hasil dan Pembahasan Pengujian SEM-EDX

Pengujian SEM dilakukan untuk menganalisis spesimen dari permukaannya dan pengujian EDX dilakukan untuk menganalisis proporsi unsur aluminium, magnesium, dan silikon yang terdapat pada spesimen. Berikut ini disajikan hasil pengujian SEM terhadap masing-masing sampel pada Gambar 4.7 dan hasil pengujian EDX pada Gambar 4.8.



Gambar 4.7 Hasil pengujian SEM: (a) Spesimen non-HT, (b) Spesimen SHT50, (c) Spesimen SHT75, (d) Spesimen SHT100



Gambar 4.8 Hasil pengujian EDX: (a) Spesimen non-HT, (b) Spesimen SHT50, (c) Spesimen SHT75, (d) Spesimen SHT100

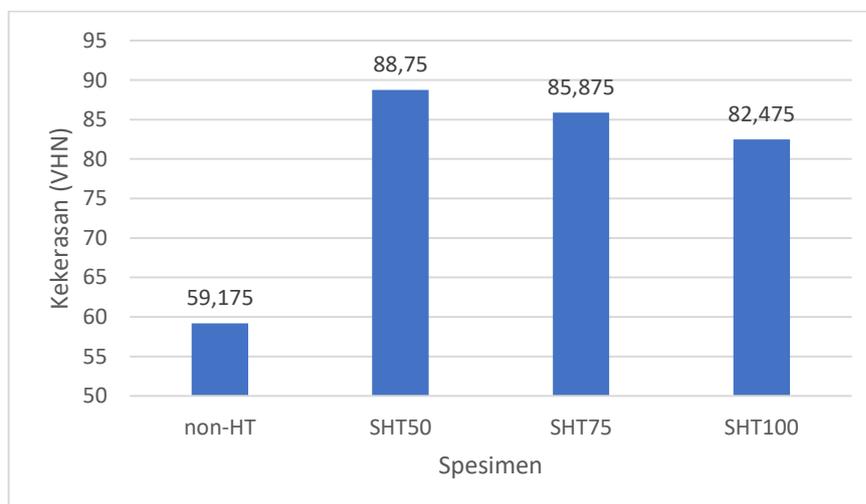
Dari Gambar 4.7 terlihat tidak ada perbedaan yang menonjol dari keempat spesimen. Pada keempat spesimen nampak titik-titik hitam yang berukuran sangat kecil kurang dari 1 μm tersebar di matriks α -aluminium. Perbedaan dari keempat spesimen baru dapat dianalisis dari hasil pengujian EDX pada Gambar 4.8. Unsur-unsur paduan yang dapat diamati hanyalah Mg dan Si sedangkan unsur lain tidak dapat diamati karena tidak muncul puncaknya.

Dikarenakan pada hasil pengujian SEM hanya tampak bintik-bintik kecil yang tersebar pada matriks α -aluminium, sedangkan pada hasil pengujian EDX unsur paduan yang terdeteksi hanya Mg dan Si, maka unsur Mg maupun Si tersebut ditunjukkan dengan bintik hitam. Dari hasil pengujian EDX diketahui bahwa kadar Si pada spesimen tanpa perlakuan sangat kecil yaitu 0,16 wt%. Dilakukannya perlakuan panas terbukti dapat menaikkan kadar Si pada spesimen SHT50, SHT75 dan SHT100 berturut-turut sebesar 0,32 wt%, 0,53wt%, dan 0,42 wt%. Perlu diketahui bahwa rasio Mg/Si di dalam Mg_2Si adalah sebesar 1,73 (ASM, 1991). Bila diasumsikan semua Si tersebut membentuk Mg_2Si , maka dengan perhitungan stoikiometri didapatkan kadar Mg_2Si pada spesimen non-HT, SHT50, SHT75, dan SHT100 berturut-turut adalah 0,437 wt%, 0,874 wt%, 1,447 wt%, dan 1,147 wt%. Dengan kadar Mg_2Si yang lebih tinggi seharusnya material menjadi lebih kuat dan lebih keras. Dengan begitu, semakin lama *holding time* pada *solution treatment* mengakibatkan kadar Si dan kadar Mg_2Si semakin tinggi sehingga akan berdampak pada meningkatnya kekuatan dan kekerasan. Hasil ini bersesuaian dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa aluminium yang kaya akan Si memiliki kekerasan yang lebih tinggi (Ding et al., 2015).

Telah disebutkan di atas bahwa dengan perhitungan stoikiometri didapatkan kadar Mg_2Si sebesar 0,437 wt% pada spesimen non-HT. Namun kecil kemungkinan untuk terbentuk Mg_2Si karena kadar Si yang terlalu rendah. Hal ini diperkuat dengan hasil pengujian XRD yang tidak mendeteksi adanya Mg_2Si pada spesimen ini. Dengan begitu maka dapat dikatakan bahwa bintik-bintik hitam kecil tersebut adalah unsur paduan yang terdiri dari Mg dan Si namun Mg lebih mendominasi ditunjukkan dengan kadarnya yang sangat tinggi pada hasil pengujian EDX.

4.6 Hasil dan Pembahasan Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk menganalisis nilai kekerasan dari masing-masing spesimen. Pengujian kekerasan menggunakan mesin uji *Vickers*. Hasil pengujian kekerasan disajikan pada Gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.9 Perbandingan nilai kekerasan

Dari Gambar 4.9 di atas diketahui bahwa nilai kekerasan spesimen aluminium *foam* tanpa perlakuan adalah sebesar 59,175 VHN. Spesimen SHT50 memiliki nilai kekerasan sebesar 88,750 VHN dan mengalami kenaikan nilai kekerasan sebesar 47,978% dari spesimen tanpa perlakuan. Pada spesimen SHT75 memiliki nilai kekerasan sebesar 85,875 VHN dan mengalami kenaikan nilai kekerasan sebesar 43,185% dari spesimen tanpa perlakuan. Sedangkan untuk spesimen SHT100 memiliki nilai kekerasan sebesar 82,475 VHN. Spesimen ini mengalami kenaikan nilai kekerasan sebesar 37,516% dari spesimen tanpa perlakuan.

Seperti yang diketahui bahwa perlakuan panas *precipitation hardening* yang dilakukan pada paduan Al-Mg-Si dapat meningkatkan kekuatan maupun kekerasannya. Peningkatan kekuatan dan kekerasan terjadi karena terbentuknya partikel presipitat Mg_2Si (ASM, 1991) yang sangat kecil dan tersebar pada matriks aluminium (Tan & Said, 2009). Dari Gambar 4.9 dapat diamati bahwa terjadi kenaikan nilai kekerasan pada semua spesimen yang mengalami perlakuan panas *precipitation hardening* dengan variasi *holding time* saat *solution treatment*. Hal ini terjadi karena pada semua spesimen hasil perlakuan panas terdapat tegangan internal yang dapat menghambat dislokasi sehingga lebih keras, seperti yang dijelaskan pada hasil pengujian XRD. Tegangan internal ini disebabkan oleh keberadaan presipitat, dan hasil pengujian XRD mendeteksi adanya Mg_2Si , maka presipitat yang muncul adalah presipitat Mg_2Si . Presipitat Mg_2Si ini berperan untuk menghambat dislokasi pada matriks aluminium, sehingga menjadi lebih kuat dan lebih keras (Zhu et al., 2019). Namun dalam hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kekerasan semakin menurun ketika *holding time* pada saat *solution treatment* semakin lama. Penyebab utama hal ini adalah karena *lattice constant* dari fasa α -aluminium yang semakin kecil dan ukuran kristalnya yang semakin besar sehingga tegangan internal menurun seiring bertambahnya waktu *holding time*. Hal inilah yang menyebabkan penambahan durasi *holding time* dapat menurunkan nilai kekerasannya. Hal yang sama juga ditemukan oleh Budiarto dkk. yang menyatakan bahwa adanya penurunan nilai kekerasan disebabkan oleh bertambahnya ukuran kristal aluminium (Budiarto et al., 2021).

4.7 Hasil dan Pembahasan Pengujian Kompresi

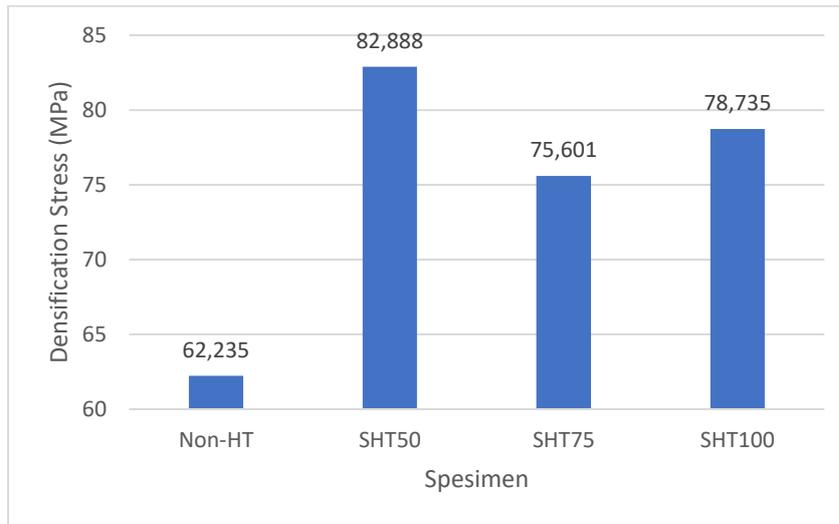
Pengujian kompresi dilakukan untuk menganalisis kekuatan kompresi dan absorpsi energi yang dimiliki oleh tiap-tiap spesimen. Dimensi spesimen untuk uji kompresi adalah 2 cm x 2 cm x 2 cm, sesuai dengan standar ISO13314 dan diuji menggunakan HT-9501 *Series Universal Testing Machine*. Bentuk spesimen yang diberi uji kompresi dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut.



Gambar 4.10 Spesimen pengujian kompresi

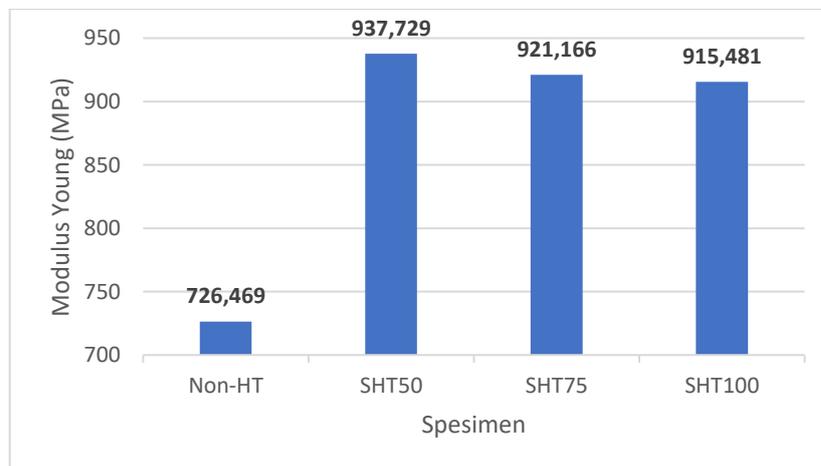
Spesimen yang diuji kompresi yaitu spesimen non-HT, spesimen SHT50, spesimen SHT75, dan spesimen SHT100. Masing-masing spesimen memiliki 3 sampel agar hasil pengujian lebih valid. Data yang didapat dari pengujian kompresi berupa kurva Beban vs Pertambahan Panjang kemudian diolah dengan menggunakan Persamaan 3.7 dan 3.8.

Dari kurva Tegangan-Regangan dapat ditentukan *plateau stress* dan *densification stress* dengan menggunakan standar dari ISO 13314. *Plateau stress* yaitu rata-rata tegangan dari 20% regangan hingga 30% atau 40% regangan. *Densification stress* dapat dihitung dari 1,3 kali *plateau stress* (ISO, 2011). Nilai keuletan diambil dari *strain* ketika diberi *densification stress*. Kemampuan absorpsi energinya diambil dari nilai ketangguhannya (*toughness*). Nilai *toughness* didapat dengan menghitung luas daerah di bawah kurva *plateau* yang diolah dari kurva Tegangan-Regangan dengan menggunakan *software Origin Pro 2018*.



Gambar 4.11 Perbandingan nilai *densification stress*

Dari Gambar 4.11 diketahui bahwa spesimen tanpa perlakuan memiliki *densification stress* sebesar 62,235 MPa. Spesimen dengan perlakuan panas *solution treatment* 50 menit (SHT50) memiliki *densification stress* sebesar 82,888 MPa, bila dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan maka spesimen SHT50 mengalami kenaikan *densification stress* sebanyak 33,186%. Untuk spesimen dengan perlakuan panas *solution treatment* 75 menit (SHT75) memiliki *densification stress* sebesar 75,601 MPa, mengalami kenaikan *densification stress* sebanyak 21,477%. Sedangkan pada spesimen dengan perlakuan panas *solution treatment* 100 menit (SHT100) memiliki *densification stress* sebesar 78,735 MPa. Spesimen ini mengalami kenaikan *densification stress* sebanyak 26,512%.

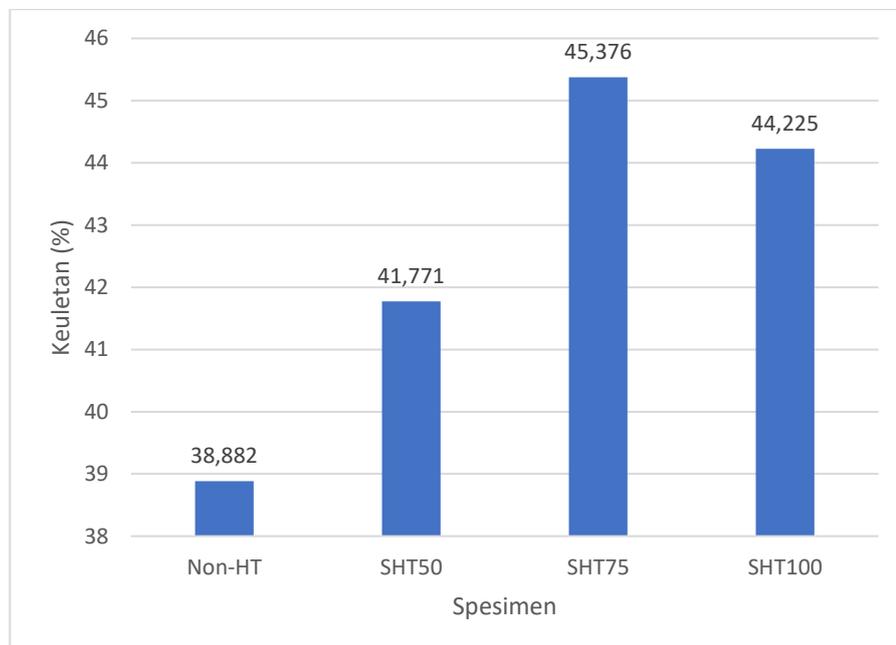


Gambar 4.12 Perbandingan nilai *modulus young*

Dari Gambar 4.12 di atas dapat dianalisis besarnya *Modulus young* untuk spesimen tanpa perlakuan adalah 726,469 MPa. Spesimen SHT50 memiliki *Modulus young* sebesar 937,729 MPa, mengalami kenaikan sebesar 29,081% dari spesimen tanpa perlakuan. Spesimen SHT75 memiliki *Modulus young* sebesar 921,166 MPa dengan kenaikan sebesar 26,801%. Serta spesimen SHT100 memiliki nilai *Modulus young* sebesar 915,481 MPa. Spesimen ini mengalami peningkatan nilai *Modulus young* sebesar 26,018%.

Besarnya kekuatan yang dimiliki oleh masing-masing spesimen aluminium *foam* pada penelitian ini lebih rendah dari *ultimate strength* aluminium *bulk* akibat adanya porositas yang tinggi. Dari Gambar 4.11 maupun gambar 4.12 dapat diamati terjadinya peningkatan *densification stress* dan *modulus young* pada ketiga spesimen hasil perlakuan panas. Hal ini diakibatkan oleh adanya tegangan internal yang dapat menghambat dislokasi sehingga menjadi lebih kuat. Tegangan internal ini disebabkan oleh keberadaan presipitat, dan dengan diperkuat oleh hasil pengujian XRD yang mendeteksi adanya Mg_2Si , maka presipitat yang muncul adalah presipitat Mg_2Si . Presipitat Mg_2Si ini berperan untuk menghambat dislokasi pada matriks aluminium, sehingga menjadi lebih kuat dan lebih keras (Zhu et al., 2019). Hasil ini telah sesuai dengan ASM (ASM, 1991) yang menyatakan bahwa Mg_2Si merupakan konstituen presipitat yang dapat menguatkan paduan aluminium dan dihasilkan dari proses perlakuan panas *precipitation hardening*. Mg_2Si ini merupakan konstituen yang pada awalnya larut dalam kristal aluminium selama proses *solution treatment* dan selanjutnya membentuk presipitat selama proses *artificial aging*.

Namun peningkatan nilai *densification stress* dan *modulus young* ini memiliki tren menurun apabila *holding time* yang diberikan semakin lama. Hal ini terjadi karena semakin lama *holding time* yang diberikan berakibat pada *lattice constant* dari fasa α -aluminium yang semakin kecil dan ukuran kristalnya yang semakin besar, seperti yang disajikan pada perhitungan hasil pengujian XRD. Akibatnya, tegangan internal semakin berkurang sehingga nilai *densification stress* dan *modulus young* juga menurun. Nilai *densification stress* dan *modulus young* tertinggi dimiliki oleh spesimen SHT50 karena memiliki ukuran kristal aluminium yang terkecil dan dengan tegangan internal paling besar. Hasil ini telah bersesuaian dengan penelitian sebelumnya oleh Kushwaha yang menyatakan bahwa ukuran kristal yang lebih kecil menghasilkan kekuatan yang lebih besar (Kushwaha et al., 2022).

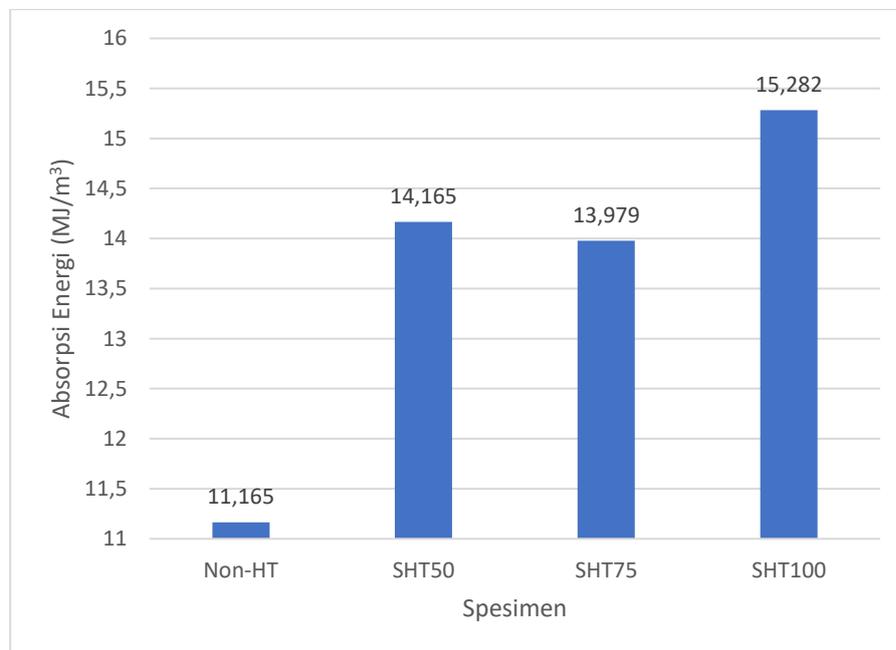


Gambar 4.13 Perbandingan nilai keuletan

Dari Gambar 4.13 diketahui bahwa spesimen tanpa perlakuan memiliki keuletan sebesar 38,882%. Spesimen dengan perlakuan panas *solution treatment* 50 menit (SHT50) memiliki keuletan sebesar 41,771%, bila dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan maka spesimen SHT50 mengalami kenaikan keuletan sebanyak 7,431%. Untuk spesimen dengan perlakuan panas *solution treatment* 75 menit (SHT75) memiliki keuletan sebesar 45,376%, mengalami kenaikan keuletan sebanyak 16,702%. Sedangkan pada spesimen dengan

perlakuan panas *solution treatment* 100 menit (SHT100) memiliki keuletan sebesar 44,225%. Spesimen ini mengalami kenaikan keuletan sebanyak 13,742%.

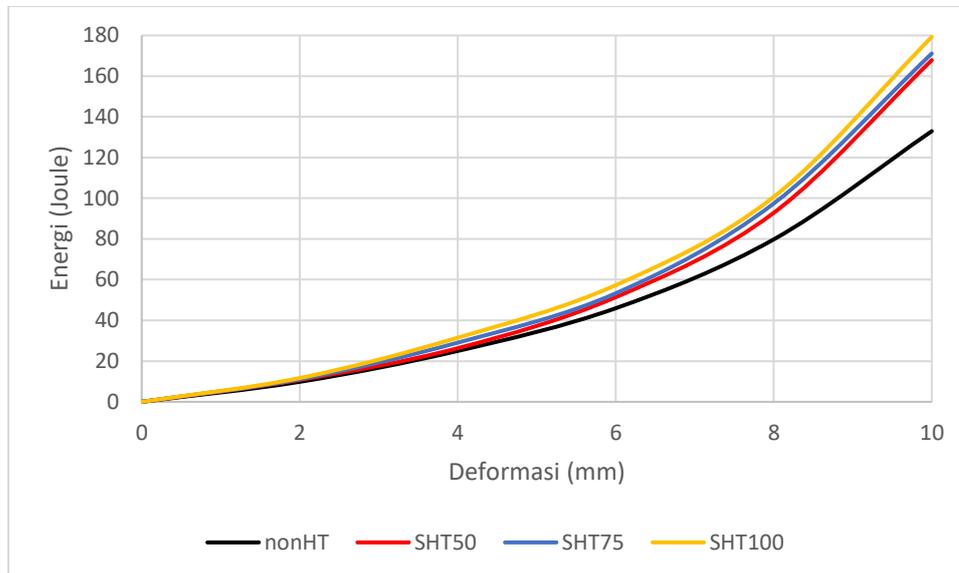
Nilai keuletan yang dimiliki semua spesimen aluminium *foam* pada penelitian ini lebih tinggi dari aluminium *bulk* akibat adanya porositas yang tinggi. Ketiga variasi perlakuan panas pada penelitian ini memiliki keuletan yang lebih tinggi dari spesimen tanpa perlakuan. Penyebab dari fenomena ini adalah karena spesimen tanpa perlakuan merupakan spesimen yang murni hasil pengecoran langsung. Seperti yang diketahui bahwa benda yang merupakan hasil pengecoran langsung memiliki struktur kristal yang ireguler dan tidak beraturan sehingga memiliki sifat mekanik yang tidak bagus. Dilakukannya perlakuan panas dapat memperbaiki struktur dan susunan kristal menjadi lebih homogen dan seragam sehingga dapat memperbaiki sifat mekaniknya salah satunya adalah keuletan. Fenomena ini sesuai dengan hasil penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa *solid solution treatment* dapat menghomogenkan struktur hasil cor, menghaluskan partikel paduan, dan meningkatkan keuletan (Jamaludin et al., 2015). Hasil uji kompresi juga menunjukkan bahwa peningkatan nilai keuletan yang dihasilkan oleh perlakuan panas dengan variasi *holding time* memiliki tren naik, sehingga jika *holding time* semakin lama maka keuletan semakin tinggi. Hal ini terjadi karena durasi *holding time* yang lebih lama dapat menurunkan tegangan internal pada α -aluminium, sehingga *lattice constant* menjadi lebih kecil dan ukuran kristalnya semakin besar. Tegangan internal yang semakin kecil menyebabkan keuletan naik. Penelitian sebelumnya juga menemukan bahwa aluminium dengan ukuran kristal yang lebih besar memiliki keuletan yang lebih tinggi (Jeong et al., 2015). Nilai keuletan tertinggi dimiliki oleh spesimen SHT75. Bila menurut tren seharusnya keuletan spesimen SHT75 tidak lebih tinggi dari spesimen SHT100. Anomali ini bisa jadi disebabkan oleh adanya porositas yang lebih tinggi sehingga keuletan yang dimiliki juga lebih tinggi.



Gambar 4.14 Perbandingan nilai absorpsi energi

Dari Gambar 4.14 diketahui bahwa spesimen tanpa perlakuan memiliki nilai absorpsi energi sebesar 11,165 MJ/m³. Spesimen dengan perlakuan panas *solution treatment* 50 menit (SHT50) memiliki nilai absorpsi energi sebesar 14,165 MJ/m³, bila dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan maka spesimen SHT50 mengalami kenaikan absorpsi energi sebanyak 26,869%. Untuk spesimen dengan perlakuan panas *solution treatment* 75 menit (SHT75) memiliki nilai absorpsi energi sebesar 13,979 MJ/m³, mengalami kenaikan absorpsi

energi sebanyak 25,204%. Sedangkan pada spesimen dengan perlakuan panas *solution treatment* 100 menit (SHT100) memiliki nilai absorpsi energi sebesar 15,282 MJ/m³. Spesimen ini mengalami kenaikan absorpsi energi sebanyak 36,874%.



Gambar 4.15 Hubungan antara energi dengan deformasi

Dari Gambar 4.15 di atas didapatkan informasi bahwa energi yang mampu diserap oleh ketiga spesimen hasil perlakuan panas lebih tinggi dari spesimen tanpa perlakuan. Dapat diamati juga bahwa *holding time* yang lebih lama ketika *solution treatment* mengakibatkan spesimen mampu menyerap energi lebih banyak. Kemampuan absorpsi energi yang dimiliki oleh spesimen diambil dari sifat ketangguhan, di mana ketangguhan memerlukan kombinasi yang bagus antara kekuatan dan keuletan yang baik (Callister Jr & Rethwisch, 2018). Berdasarkan Gambar 4.14 nilai ketangguhan tertinggi dimiliki oleh spesimen SHT100. Spesimen SHT50 walaupun memiliki kekuatan paling tinggi, namun keuletannya paling rendah sehingga ketangguhan juga lebih rendah. Sedangkan pada spesimen SHT75 walaupun memiliki keuletan tertinggi, namun kekuatannya terendah sehingga ketangguhannya juga lebih rendah. Dari penelitian ini diketahui bahwa spesimen dengan *holding time* selama 100 menit ketika proses *solution treatment* menghasilkan nilai ketangguhan tertinggi dan paling optimal karena memiliki kombinasi kekuatan dan keuletan yang bagus.

Aluminium *foam* yang diaplikasikan pada *crashbox* mobil memiliki spesifikasi yaitu kekuatan kompresi mencapai 20 MPa dan kemampuan menyerap energi mencapai 12 MJ/m³, *Densification strain* mencapai 40-80% dan *modulus young* minimal 0,4 GPa. Pada penelitian ini dapat menghasilkan aluminium *foam* dengan kekuatan sebesar 62,235 MPa dan *modulus young* sebesar 0,726 GPa untuk spesimen tanpa perlakuan panas. Dilakukannya perlakuan panas *precipitation hardening* dapat meningkatkan kekuatan kompresinya menjadi 75,601 – 82,888 MPa dan *modulus young* menjadi 0,915-0,937 GPa tergantung lamanya *holding time* yang dilakukan ketika *solution treatment*. Sedangkan untuk kemampuan penyerapan energi, aluminium *foam* tanpa perlakuan hanya bisa menyerap energi sebesar 11,165 MJ/m³. Namun dengan dilakukannya perlakuan panas *precipitation hardening*, kemampuannya dalam menyerap energi dapat ditingkatkan menjadi 13,979 – 15,282 MJ/m³, tergantung lamanya *holding time* ketika *solution treatment*. Berdasarkan hasil ini maka dapat dikatakan bahwa penelitian ini mampu menghasilkan aluminium *foam* yang memenuhi spesifikasi sifat mekanik untuk aplikasi *filler* pada *crashbox*.

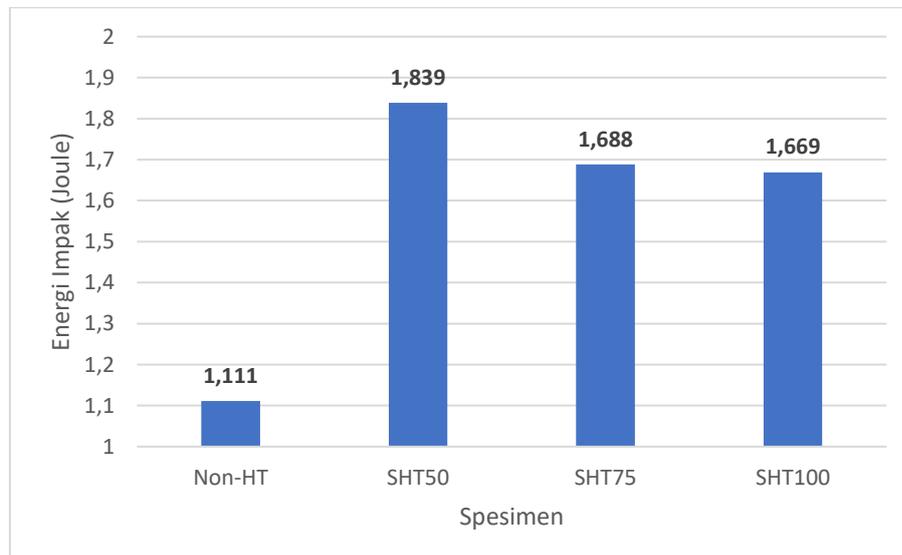
4.8 Hasil dan Pembahasan Pengujian Impak

Dalam pengujian impak digunakan spesimen uji dengan dimensi sesuai standar ASTM E23 yaitu 10 mm x 10 mm x 55 mm. Metode pengujian yang digunakan adalah metode *Charpy*, sehingga pada bagian tengahnya diberi takik dengan kedalaman 2 mm. Bentuk spesimen untuk uji impak dapat dilihat pada Gambar 4.16 di bawah ini.

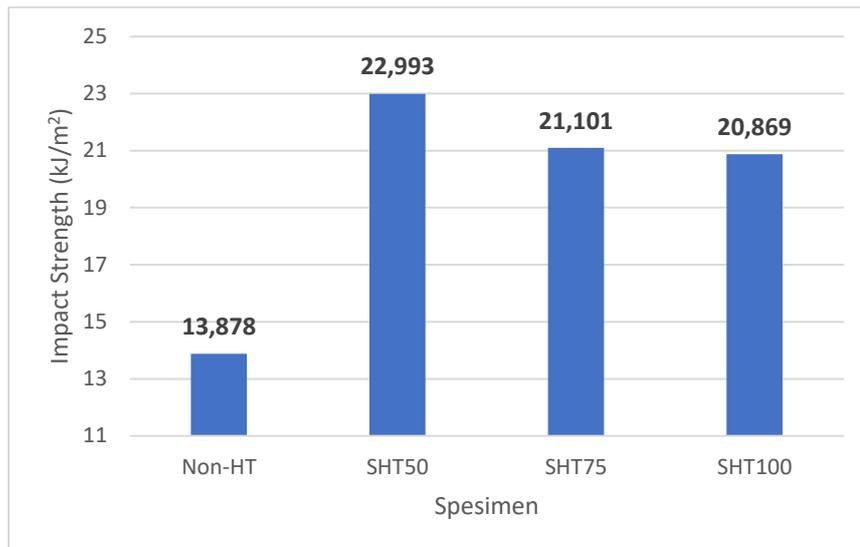


Gambar 4.16 Spesimen uji impak

Dalam pengujian ini, masing-masing spesimen memiliki 3 sampel agar hasil pengujian menjadi lebih valid. Data yang didapat dari pengujian ini berupa sudut awal sebelum impact dan sudut akhir setelah impact, yang selanjutnya digunakan untuk perhitungan energi impact dan kekuatan impact menggunakan Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10. Hasil perhitungan energi impact yang diserap masing-masing spesimen dan hasil perhitungan kekuatan impact masing-masing spesimen disajikan pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 sebagai berikut.



Gambar 4.17 Hasil pengujian impact



Gambar 4.18 Hasil perhitungan *impact strength*

Dari Gambar 4.17 dan 4.18 di atas didapatkan bahwa besarnya energi impak yang dapat diserap oleh spesimen tanpa perlakuan adalah 1,111 Joule dan memiliki kekuatan impak sebesar 13,878 kJ/m². Spesimen SHT50 dapat menyerap energi impak sebesar 1,839 Joule dan memiliki kekuatan impak sebesar 22,993 kJ/m². Bila dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan, spesimen SHT50 dapat menyerap energi impak 65,527% lebih banyak dan kekuatan impak meningkat sebanyak 65,679%. Spesimen SHT75 dapat menyerap energi impak sebesar 1,688 Joule dan memiliki kekuatan impak sebesar 21,101 kJ/m². Spesimen SHT75 dapat menyerap energi impak 51,935% lebih banyak dari spesimen tanpa perlakuan dan kekuatan impak meningkat sebanyak 52,046%. Sedangkan spesimen SHT100 dapat menyerap energi impak sebesar 1,669 Joule atau 50,225% lebih banyak dari spesimen tanpa perlakuan dan memiliki kekuatan impak sebesar 20,869 kJ/m² yang mengalami peningkatan sebanyak 50,375% dari spesimen tanpa perlakuan.

Gambar 4.17 di atas menunjukkan bahwa spesimen SHT50 memiliki kekuatan impak paling tinggi. Besarnya kekuatan impak menunjukkan penurunan seiring dengan bertambah lamanya *holding time* yang dilakukan. Semakin lama *holding time* pada *solution treatment* dapat mengurangi tegangan internal di dalam α -aluminium dan mengakibatkan *lattice constant* yang semakin kecil dan ukuran kristalnya semakin besar. Akibat dari tegangan internal yang semakin berkurang menjadikan kekuatannya juga semakin menurun. Semakin menurunnya nilai kekuatan berdampak pada semakin menurunnya kekuatan impak. Sehingga dari penelitian ini dapat dikatakan bahwa besarnya kekuatan impak berbanding lurus dengan besarnya kekuatan. Penelitian sebelumnya juga menemukan bahwa semakin tinggi nilai kekuatan yang dimiliki aluminium, semakin tinggi juga nilai kekuatan impaknya (Abubakre et al., 2009).

4.9 Karakteristik Fisik dan Karakteristik Mekanik Paduan Al-Mg-Si *Foam* Hasil Perlakuan Panas

Pembuatan aluminium *foam* berbahan dasar paduan Al-Mg-Si dengan metode *permanent mold gravity die casting* dengan menggunakan NaCl sebagai *space holder* telah berhasil dilakukan dalam penelitian ini. Aluminium *foam* yang dihasilkan memiliki densitas dengan rentang 1,014 – 1,237 gr/cm³ dengan nilai densitas rata-rata adalah 1,138 gr/cm³. Nilai densitas ini lebih rendah dari densitas aluminium *bulk* karena adanya porositas dalam aluminium *foam*. Porositas yang dimiliki oleh aluminium *foam* yang dihasilkan dari penelitian ini yaitu 54,191 – 62,431% dengan rata-rata sebesar 57,816%. Aluminium *foam* ini memiliki

rata-rata diameter terpanjang pori dengan rentang 3,595 – 4,241 mm. Diameter terpanjang pori ini tidak berbeda jauh dengan ukuran *space holder* yang digunakan, yang mana dalam penelitian ini adalah NaCl dengan ukuran maksimal *mesh* 4 dan minimal *mesh* 7 atau setara dengan 2,83 – 4,75 mm. dalam penelitian ini juga dihasilkan aluminium *foam* dengan tipe *open-cell* karena memiliki pori yang saling terhubung (*interconnected*).

Hasil uji SEM menunjukkan struktur mikro aluminium *foam* yang tidak diberi perlakuan panas menunjukkan adanya bintik-bintik hitam kecil yang tersebar pada matriks α -aluminium. Dipadukan dengan hasil pengujian EDX menunjukkan bahwa bintik-bintik tersebut terdiri dari unsur Mg sebesar 1,75 wt% dan Si sebesar 0,16 wt%. Dikarenakan kadar Si yang rendah maka kecil kemungkinan untuk membentuk Mg_2Si . Hal ini diperkuat oleh hasil pengujian XRD yang tidak mendeteksi adanya Mg_2Si . Dengan menggunakan data hasil pengujian XRD, didapatkan *lattice constant* dan ukuran kristal α -aluminium pada aluminium *foam* tanpa perlakuan panas yaitu 4,043 Å dan 41,235 nm. Nilai *lattice constant* merupakan yang terkecil dan ukuran kristalinitasnya merupakan yang terbesar, menunjukkan bahwa tidak ada *lattice strain* yang besar di dalamnya. Akibat struktur mikronya ini, aluminium *foam* tanpa perlakuan panas memiliki sifat mekanik yang paling rendah dengan kekerasan 59,175 VHN, kekuatan densifikasi sebesar 62,235 MPa, *modulus young* sebesar 0,726 GPa, keuletan 38,882%, absorpsi energi sebesar 11,165 MJ/m³, dan kekuatan impak sebesar 13,878 kJ/m².

Struktur mikro aluminium *foam* yang diberi perlakuan panas *precipitation hardening* dengan *holding time* pada *solution treatment* selama 50 menit (SHT50) menunjukkan hanya terdiri dari bintik-bintik hitam yang berukuran sangat kecil dan tersebar merata pada matriks α -aluminium. Bintik-bintik hitam kecil ini terdiri dari unsur Mg dan Si, dengan kadar Si lebih tinggi yaitu 0,32 wt%. Dengan menggunakan data hasil pengujian XRD, didapatkan *lattice constant* yang lebih besar dan ukuran kristal α -aluminium yang lebih kecil pada aluminium *foam* SHT50 yaitu 4,069 Å dan 30,001 nm, menunjukkan adanya *lattice strain* yang lebih tinggi. *Lattice strain* ini terjadi akibat adanya presipitat. Hasil pengujian XDR juga mendeteksi adanya Mg_2Si pada spesimen ini, sehingga dapat dikatakan bahwa presipitat yang muncul adalah Mg_2Si . Mg dan Si yang terdeteksi pada pengujian EDX membentuk Mg_2Si yaitu sebesar 0,874 wt%. Akibat struktur mikronya, aluminium *foam* SHT50 memiliki kekerasan 88,75 VHN, kekuatan densifikasi sebesar 82,888 MPa, *modulus young* 0,937 GPa, keuletan 41,771%, absorpsi energi sebesar 14,165 MJ/m³, dan kekuatan impak sebesar 22,993 kJ/m².

Struktur mikro aluminium *foam* yang diberi perlakuan panas *precipitation hardening* dengan *holding time* pada *solution treatment* selama 75 menit (SHT75) menunjukkan hal yang sama, yang hanya terdiri dari bintik-bintik hitam yang berukuran sangat kecil dan tersebar merata pada matriks α -aluminium. Bintik-bintik hitam kecil ini terdiri dari unsur Mg dan Si, dengan kadar Si lebih tinggi lagi yaitu 0,53 wt%. Dengan menggunakan data hasil pengujian XRD, didapatkan *lattice constant* yang lebih kecil dan ukuran kristal α -aluminium yang lebih besar yaitu 4,062 Å dan 32,321 nm, menunjukkan *lattice strain* berkurang. Hasil pengujian XRD juga mendeteksi adanya Mg_2Si pada aluminium *foam* SHT75. Mg dan Si yang terdeteksi pada pengujian EDX membentuk Mg_2Si yaitu sebesar 1,447 wt%. Akibat struktur mikronya, aluminium *foam* SHT75 memiliki kekerasan yang menurun sebesar 85,875 VHN, kekuatan densifikasi sebesar 75,601 MPa, *modulus young* 0,921 GPa, keuletan 45,376%, absorpsi energi sebesar 13,979 MJ/m³, dan kekuatan impak sebesar 21,101 kJ/m².

Struktur mikro aluminium *foam* yang diberi perlakuan panas *precipitation hardening* dengan *holding time* pada *solution treatment* selama 100 menit (SHT100) juga menunjukkan hal yang sama, yang hanya terdiri dari bintik-bintik hitam yang berukuran sangat kecil dan tersebar merata pada matriks α -aluminium. Bintik-bintik hitam kecil ini terdiri dari unsur Mg dan Si, dengan kadar Si lebih sedikit menurun yaitu 0,42 wt%. Dengan menggunakan data

hasil pengujian XRD, didapatkan *lattice constant* yang lebih kecil lagi dan ukuran kristal α -aluminium yang lebih besar lagi yaitu 4,048 Å dan 35,897 nm, menunjukkan *lattice strain* semakin berkurang. Hasil pengujian XRD juga mendeteksi adanya Mg₂Si pada aluminium foam SHT100. Mg dan Si yang terdeteksi pada pengujian EDX membentuk Mg₂Si yaitu sebesar 1,447 wt%. Akibat struktur mikronya, aluminium foam SHT100 memiliki kekerasan 82,475 VHN, kekuatan densifikasi sebesar 78,735 MPa, *modulus young* 0,915 GPa, keuletan 44,225%, absorpsi energi sebesar 15,282 MJ/m³, dan kekuatan impak sebesar 20,869 kJ/m².

Penelitian ini berfokus untuk meningkatkan sifat mekanik dari aluminium foam agar dapat memenuhi kriteria aluminium komersial dan dapat diaplikasikan sebagai *filler* dalam *crashbox* pada mobil. Kriteria tersebut antara lain yaitu rentang densitas 0,3 – 1,0 gr/cm³ dengan porositas sebesar 70 – 90%, kekuatan densifikasi mencapai 20 MPa, *modulus young* minimal 0,4 GPa, keuletan 40-80%, dan kemampuan absorpsi energi mencapai 12 MJ/m³. Penelitian ini belum mampu menghasilkan aluminium foam dengan densitas serendah kriteria, dan porositasnya tidak setinggi kriteria. Namun dari segi kekuatan, *modulus young*, keuletan, dan absorpsi energi, aluminium foam hasil penelitian ini memiliki nilai yang memenuhi. Aluminium foam yang diberi perlakuan panas berupa *precipitation hardening* dengan *holding time* selama 100 menit saat *solution treatment* menghasilkan kombinasi kekerasan, kekuatan densifikasi, keuletan, dan kekuatan impak yang bagus sehingga memiliki kemampuan absorpsi energi tertinggi dan berpotensi untuk diaplikasikan sebagai *filler* dalam *crashbox* pada mobil. Lebih ringkasnya pada tabel 4.3 berikut ini disajikan sifat mekanik yang dihasilkan aluminium foam dalam penelitian ini dibandingkan dengan standar.

Tabel 4.3 Perbandingan sifat mekanik aluminium foam dengan standar

Parameter	Standar	SHT50	SHT75	SHT100	Keterangan
Densification stress (MPa)	20	82,888	75,601	78,735	Ketiga perlakuan memenuhi
Modulus young (GPa)	Min 0,4	0,938	0,921	0,915	Ketiga perlakuanr memenuhi
Keuletan (%)	Min 40	41,771	45,376	44,225	Ketiga perlakuan memenuhi, namun SHT50 hanya sedikit di atasnya.
Absorpsi energi (MJ/m ³)	14	14,165	13,979	15,282	SHT50 hanya sedikit di atasnya, SHT75 tidak memenuhi, dan SHT100 memenuhi

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari analisis data dan pembahasan terhadap penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Aluminium *foam* yang diberi perlakuan panas *precipitation hardening* dengan variasi *holding time* saat *solution treatment* selama 50 menit, 75 menit, dan 100 menit, pada ketiganya terjadi peningkatan *lattice constant* α -aluminium bila dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan yang mengindikasikan adanya *lattice strain*. *Lattice strain* ini diakibatkan oleh keberadaan presipitat. Pada ketiga spesimen ini juga terdeteksi *peak* Mg_2Si , yang artinya presipitat yang terbentuk adalah Mg_2Si . Semakin lama *holding time*, *lattice constant* dari α -aluminium semakin kecil sedangkan ukuran kristalitnya semakin besar, menunjukkan bahwa *lattice strain* semakin berkurang. FWHM terbesar, *lattice constant* terbesar, dan ukuran kristalit terkecil dimiliki oleh spesimen SHT50 secara berturut-turut yaitu $0,2802^\circ$, $4,069 \text{ \AA}$, dan $30,001 \text{ nm}$. Struktur mikro dari ketiga variasi memperlihatkan adanya bintik-bintik hitam yang berukuran sangat kecil dan tersebar merata pada matriks α -aluminium yang mengandung unsur paduan Mg dan Si. Kadar Si naik seiring bertambahnya *holding time*. Bila diasumsikan semua Si membentuk Mg_2Si , maka kadar Mg_2Si juga naik seiring bertambahnya durasi *holding time*.
2. Perbedaan *holding time* berpengaruh pada sifat mekanik aluminium *foam*. Semakin lama *holding time* mengakibatkan nilai kekerasan, kekuatan densifikasi, *modulus young*, dan kekuatan impak menurun sedangkan keuletan meningkat. Sedangkan untuk sifat penyerapan energi semakin naik seiring bertambahnya *holding time*. *Holding time* selama 100 menit merupakan waktu yang optimal karena dapat menghasilkan kemampuan absorpsi energi yang tertinggi yaitu $15,282 \text{ MJ/m}^3$ dengan kombinasi yang bagus antara kekuatan sebesar $78,735 \text{ MPa}$ dan keuletan $44,225\%$ serta *modulus young* $0,915 \text{ GPa}$.

5.2 Saran

Berikut merupakan saran untuk pelaksanaan penelitian selanjutnya dengan topik yang berhubungan dengan penelitian ini agar berjalan lebih baik.

1. Menggunakan *resistance furnace* agar dapat dengan mudah mengontrol temperatur.
2. Sebaiknya menggunakan cetakan berukuran besar.
3. Pemberian tekanan eksternal dapat membantu lelehan aluminium dalam mengisi sela-sela NaCl.
4. *Preheat* cetakan dan NaCl dapat dilakukan dengan *furnace*.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153(May), 106795. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795>
- Abubakre, O. K., Mamaki, U. P., & Muriana, R. A. (2009). Investigation of the Quenching Properties of Selected Media on 6061 Aluminum Alloy. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 08(04), 303–315. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2009.84027>
- Ahamed, H., & Kumar, V. S. (2011). A Comparative Study on the Milling Speed for the Synthesis of Nano-Structured Al 6063 Alloy Powder by Mechanical Alloying. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10(06), 507–515. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.106038>
- Ambriz, R. R., & Jaramillo, D. (2014). Mechanical Behavior of Precipitation Hardened Aluminum Alloys Welds. *Intech*, 2(2), 35–59. <http://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunications-technologies/gps-total-electron-content-ecp-prediction-at-ionosphere-layer-over-the-equatorial-region%0AInTec>
- Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & H.N.G., W. (2000). *Metal Foams : a Design Guide*. Butterworth-Heinemann.
- ASM. (1991). Heat Treating of Aluminum Alloys. *ASM International*, 4. <https://doi.org/10.1361/asmhba000>
- ASM. (2001). ASM Handbook Vo. 21. *The Materials Information Company*, 21, 3470. <http://books.google.com.hk/books?id=eC-Zt1J4oCgC>
- Avner, S. H. (1974). Introduction to Physical Metallurgy. In *McGraw Hill Book Company*.
- Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46(6), 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
- Banhart, John. (2005). Aluminium foams for lighter vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 37(2–3), 114–125. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2005.006640>
- Boljanovic, V. (2009). *Metal shaping processes: casting and molding, particulate processing, deformation processes, and metal removal*. Industrial Press, Inc. http://books.google.com/books?id=bX5_9tUbi6EC&pgis=1
- Budiarto, Susilo, & Sanjaya, U. (2021). The effect of artificial age time on crystal size, dislocation density, hardness and micro structure on Al 6061 materials alloy. *AIP Conference Proceedings*, 2342(April). <https://doi.org/10.1063/5.0045373>
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering - An Introduction 10th Edition*.
- 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>
- Casas, B. Y., Carranza, J. C., Béjar, L., Aguilar, C., Figueroa, I. A., & Alfonso, I. (2020). Production of aluminum foams with hierarchical porosity by a combination of two different manufacturing methods. *Journal of Alloys and Compounds*, 831. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154780>
- Celik, S. (1999). COMPARISON OF PROPERTIES OF FRICTION AND DIFFUSION WELDED JOINTS. *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, August.
- 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>

- Christy, T. V., Murugan, N., & Kumar, S. (2010). A Comparative Study on the Microstructures and Mechanical Properties of Al 6061 Alloy and the MMC Al 6061/TiB₂. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 09(01), 57–65. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2010.91005>
- Constantin, B. A., Iozsa, D., & Fratila, G. (2016). Studies about the Behavior of the Crash Boxes of a Car Body. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 160(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012010>
- 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>
- Ding, L., Jia, Z., Zhang, Z., Sanders, R. E., Liu, Q., & Yang, G. (2015). The natural aging and precipitation hardening behaviour of Al-Mg-Si-Cu alloys with different Mg/Si ratios and Cu additions. *Materials Science and Engineering A*, 627, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.086>
- Donovan, R., Fortune, R., & Trout, R. (2015). *Elevated Temperature Effects on the Mechanical Properties of Age Hardened 6xxx Series Aluminum Alloy Extrusions*. June.
- Fuganti, A., Lorenzi, L., Grønsund, A., & Langseth, M. (2000). Aluminium foam for automotive applications. *Advanced Engineering Materials*, 2(4), 200–204. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1527-2648\(200004\)2:4<200::aid-adem200>3.3.co;2-u](https://doi.org/10.1002/(sici)1527-2648(200004)2:4<200::aid-adem200>3.3.co;2-u)
- Genculu, S. (2000). Aluminum Alloys and Heat Treatment. *CAB Incorporate*.
- Haidar, S., & Sekh, M. (2018). Effects of Production Parameters on Density and Tensile Properties of Aluminium MMC Foam. *International Journal of Management, Technology and Engineering, March*.
- Han, M. S., Min, B. S., & Cho, J. U. (2014). FRACTURE PROPERTIES OF ALUMINUM FOAM CRASH BOX. *International Journal of Automotive Technology*, 15(6), 945–951. <https://doi.org/10.1007/s12239>
- Hassan, W. A., Ameen, H. A., & Alsabti, H. A. (2020). Forming of Aluminum Foam Sandwich Panels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 881(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012053>
- ISO. (2011). INTERNATIONAL STANDARD Mechanical testing of metals — Ductility testing — Compression test for porous and cellular metals iTeh STANDARD PREVIEW iTeh STANDARD PREVIEW. *ISO, 2011*.
- Jamaludin, S. B., Abdullah, M. H., Mazlee, M. N., & Hussin, K. (2015). Effect of solution treatment temperature on tensile strength of Al-Mg-Si alloy. *Materials Science Forum*, 819, 39–44. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.819.39>
- Jang, W. Y., Hsieh, W. Y., Miao, C. C., & Yen, Y. C. (2015). Microstructure and mechanical properties of ALPORAS closed-cell aluminium foam. *Materials Characterization*, 107, 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.07.012>
- Jeong, G., Park, J., Nam, S., Shin, S. E., Shin, J., Bae, D., & Choi, H. (2015). The effect of grain size on the mechanical properties of aluminum. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(2), 1287–1291. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0115>
- Jin, B. R., Ha, D. W., & Jeong, C. Y. (2019). Effect of solution treatment on the hardness and tensile properties of AlMgSi alloys for automotive chassis. *Materials Transactions*, 60(5), 815–823. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018368>
- 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>

- Kennedy, A. (2012). Porous Metals and Metal Foams Made from Powders. *Powder Metallurgy*. <https://doi.org/10.5772/33060>
- Kevorkijan*, V. (2010). LOW COST ALUMINIUM FOAMS MADE BY CaCO₃ PARTICULATES. *Association of Metallurgical Engineers of Serbia AMES*.
- Khan, K. L. A., Kumar, G., & Prasad R. (2018). Effect of Age Hardening and Quenching Media on Aluminium Foams. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(6), 245–248.
- Koppula, S., Kaviti, A. K., & Namala, K. K. (2018). Experimental Investigation of Fibre Reinforced Composite Materials under Impact Load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 330(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012047>
- Kushwaha, A. K., Maccione, R., John, M., Lanka, S., Misra, M., & Menezes, P. L. (2022). Influence of Cryomilling on Crystallite Size of Aluminum Powder and Spark Plasma Sintered Component. *Nanomaterials*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/nano12030551>
- Lee, S. H., Saito, Y., Sakai, T., & Utsunomiya, H. (2002). Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding. *Materials Science and Engineering A*, 325(1–2), 228–235. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01416-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01416-2)
- 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, & Banhart, J. (2003). Properties of heat-treated aluminium foams. *Materials Science and Engineering A*, 349(1–2), 98–110. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00582-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00582-8)
- Leon, J. S., & Jayakumar, V. (2015). Investigation of Mechanical Properties of Aluminium 6061 Alloy Friction Stir Welding. *International Journal of Students' Research in Technology & Management*, 2(4), 140–144.
- Mahmutyazicioglu, N., Albayrak, O., Ipekoglu, M., & Altintas, S. (2013). Effects of alumina (Al₂O₃) addition on the cell structure and mechanical properties of 6061 foams. *Journal of Materials Research*, 28(17), 2509–2519. <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.187>
- Nova, I., Fraña, K., Solfronk, P., & Korecek, D. (2021). Monitoring the Influence of Sodium Chloride Particle Size on the Physical. *Manufacturing Technology*, 21(1), 109–116. <https://doi.org/10.21062/mft.2021.017>
- Ozer, G., Güler, K. A., & Taslicukur, Z. (2010). Cellular aluminium foam metal production with space holder particles. *Materialpruefung/Materials Testing*, 52(6), 379–382. <https://doi.org/10.3139/120.110140>
- Patricio, A., Carlos, D., & Oscar, S. (2017). SYNTHESIS OF OPEN CELL ALUMINIUM FOAMS. *International Journal of Advanced Engineering and Management Research*, 2(May).
- Renreng, I., Djamaluddin, F., & Furqani, F. (2020). Energy Absorption Analysis of aluminum Filled Foam Tube under Axial Load using Finite Element Method with Cross Section Variations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 875(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/875/1/012060>
- 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>
- 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. *Key Engineering Materials*, 706, 23–28. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.706.23>

-
- Tan, C. F., & Said, M. R. (2009). Effect of hardness test on precipitation hardening aluminium alloy 6061-t6. *Chiang Mai Journal of Science*, 36(3), 276–286.
- Wan, T., Liu, Y., Zhou, C., Chen, X., & Li, Y. (2021). Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: A review. *Journal of Materials Science and Technology*, 62, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.039>
- Westphal, G., & Et, A. (2012). Sodium chloride. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. <https://doi.org/10.2165/00128415-201013290-00109>
- Widyastuti, Ardhyanta, H., Hariyati, P., & Quluq, R. M. (2019). Karakterisasi Material. *ITS Press, Surabaya*.
- Z. Hussain and N. S. A. Suffin. (2011). Microstructure and Mechanical Behaviour of Aluminium Foam Produced by Sintering Dissolution Process Using NaCl Space Holder. *Journal of Engineering Science*, 7, 37–49.
- Zhu, X., Yang, H., Dong, X., & Ji, S. (2019). The effects of varying Mg and Si levels on the microstructural inhomogeneity and eutectic Mg₂Si morphology in die-cast Al–Mg–Si alloys. *Journal of Materials Science*, 54(7), 5773–5787. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03198-6>

LAMPIRAN

Lampiran 1

Proses Pembuatan Aluminium Foam

Dalam proses pembuatan aluminium *foam* diperlukan waktu kurang lebih 2 bulan. Diperlukan banyak percobaan untuk menghasilkan aluminium *foam* yang bagus. Gambar 1 di bawah ini menyajikan beberapa produk hasil cor yang tidak berhasil.



Gambar 1 Hasil cor yang tidak berhasil (dokumentasi pribadi)

Pada awalnya pembuatan aluminium *foam* dilakukan peleburan paduan di dalam *crucible* di dalam *burner*, serta NaCl yang diletakkan dalam cetakan grafit berukuran 4 cm x 3 cm x 10,5 cm dipanaskan di atas *burner*. Namun kristal-kristal NaCl tersebut meletup dan lama-kelamaan menjadi serbuk, dan ketika dituangi aluminium cair menghasilkan benda cor seperti gambar di atas. Pada percobaan berikutnya dilakukan penyangraian pada kristal NaCl di dalam cetakan. Hal ini berhasil mencegah NaCl hancur menjadi serbuk namun ketika logam cair dituangkan, pori yang terbentuk tidak homogen, terbentuk *foam* yang rapuh. Produk cor yang dihasilkan memiliki dinding *foam* yang sangat tipis dan tidak saling tersambung sehingga *foam* tersebut rapuh dan mudah dihancurkan bahkan dengan tenaga manusia. Selain itu, lelehan aluminium yang dituangkan juga tidak dapat meresap dengan mudah ke dalam sela-sela butir NaCl dan menggenang di bagian atas, ditunjukkan oleh Gambar 1 sebelah kiri. Pemanasan NaCl dengan *heat treatment furnace* pun tidak dapat menyelesaikan masalah ini. Penyebab terjadinya kendala tersebut adalah karena NaCl yang digunakan tidak tahan terhadap temperatur tinggi. Ketika temperatur pemanasan mencapai sekitar 400 °C, kristal NaCl yang awalnya baik-baik saja menjadi tidak stabil dan menimbulkan letupan kecil hingga pada akhirnya menjadi serbuk. Hal ini tentu tidak memenuhi metodologi karena penelitian ini menggunakan NaCl yang berbentuk kristal. Untuk mengatasi kendala tersebut maka dilakukan penggantian jenis NaCl yang digunakan. NaCl yang awalnya adalah garam laut diganti dengan garam jenis Himalaya yang dapat bertahan hingga temperatur pemanasan 750 °C.

Permasalahan kedua yang datang yaitu persebaran butir NaCl yang tidak merata. Lelehan aluminium tidak dapat secara maksimal meresap ke dalam sela-sela butir NaCl. Selain itu, NaCl yang dipanaskan menjadi lebih kaku dan saling menempel satu sama lain, seperti yang ditunjukkan Gambar 1 sebelah kanan. Bantuan pengadukan sebenarnya dapat dilakukan, namun karena ukuran cetakan yang kecil membuat aluminium cair cepat solidifikasi. Akibatnya, aluminium yang terbentuk masih memiliki pori yang tidak homogen.

Untuk mengatasinya maka cetakan yang digunakan diganti dengan cetakan yang lebih besar dengan menggunakan *crucible* dan dilakukan sedikit pengadukan dengan tujuan agar butir-butir NaCl tidak saling melekat sehingga lebih mudah tersebar serta untuk membantu lelehan aluminium meresap ke dalam sela-sela NaCl. Dengan menerapkan beberapa solusi tersebut sehingga diperoleh specimen yang baik seperti pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2 Spesimen aluminium *foam* yang berhasil (dokumentasi pribadi)

Dari Gambar 2 di atas, dapat diamati bahwa *foam* yang terbentuk tersebar secara merata. Hal ini disebabkan karena butir-butir NaCl berhasil tersebar secara merata di dalam lelehan aluminium. Dinding antar *foam* juga terbentuk dengan baik sehingga tidak lagi rapuh seperti sebelumnya.

Lampiran 2

Perhitungan Rasio NaCl dengan Aluminium

Banyaknya NaCl yang digunakan untuk membuat aluminium *foam* dalam penelitian ini adalah 60%, sehingga perbandingan banyaknya NaCl dengan aluminium yaitu 60:40. Perhitungan banyaknya NaCl dan aluminium yang diperlukan dilakukan dengan menggunakan Persamaan 1 berikut ini.

$$\text{Massa NaCl} = \frac{60}{40} \times \frac{\text{densitas NaCl}}{\text{densitas Aluminium}} \times \text{massa Aluminium} \quad (1)$$

Lampiran 3
Komposisi Bahan

a. Komposisi paduan Al-Mg-Si hasil uji OES

 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

b. Dokumen komposisi paduan Al-Mg-Si dari Sutindo Surya Sejahtera

Element Concentration

Sample No.: **OV. 14108 CETAK 2** Sample ID: **BILLET 6061**

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %
1	0.488	0.291	0.216	0.0309	0.884	0.0850	0.0327	0.0409
2	0.498	0.296	0.222	0.0313	0.885	0.0851	0.0329	0.0395
3	0.496	0.290	0.221	0.0309	0.890	0.0854	0.0328	0.0439

	Na %	Ca %	Ni %	Pb %	P %	Sn %	Sb %	Sr %
1	0.0033	0.00092	0.0051	0.0037	< 0.00050	< 0.00050	< 0.00040	0.00022
2	0.0033	0.00094	0.0051	0.0037	< 0.00050	< 0.00050	< 0.00040	0.00022
3	0.0036	0.00094	0.0053	0.0037	< 0.00050	< 0.00050	< 0.00040	0.00022

	Be %	Zr %	Bi %	Cd %	Al %
1	0.00006	0.0046	< 0.00030	0.00016	97.9
2	0.00006	0.0046	< 0.00030	0.00017	97.9
3	0.00006	0.0047	< 0.00030	0.00015	97.9



Element Concentration

Sample No.: **OV. 14108 CETAK 2** Sample ID: **BILLET 6061**

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %
Ø (3)	0.494	0.292	0.220	0.0310	0.886	0.0852	0.0328	0.0414

	Na %	Ca %	Ni %	Pb %	P %	Sn %	Sb %	Sr %
Ø (3)	0.0034	0.00093	0.0052	0.0037	< 0.00050	< 0.00050	< 0.00040	0.00022

	Be %	Zr %	Bi %	Cd %	Al %
Ø (3)	0.00006	0.0046	< 0.00030	0.00016	97.9

- 1 -

c. *Certificate of Analysis (COA) NaCl*

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 (Necf)	Nad calculated on dry basis	%	97.15
03	Calcium (Ca)	By EDTA Titration	%	0.08
04	Magnesium (Mg)	By EDTA Titration	%	0.04
05	Sulphate (SO4)	By Barium Chloride & HCL (Gravimetric)	%	0.86
06	Water Insoluble	By (Gravimetric)	%	0.73
07	Moisture	Moisture by Drying at 140°C for 2 Hour	%	0.10



PAKISTAN INSPECTION CORPORATION

Manager

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

Lampiran 4

Tabel Perhitungan Densitas dan Porositas

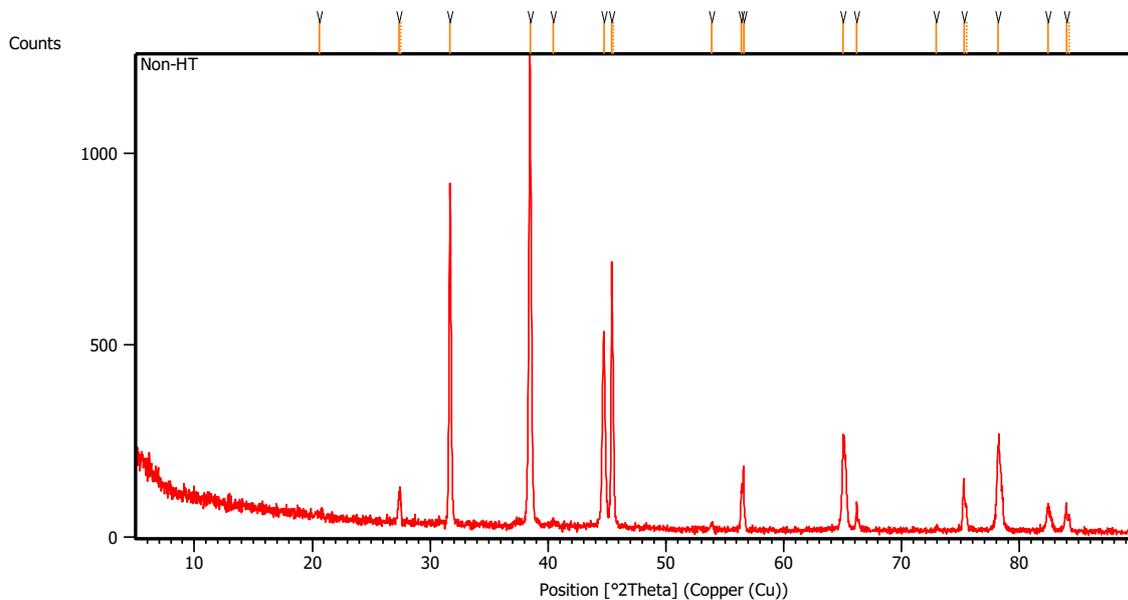
Sampel	Massa (gr)	Volume (mm ³)	Densitas (gr/mm ³)
1	9,07	7,6	1,193421053
2	9,87	7,98	1,236842105
3	8,34	7,98525	1,04442566
4	8,73	7,6	1,148684211
5	9,04	7,605	1,18869165
6	10	8,82	1,133786848
7	9,35	8,4	1,113075483
8	9,42	8	1,1775
9	7,69	7,581	1,01437805

Sampel	Densitas (gr/mm ³)	Densitas Relatif	Porositas (%)
1	1,193421053	0,442007797	55,79922
2	1,236842105	0,458089669	54,191033
3	1,04442566	0,386824318	61,317568
4	1,148684211	0,425438596	57,45614
5	1,18869165	0,440256167	58,007895
6	1,133786848	0,419921055	56,388889
7	1,113075483	0,369488536	57,777889
8	1,1775	0,436111111	62,430443
9	1,01437805	0,375695574	55,974383

Lampiran 5

Data Pengujian XRD

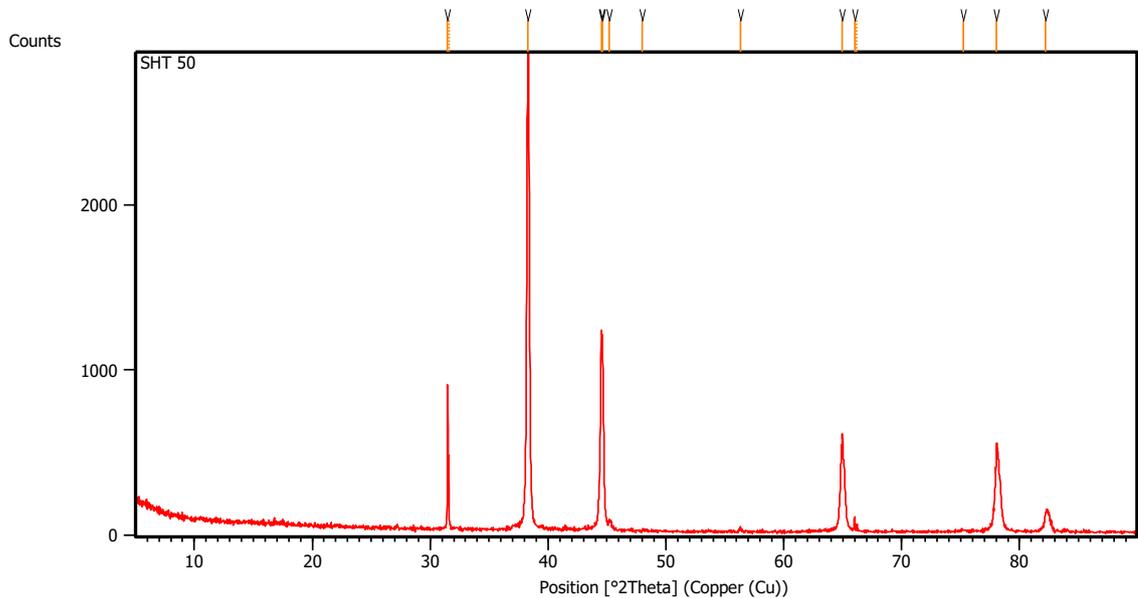
a. Spesimen Non-HT



Peak List

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
20.5707	7.66	0.8029	4.31775	0.64
27.3652	77.54	0.1428	3.25649	6.50
27.4909	66.40	0.1224	3.24993	5.56
31.6826	886.11	0.1428	2.82188	74.24
38.4768	1193.58	0.2040	2.33778	100.00
40.4133	5.84	0.6528	2.23012	0.49
44.7551	501.73	0.2856	2.02333	42.04
45.3897	630.67	0.0816	1.99651	52.84
45.5393	382.44	0.0816	1.99524	32.04
53.8900	16.75	0.3264	1.69993	1.40
56.4015	103.39	0.1224	1.63005	8.66
56.5800	169.23	0.0816	1.62533	14.18
65.0407	227.15	0.3264	1.43285	19.03
66.1805	72.04	0.1020	1.41091	6.04
72.9523	7.95	0.6528	1.29574	0.67
75.2735	136.67	0.1632	1.26143	11.45
75.4849	66.31	0.1224	1.26155	5.56
78.2044	227.47	0.2856	1.22133	19.06
82.4200	66.28	0.2448	1.16921	5.55
83.9626	68.78	0.1224	1.15161	5.76
84.2246	32.50	0.1224	1.15155	2.72

b. Spesimen SHT50

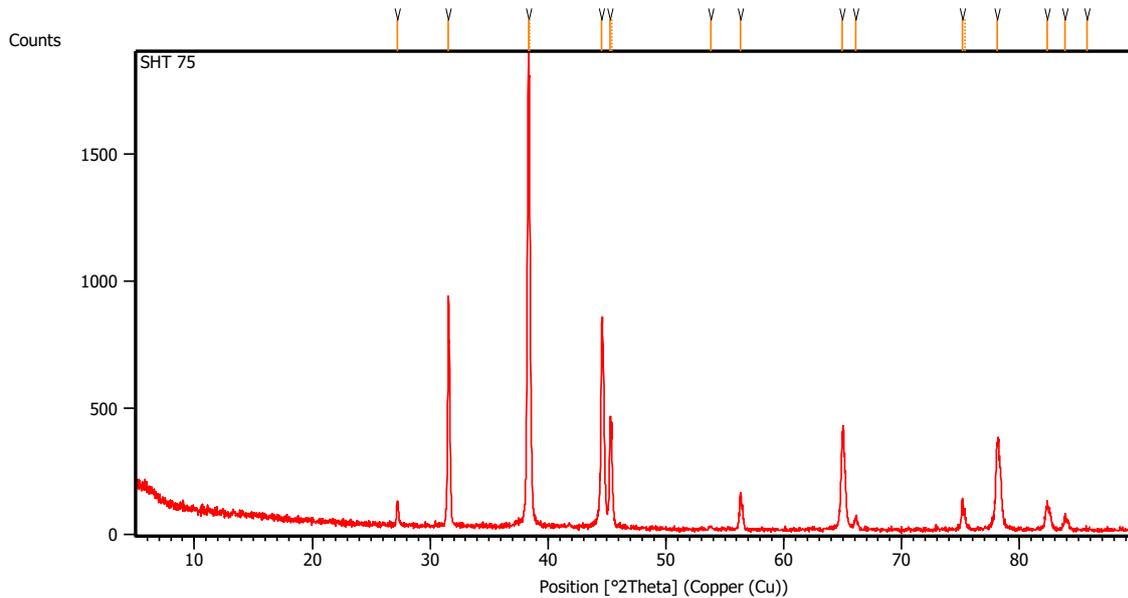


Peak List

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
31.4719	836.46	0.0612	2.84029	32.39
31.5664	416.11	0.0408	2.83904	16.11
38.2604	2582.63	0.2802	2.35051	100.00
44.5258	1199.69	0.1020	2.03322	46.45

44.6287	1067.75	0.1020	2.02877	41.34
45.2067	53.41	0.2856	2.00416	2.07
48.0016	15.57	0.1224	1.89379	0.60
56.2958	18.63	0.2448	1.63286	0.72
64.9315	558.12	0.1020	1.43500	21.61
66.0322	86.53	0.1224	1.41372	3.35
66.1986	40.28	0.1020	1.41407	1.56
75.2374	9.35	0.4896	1.26195	0.36
78.0613	537.40	0.0816	1.22321	20.81
82.2275	115.32	0.2856	1.17146	4.47

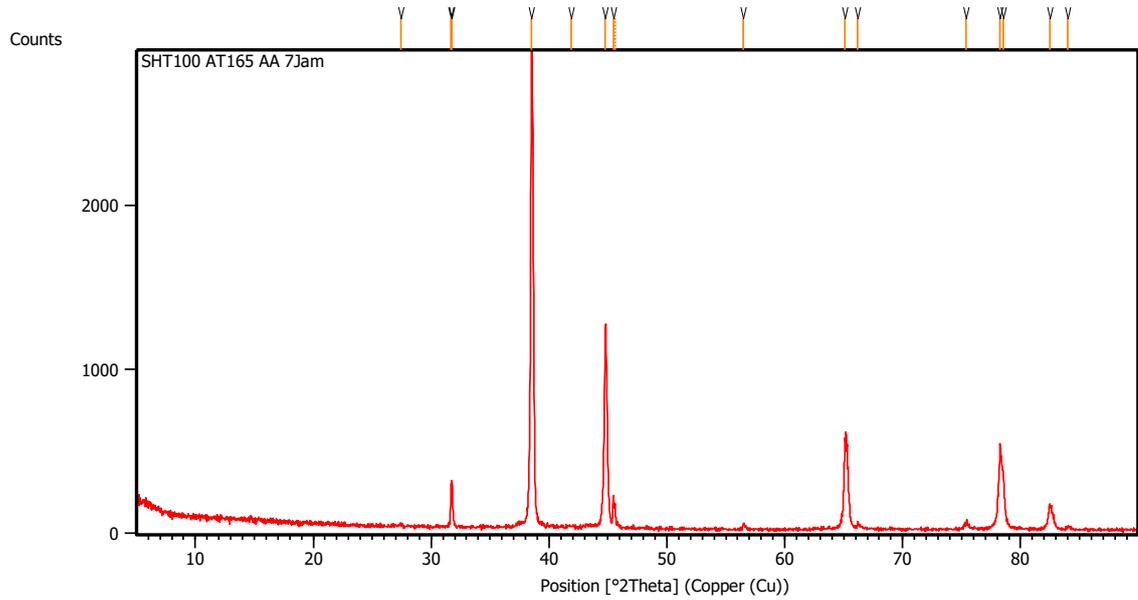
c. Spesimen SHT75



Peak List

Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
27.2080	94.90	0.1171	3.27765	5.08
31.5429	897.55	0.0836	2.83640	48.01
38.3325	1869.43	0.2632	2.34625	100.00
38.4190	1650.64	0.1020	2.34698	88.30
44.5499	751.84	0.1632	2.03218	40.22
45.2527	386.88	0.1224	2.00223	20.70
45.4026	352.94	0.0816	2.00093	18.88
53.8238	13.91	0.3264	1.70187	0.74
56.3152	136.60	0.1632	1.63234	7.31
64.9639	377.13	0.3672	1.43436	20.17
66.1082	51.73	0.2448	1.41228	2.77
75.1244	112.88	0.1224	1.26357	6.04
75.3616	67.16	0.1224	1.26331	3.59
78.0767	326.23	0.1428	1.22301	17.45
82.3068	99.69	0.1632	1.17053	5.33
83.8476	61.18	0.1632	1.15290	3.27
85.7259	1.69	1.1424	1.13238	0.09

d. Spesimen SHT100



Peak List

Pos. [$^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
27.4166	17.65	0.2007	3.25319	0.63
31.6790	232.91	0.0612	2.82219	8.31
31.7688	283.46	0.0669	2.81675	10.11
38.5204	2803.02	0.2342	2.33718	100.00
41.8605	3.71	0.6691	2.15809	0.13
44.7473	1143.41	0.1506	2.02534	40.79
45.4737	196.59	0.0816	1.99302	7.01
45.5910	147.34	0.0612	1.99310	5.26
56.4924	32.45	0.1224	1.62764	1.16
65.1090	538.76	0.1224	1.43151	19.22
66.2010	34.77	0.1224	1.41052	1.24
75.3772	38.83	0.3264	1.25996	1.39
78.2765	519.79	0.1020	1.22038	18.54
78.5266	325.87	0.1224	1.21712	11.63
82.4678	152.54	0.1020	1.16865	5.44
83.9676	11.70	0.3264	1.15156	0.42

Data ICDD Reference Pattern

a. Aluminium

Name and formula

Reference code: 00-002-1109
 PDF index name: Aluminum
 Empirical formula: Al
 Chemical formula: Al

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
 Space group: Fm3m
 Space group number: 225

 a (Å): 4,0143
 b (Å): 4,0143
 c (Å): 4,0143
 Alpha (°): 90,0000
 Beta (°): 90,0000
 Gamma (°): 90,0000

 Measured density (g/cm³): 2,70
 Volume of cell (10⁶ pm³): 64,69
 Z: 4,00

RIR: -

Status, subfiles and quality

Status: Marked as deleted by ICDD
 Subfiles: Inorganic
 Quality: Blank (B)

Comments

Deleted by: Deleted by NBS card.
 Color: White
 General comments: D-values corrected for absorption.
 Melting point: 660
 Temperature: Pattern taken at 25 C.

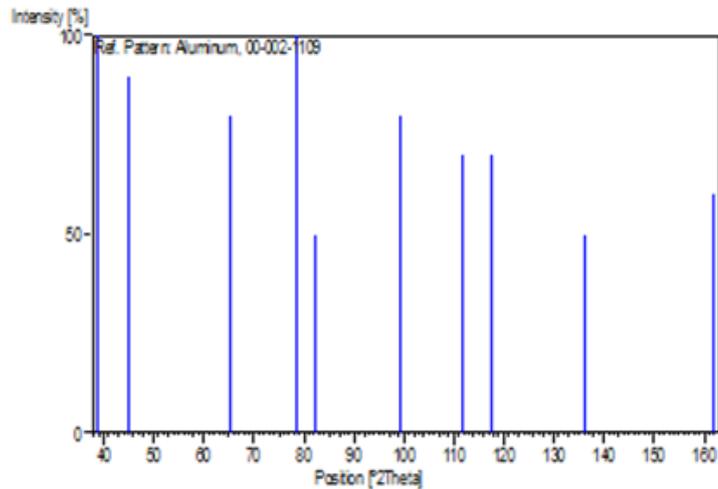
References

Primary reference: Crystallographic Laboratory, Cambridge, England, UK., *Private Communication*
 Unit cell: Wyckoff., *The Structure of Crystals, 2nd ed.*

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	2,33000	38,610	100,0
2	2	0	0	2,02000	44,833	90,0
3	2	2	0	1,43000	65,186	80,0
4	3	1	1	1,22000	78,306	100,0
5	2	2	2	1,17000	82,352	50,0
6	4	0	0	1,01000	99,401	80,0
7	3	3	1	0,93000	111,845	70,0
8	4	2	0	0,90000	117,716	70,0
9				0,83000	136,273	50,0
10				0,78000	161,909	60,0

Stick Pattern



b. Mg₂Si

Name and formula

Reference code: 00-035-0773
 PDF index name: Magnesium Silicide
 Empirical formula: Mg₂Si
 Chemical formula: Mg₂Si

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
 Space group: Fm3m
 Space group number: 225
 a (Å): 6,3512
 b (Å): 6,3512
 c (Å): 6,3512
 Alpha (°): 90,0000
 Beta (°): 90,0000
 Gamma (°): 90,0000
 Volume of cell (10⁶ pm³): 256,19
 Z: 4,00

RIR: -

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
 Alloy, metal or intermetallic
 Common Phase
 NBS pattern
 Quality: Star (S)

Comments

Color: Dark blue
 Sample source: The sample was obtained from CERAC, Incorporated, Milwaukee, Wisconsin, USA. It contained a small amount of MgO.
 Analysis: Spectrographic analysis (wt.%, CERAC, Incorporated): 0.12 Fe; 0.05 Al; 0.01 Mn; 0.001 Ag, Ca, Cr, Cu, Ti.
 Additional pattern: To replace 1-1192 and 34-458.
 Temperature: The mean temperature of data collection was 23.7 C.

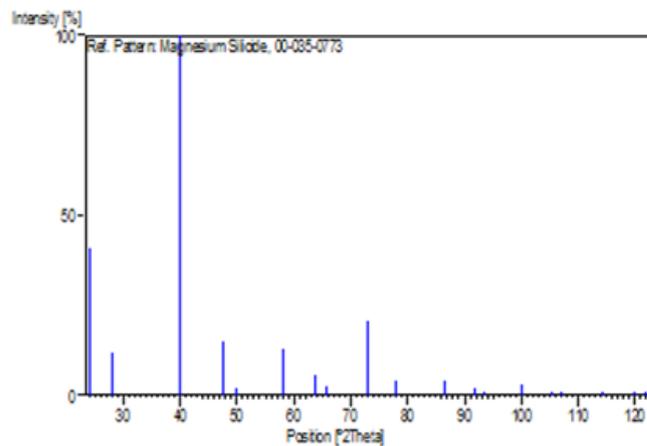
References

Primary reference: *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr.* 25, 21, 86, (1984)
 Structure: Klemm, W., Westling, H., *Z. Anorg. Allg. Chem.*, 245, 365, (1940)
 Polymorphism: Cannon, P., Conlin, C., *Science*, 145, 487, (1964)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	3,66849	24,242	41,0
2	2	0	0	3,17619	28,071	12,0
3	2	2	0	2,24564	40,122	100,0
4	3	1	1	1,91512	47,434	15,0
5	2	2	2	1,83377	49,677	2,0
6	4	0	0	1,58812	58,030	13,0
7	3	3	1	1,45697	63,835	6,0
8	4	2	0	1,42006	65,700	3,0
9	4	2	2	1,29649	72,903	21,0
10	5	1	1	1,22244	78,120	4,0
11	4	4	0	1,12281	86,636	4,0
12	5	3	1	1,07358	91,698	2,0
13	6	0	0	1,05861	93,380	1,0
14	6	2	0	1,00422	100,182	3,0
15	5	3	3	0,96854	105,371	1,0
16	6	2	2	0,95754	107,116	1,0
17	4	4	4	0,91669	114,345	1,0
18	5	5	1	0,88932	120,033	1,0
19	6	4	0	0,88066	122,015	1,0

Stick Pattern



c. NaCl

Name and formula

Reference code: 01-077-2064
 ICSD name: Sodium Chloride
 Empirical formula: ClNa
 Chemical formula: NaCl

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
 Space group: Fm3m
 Space group number: 225

a (Å): 5,6420
 b (Å): 5,6420
 c (Å): 5,6420
 Alpha (°): 90,0000
 Beta (°): 90,0000
 Gamma (°): 90,0000

Calculated density (g/cm³): 2,16
 Volume of cell (10⁶ pm³): 179,60
 Z: 4,00

RIR: 4,71

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
Modelled additional pattern
Quality: Calculated (C)

Comments

ICSD collection code: 060280
Test from ICSD: No R value given.
At least one TF missing.

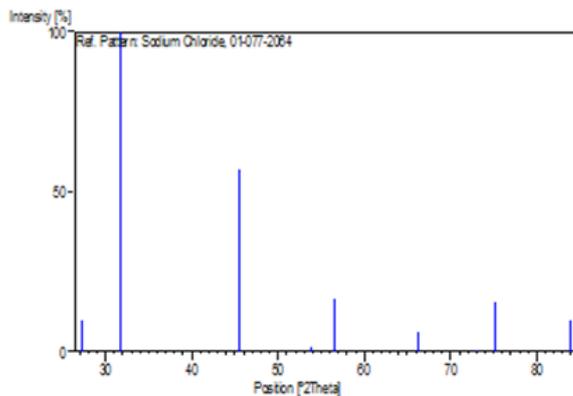
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)*
Structure: *Urusov, V.S., Blinov, V.V., Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Khim., 12, 278, (1970)*

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I [%]
1	1	1	1	3,25741	27,357	9,5
2	2	0	0	2,82100	31,693	100,0
3	2	2	0	1,99475	45,432	57,3
4	3	1	1	1,70113	53,849	1,7
5	2	2	2	1,62871	56,452	16,4
6	4	0	0	1,41050	66,202	6,4
7	3	3	1	1,29436	73,042	0,7
8	4	2	0	1,26159	75,263	15,3
9	4	2	2	1,15167	83,957	10,2

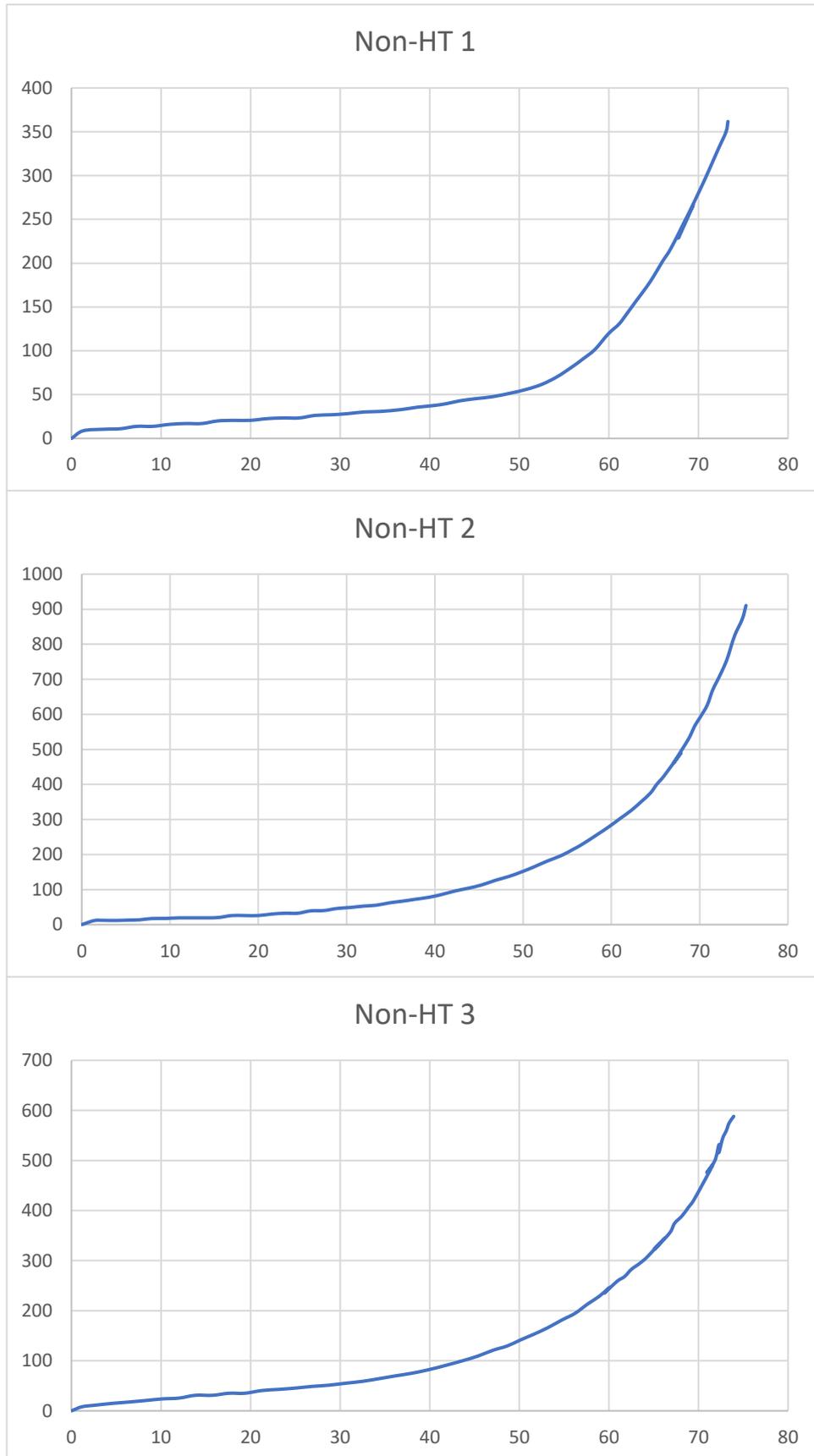
Stick Pattern



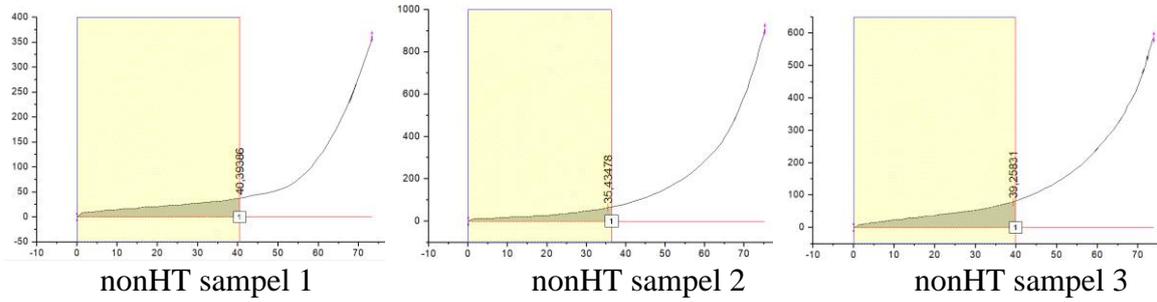
Lampiran 6

Pengolahan Data Pengujian Kompresi

a. Spesimen Non-HT Kurva Stress-Strain

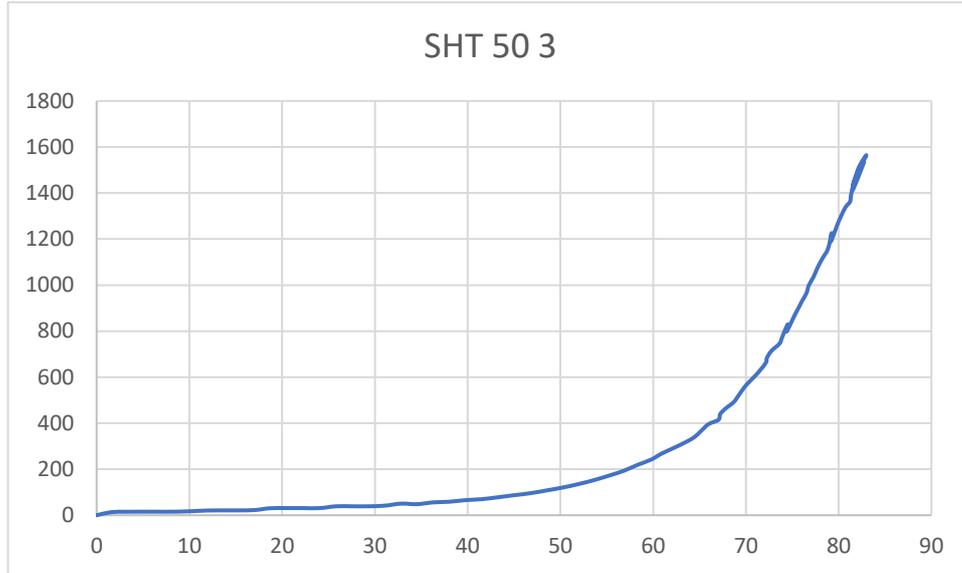


Perhitungan Nilai Ketangguhan dengan *Software Origin*

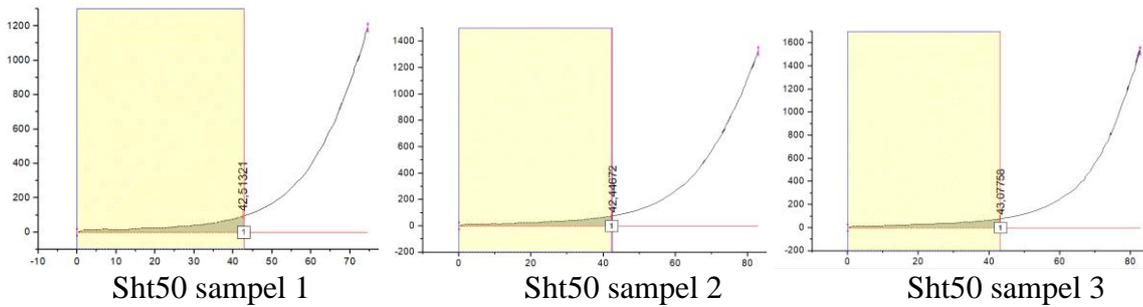


**b. Spesimen SHT50
Kurva Stress-Strain**

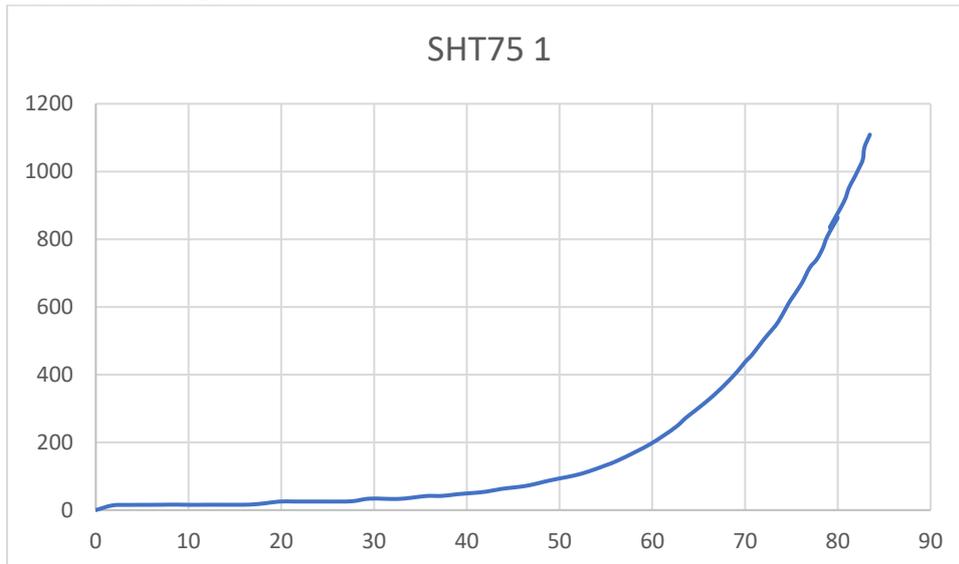


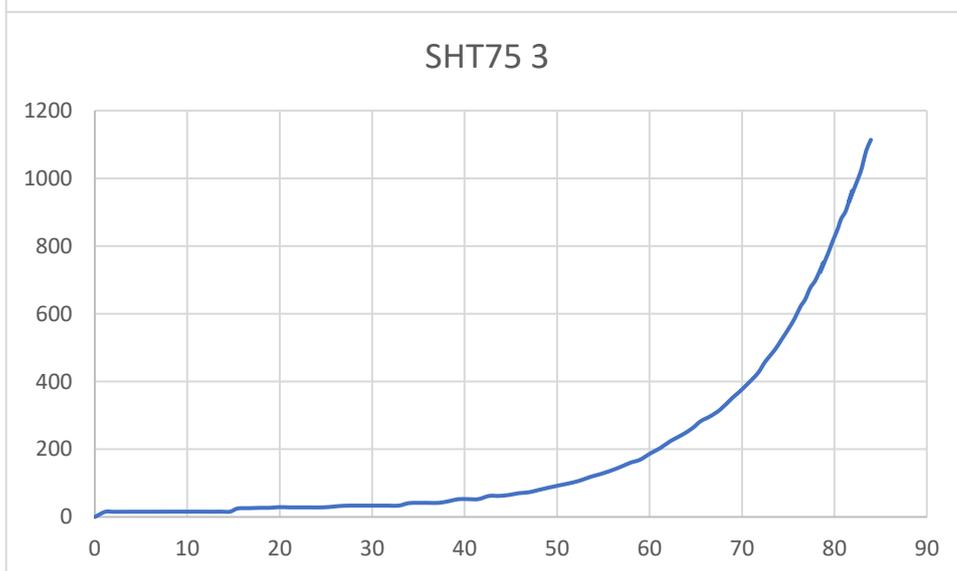
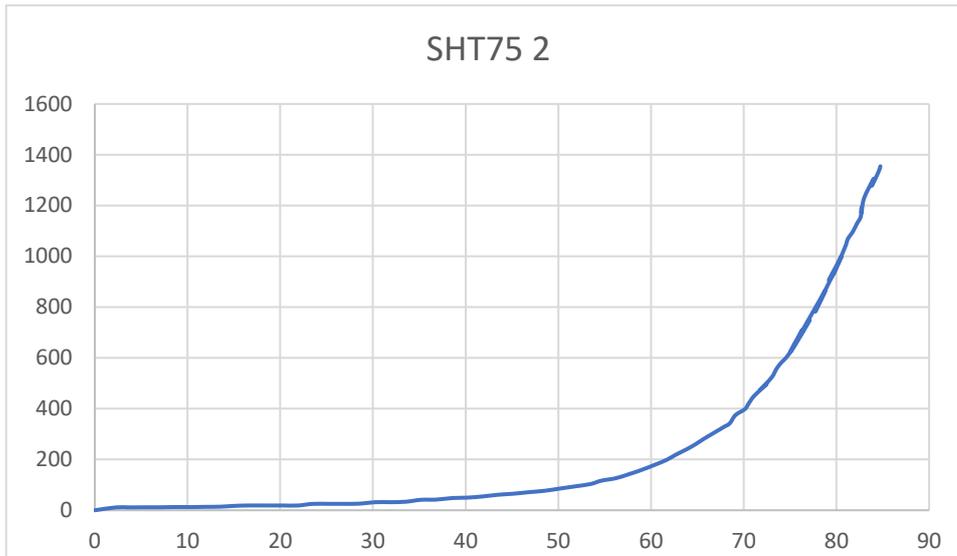


Perhitungan Nilai Ketangguhan dengan *Software Origin*

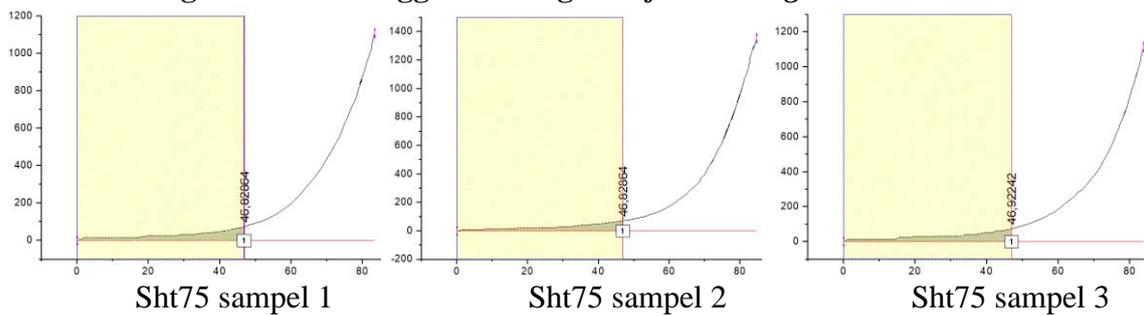


**c. Spesimen SHT75
Kurva Stress-Strain**

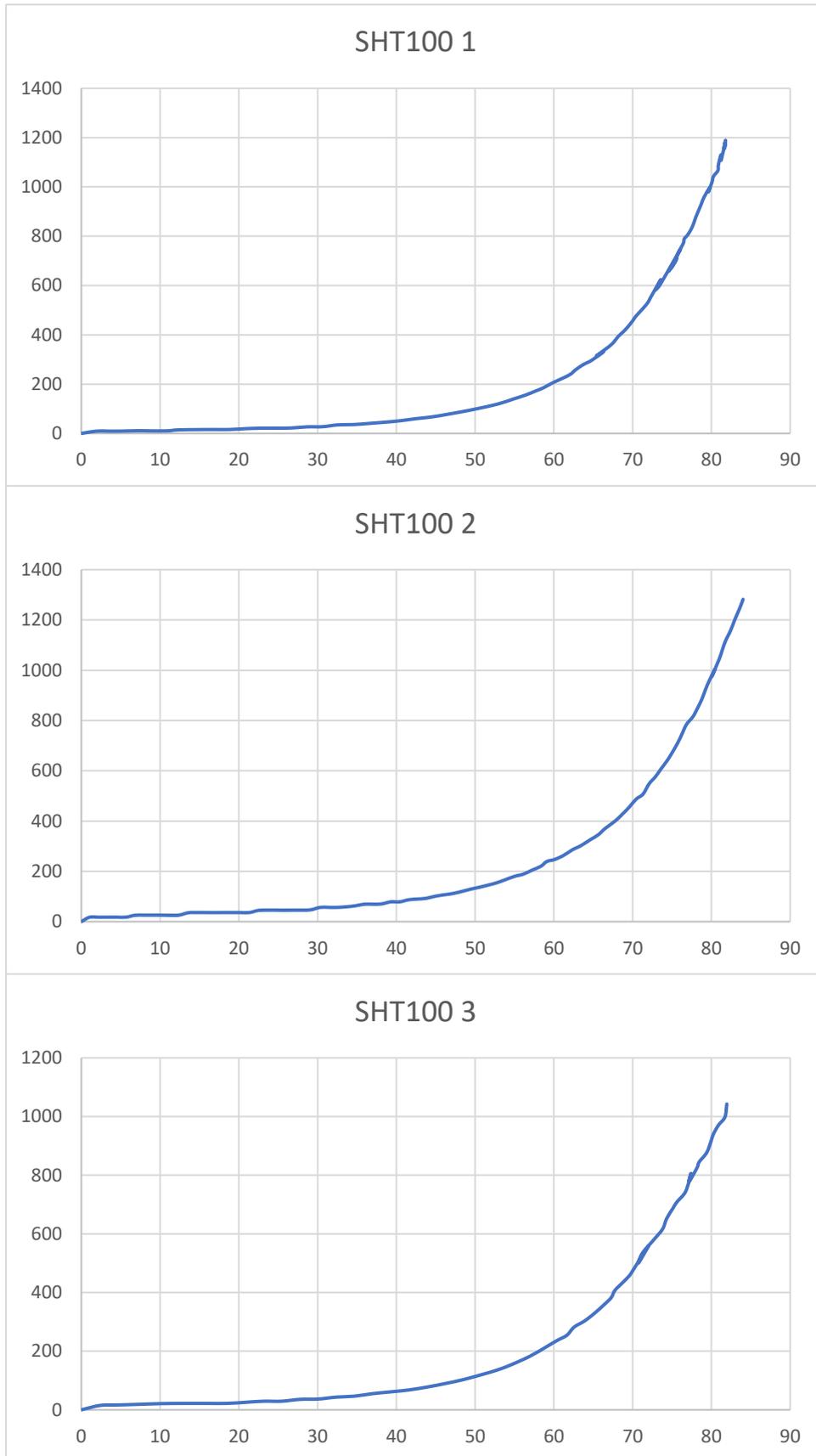




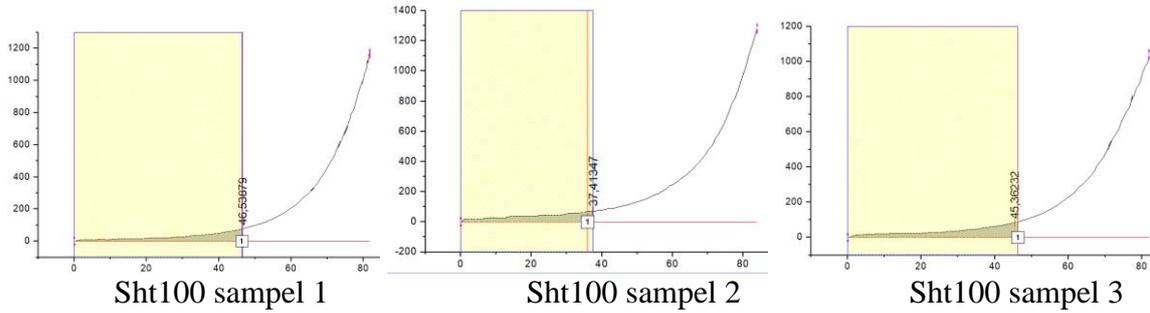
Perhitungan Nilai Ketangguhan dengan *Software Origin*



**d. Spesimen SHT100
Kurva Stress-Strain**



Perhitungan Nilai Ketangguhan dengan *Software Origin*



Lampiran 7

Tabel Pengolahan Data Pengujian Impak

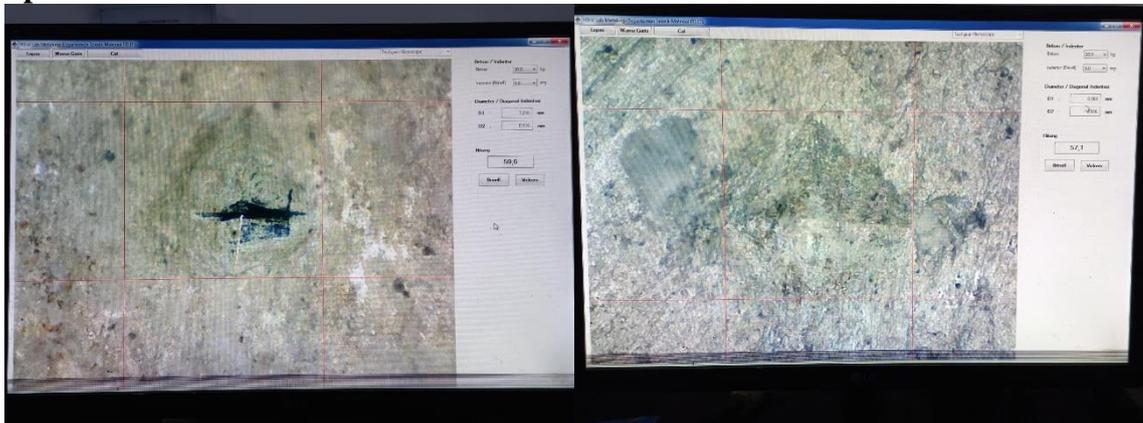
Sampel	α	β	W (N)	L (m)	$\cos\alpha$	$\cos\beta$	EI (J)	Rata-rata EI (J)
non-HT	150	124	13,132	0,27	-0,86602540	-0,55919290	1,087917589	1,110257891
		123				-0,54463904	1,139520365	
		123,7				-0,55484443	1,103335719	
SHT50	150	89	13,132	0,27	-0,86602540	0,017452406	3,132494264	1,839402055
		120				-0,5	1,297794313	
		124				-0,55919290	1,087917589	
SHT75	150	114	13,132	0,27	-0,86602540	-0,40673664	1,297794313	1,688117113
		117				-0,4539905	1,062341703	
		108				-0,30901699	1,887055362	
SHT100	150	109	13,132	0,27	-0,86602540	-0,32556815	1,916266842	1,669534744
		107,5				-0,3007058	2,004419801	
		124				-0,55919290	1,087917589	

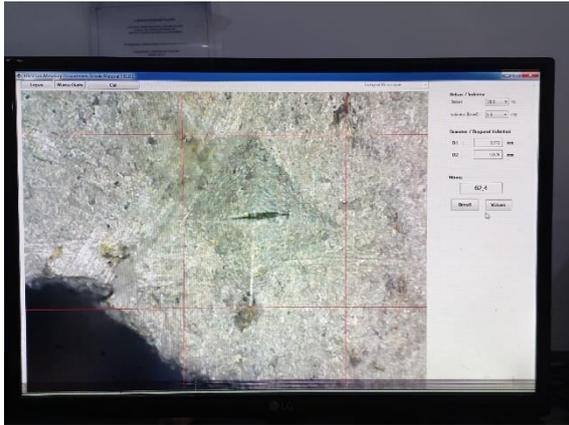
Rata-rata EI (J)	Impact Strength (kJ/m ²)
1,110257891	13,87822364
1,839402055	22,99252569
1,688117113	21,10146391
1,669534744	20,8691843

Lampiran 8

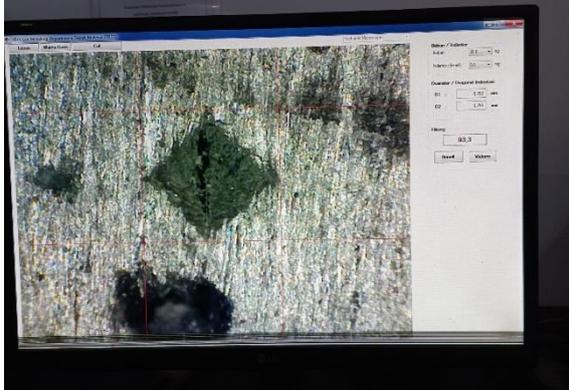
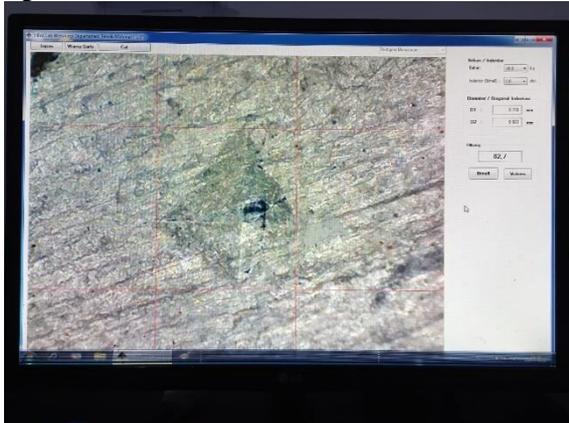
Hasil Pengujian Kekerasan

a. Spesimen Non-HT

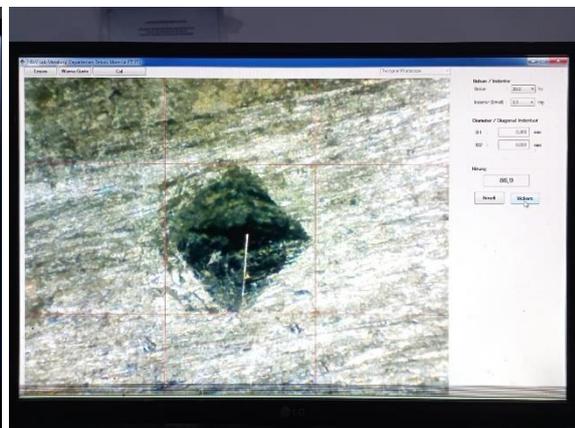
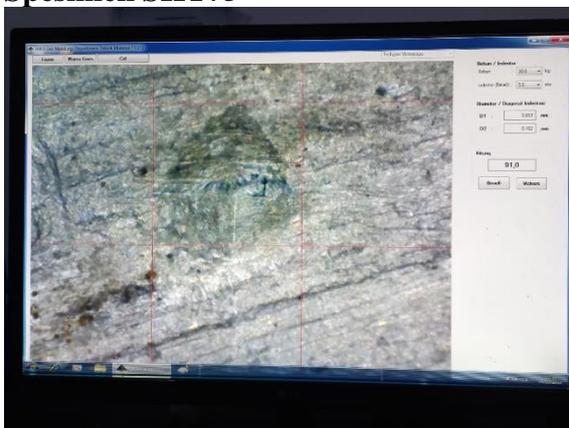


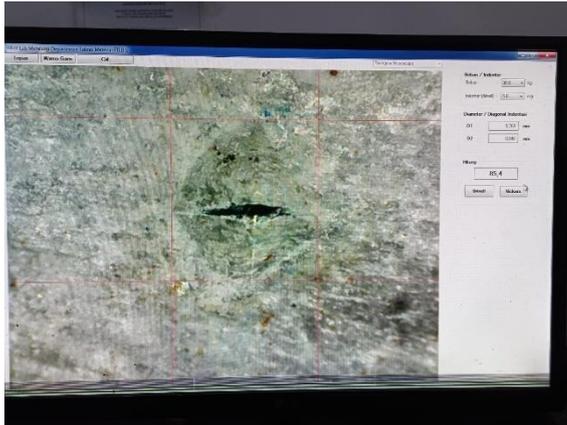


b. Spesimen SHT50

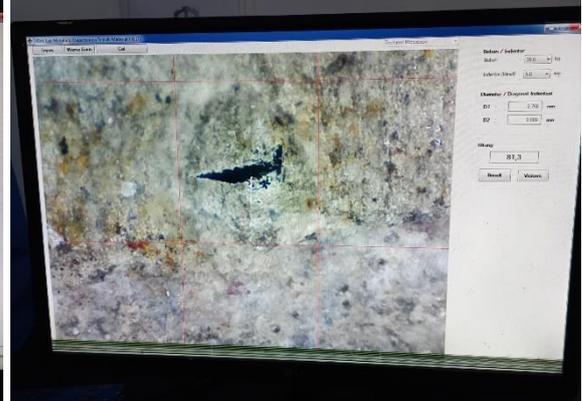
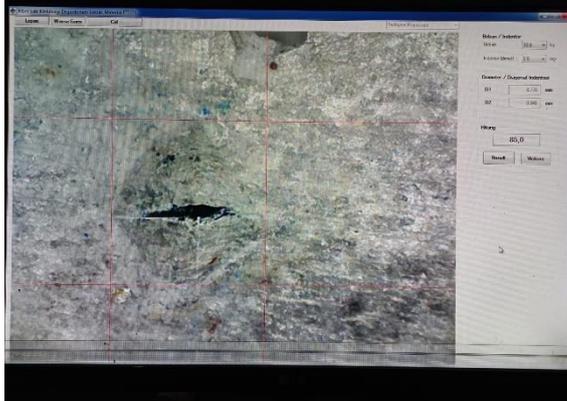
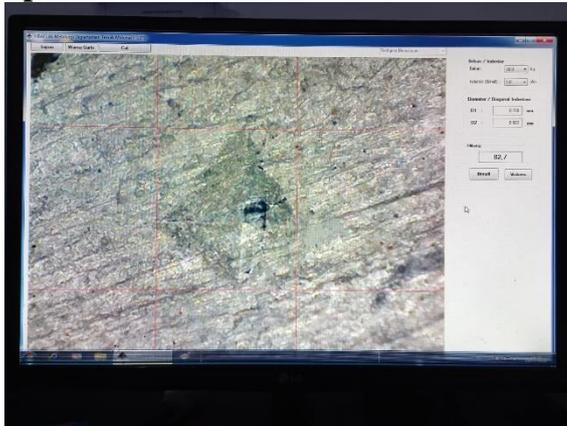


c. Spesimen SHT75





d. Spesimen SHT100



Spesimen	Nilai Kekerasan (VHN)	Rata-rata
Non-HT	57,1	59,975
	59,6	
	60,9	
	62,3	
SHT50	82,7	88,75
	91,7	
	87,3	
	93,3	
SHT75	80,2	85,875
	85,4	
	86,9	
	91	
SHT100	85	82,475
	81,3	
	80,9	
	82,7	

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 kakak-kakak 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. Reynald Renanda Maulidana dan Muhammad Zaki Ramadhan 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 MATAHATI yang selalu memberikan doa dan dukungan kepada penulis selama masa perkuliahan serta selalu menghadirkan informasi menarik dan menjadi tempat untuk melepaskan penat.
8. Grader Metalurgi dan Grader Perlakuan Panas serta para praktikan penulis yang turut memberikan warna dan tambahan wawasan selama perkuliahan.
9. Keluarga besar LKKI Ash-Haabul Kahfi khususnya kabinet Anshor yang senantiasa menjaga dan mengingatkan penulis pada hal yang benar serta dengan sabar mengikuti kepemimpinan penulis.
10. Keluarga besar MT20 yang telah menemani dan mewarnai kehidupan perkuliahan penulis dari awal hingga akhir.
11. 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 membantu penulis selama berkuliah hingga menyelesaikan Tugas Akhir ini, dan penulis memohon maaf apabila terdapat pihak-pihak yang belum dituliskan pada halaman ini. Semoga semua kebaikan yang telah diberikan dibalas oleh Allah SWT dan semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat untuk pengembangan lebih lanjut, khususnya demi kemajuan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS dan Indonesia.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

Miftakhul Arzaq Chusnul Maulana Ischaq

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Miftakhul Arzaq Chusnul Maulana Ischaq yang dilahirkan pada tanggal 25 Mei 2000 dan merupakan anak terakhir dari empat bersaudara dari pasangan Abdul Aziz dan Nurul Choiriyah. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Wonorejo 2 (2007-2013), SMP Negeri 1 Singosari (2013-2016), SMA Negeri 1 Lawang (2016-2018) yang kemudian melanjutkan perkuliahan jenjang sarjana di Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya melalui jalur penerimaan mahasiswa baru SNMPTN pada tahun 2018. Selama menjalani masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan akademik sebagai Grader Metalurgi dan Grader Perlakuan Panas. Penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi sebagai staf Lini Keilmuan

JMMI 2019, staf ahli Sektor Kaderisasi JMMI 2020, staf Departemen Keilmuan LDJ Ash-Haabul Kahfi 2020, dan menjadi Ketua Umum LDJ Ash-Haabul Kahfi 2021. Penulis mengakhiri studi S1-nya dengan melakukan penelitian Tugas Akhir di bidang Metalurgi dan Manufaktur khususnya dalam pengembangan Aluminium *Foam* dengan judul Tugas Akhir “Pengaruh *Holding Time* pada *Solution Treatment* Terhadap Karakteristik Fisik dan Mekanik Paduan Al-Mg-Si *Foam* dengan *Space Holder* NaCl”. Penulis dapat dihubungi melalui alamat e-mail miftah00alarzaq@gmail.com dan nomor telepon 0877-5105-3550.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)